



HAL
open science

Méthodologie de simulation d'assemblage/ désassemblage de composants flexibles : Application à la simulation de pièces de type “ poutres flexibles ” dans un environnement de réalité virtuelle

Alexei Mikchevitch

► **To cite this version:**

Alexei Mikchevitch. Méthodologie de simulation d'assemblage/ désassemblage de composants flexibles : Application à la simulation de pièces de type “ poutres flexibles ” dans un environnement de réalité virtuelle. Mécanique [physics.med-ph]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2004. Français. NNT: . tel-00011292

HAL Id: tel-00011292

<https://theses.hal.science/tel-00011292>

Submitted on 4 Jan 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE
UNIVERSITE TECHNIQUE D'ETAT BAUMAN DE MOSCOU**

N° attribué par la bibliothèque

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

T H E S E en co-tutelle

pour obtenir les grades de

DOCTEUR DE L'INPG

Spécialité : « Mécanique : Conception, Géomécanique, Matériaux »
préparée au laboratoire **Sols, Solides, Structures de Grenoble**
dans le cadre de l'Ecole Doctorale « Mécanique et Energétique »

et

CANDIDAT ES SCIENCES TECHNIQUES

Spécialité : « Dynamique et résistance des machines et des appareils »

présentée et soutenue publiquement par

Alexei MIKCHEVITCH

le 17 décembre 2004

***Méthodologie de simulation d'assemblage/désassemblage
de composants flexibles : Application à la simulation de pièces de type
« poutres flexibles » dans un environnement de réalité virtuelle***

**Directeurs de thèse :
Jean-Claude LEON
Alexandre GOUSKOV**

JURY

M. FUCHS P., Professeur, Ecole des Mines, Paris
M. COGNARD J.-Y., Professeur, ENSIETA, Brest
M. PANOVKO G., Directeur de recherches, Académie des Sciences, Moscou
M. LEON J.-C., Professeur, INPG, Grenoble
M. GOUSKOV A., Professeur, UTEBM, Moscou
M. ANDRIOT C., Docteur, CEA, Fontenay-aux-Roses
M. NARAYKIN O., Professeur, UTEBM, Moscou

Président
Rapporteur
Rapporteur
Directeur de thèse
Directeur de thèse
Examineur
Examineur

**Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана
Гренобльский Национальный Политехнический Институт (Франция)**

На правах рукописи

Микшевич Алексей Владимирович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СБОРКИ-
РАЗБОРКИ ГИБКИХ ЭЛЕМЕНТОВ: ПРИЛОЖЕНИЕ К РАСЧЕТУ ЭЛЕМЕНТОВ ТИПА
«ГИБКИЙ СТЕРЖЕНЬ» В СРЕДЕ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ**

**Специальность 01.02.06
Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

**Научные руководители:
д.т.н., профессор Гуськов Александр Михайлович,
профессор Леон Жан-Клод**

**Гренобль – Москва
2004**

A ma famille...

Remerciements

Je tiens à remercier tous les membres du jury pour l'attention qu'ils ont bien voulu porter à ce travail :

Monsieur P. Fuchs pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury,

Messieurs J.-Y. Cognard et G. Y. Panovko pour avoir accepté la charge de rapporteurs. Qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance pour avoir pris une partie de leur temps pour lire ce mémoire et en faire une critique constructive,

Messieurs C. Andriot et O. S. Naraykin pour m'avoir fait l'honneur de l'examiner.

Je remercie également toutes les personnes sans qui ce travail n'aurait pu aboutir :

Je tiens à remercier très sincèrement en premier lieu Messieurs J.-C. Léon, initiateur de ce travail, et A. M. Gousskov qui ont bien voulu diriger mes travaux pendant toutes ces années. Qu'ils trouvent ici toute ma gratitude et toute ma sympathie pour leur suivi incessant et attentif, pour leur soutien permanent et leurs apports scientifiques, mais aussi pour le temps qu'ils ont bien voulu me consacrer malgré un emploi du temps chargé.

Je remercie également Monsieur D. Brissaud qui a su éveiller mon intérêt pour la recherche au début de mon D.E.A.

Je remercie toutes les personnes de l'Université Technique d'Etat Bauman de Moscou (UTEBM) et tout particulièrement le personnel du Département RK5 d'UTEBM pour l'attention qu'ils ont bien voulu porter à cette thèse en co-tutelle, pour leur compréhension et leur support.

J'exprime toute ma gratitude à l'équipe de l'INRIA Rhône-Alpes à Montbonnot pour pouvoir donner aimablement accès au système Optotrak et le support correspondant.

Je remercie également Messieurs F. Mérienne et G. Lemasson ainsi que toute l'équipe de l'Institut Image à Chalon-sur-Saône pour leur accueil et leur collaboration durant le projet commun.

Je remercie toutes les personnes des différents laboratoires et entreprises et tout particulièrement le CEA Centre de Fontenay-aux-Roses, Haption, EADS, Renault, Dassault Aviation, l'équipe d'AS Haptique pour me faire partager leurs connaissances.

Enfin, je ne saurais oublier tous les membres de l'équipe Conception Intégrée du laboratoire 3S pour les échanges scientifiques, les discussions amicales, le soutien, les encouragements lors de la rédaction du présent mémoire.

Table des matières

<u>Introduction générale</u>	7
<u>Chapitre 1. Méthodes et outils en conception mécanique : des méthodes classiques aux maquettes virtuelles</u>	11
1.1. Evolution des méthodes en conception mécanique	12
1.2. Méthodes de simulation du processus d'assemblage/désassemblage (A/D)	17
1.3. Intérêt de la réalité virtuelle dans la simulation des opérations d'A/D et de maintenance	31
1.4. Conclusions	47
<u>Chapitre 2. Réalité virtuelle : méthodes et modèles</u>	51
2.1. Réalité virtuelle (RV) : objectifs, concepts, applications	52
2.2. Interfaces de manipulation d'objets pour l'A/D virtuel	62
2.3. Modèles de représentation d'objets virtuels déformables	83
2.4. Conclusions	96
<u>Chapitre 3. Méthodologie de simulation des opérations d'A/D de pièces déformables dans un environnement de RV</u>	99
3.1. Introduction	100
3.2. Méthodologie de simulation d'A/D virtuel de pièces déformables	101
3.3. Principes de simulation de pièces déformables pour l'A/D virtuel	110
3.4. Détermination des caractéristiques du matériau pour la simulation du comportement de pièces flexibles	120
3.5. Problèmes d'intégration de modèles CAO dans un environnement de RV	130
3.6. Conclusions	134
<u>Chapitre 4. Modèle mécanique de pièces flexibles de type « poutres flexibles »</u>	137
4.1. Introduction	138
4.2. Poutres flexibles : définitions et hypothèses	139
4.3. Partie géométrique du modèle : non-linéarité géométrique	144
4.4. Partie physique du modèle : équations d'équilibre	151
4.5. Vecteur d'état de la pièce flexible	154
4.6. Conclusions	160
<u>Chapitre 5. Mise en place et études du comportement numérique du modèle</u>	163
5.1. Introduction	164
5.2. Méthodes numériques employées	164
5.3. Simulation dans l'espace des efforts	172
5.4. Simulation dans l'espace des configurations	179
5.5. Conclusions	195

<u>Chapitre 6. Etude expérimentale et évaluation des opérations d’A/D</u>	199
6.1. Introduction	200
6.2. Critères d’évaluation des opérations d’A/D dans un environnement de RV	200
6.3. Démarche expérimentale	207
6.4. Caractérisation des opérations d’assemblage	214
6.5. Conclusions	222
<u>Chapitre 7. Démonstrateurs de simulation de pièces flexibles</u>	225
7.1. Introduction	226
7.2. Simulation de pièces flexibles dans le démonstrateur F3P	226
7.3. Simulation de pièces flexibles dans l’environnement Virtools	231
7.4. Conclusions	236
<u>Conclusions et perspectives</u>	239
<u>Annexe A</u>	245
<u>Bibliographie</u>	249

Introduction générale

Le monde change, les frontières s'ouvrent, les marchés et les moyens de communication se développent, les économies deviennent de plus en plus instables... Le monde de plus en plus concurrentiel, l'émergence rapide de nouveaux produits et de nouveaux fabricants, la disparition de certaines contraintes entre les pays font du développement industriel des produits une « activité à risques ». Dans le contexte de ces changements, rapides et imprévisibles, des nouvelles contraintes industrielles se dégagent et deviennent un facteur important pour les industriels développant des produits innovants.

Il y a quelques décennies, les industriels dictaient les « règles du jeu ». Désormais, c'est le marché qui impose sa propre loi en faisant développer des produits de plus en plus variés, sophistiqués, commodes pour l'usage et, bien évidemment, de moins en moins chers. Afin de tenir compte ces nouvelles contraintes de réalité économique, des nouveaux produits ne peuvent plus être conçus, validés, fabriqués, mis sur le marché, maintenus et réutilisés sans prise en considération du fameux trio « délais – coût – qualité ».

Les priorités pour les industriels ainsi que pour les clients s'évaluent avec la continuité constante. Après la nécessité d'optimisation des processus de conception et de fabrication, la qualité et les problèmes divers liés à l'ergonomie, le recyclage, la maintenance à moindre coût élargissent sans cesse ses horizons. En effet, les exigences des clients en matière de qualité, d'ergonomie, de coût, de temps d'exécution d'opérations d'assemblage/désassemblage (A/D) et de maintenance n'ont pas cessé de croître, au point que les industriels se trouvent de plus en plus contraints d'accepter ces exigences, parfois difficiles et contradictoires à étudier et à mettre en place lors des phases d'industrialisation, de mise sur le marché et de maintenance. Donc, les producteurs ne peuvent plus se focaliser uniquement sur le produit lui-même et sur son mode de fonctionnement. Désormais, les industriels font évaluer la conception en tenant compte des différentes phases de vie du produit ainsi que des nombreuses exigences des clients : de la phase d'industrialisation jusqu'à la phase de destruction et/ou de recyclage en passant obligatoirement par la phase de suivi du produit lors de son exploitation. Les phases d'usinage, d'assemblage ainsi que la maintenance simple à effectuer et à moindre coût sont des étapes qui nécessitent désormais une attention des concepteurs.

La fabrication matérialise le produit : c'est donc principalement par la fabrication que se concrétisent les caractéristiques de coûts, de délais et de qualité du produit [Blondaz 1999]. A ce stade de développement du produit, il s'agit non seulement de concevoir et d'optimiser des gammes d'usinage appropriées, mais également de générer, d'évaluer ainsi que d'optimiser le processus d'assemblage. Il est clair qu'à l'ère de l'Internet haut débit accessible à bord d'un avion, des produits de plus en plus complexes sont requis : le processus d'assemblage est difficilement imaginable pour un Boeing 747 qui comporte, par exemple, 6 millions de composants et 250 km de circuits électriques ou électroniques avec les composants provenant d'environ 14 pays [Boyer 1997]. Les procédures de contrôle qualité et de maintenance ainsi que leurs coûts posent également une question, puisque l'on imagine sans peine que les contraintes liées à la fiabilité et à la sécurité sont encore plus manifestes que pour une automobile avec un nombre de pièces de plus de 150 fois supérieur.

Ce simple exemple montre bien le fait qu'il est important non seulement de concevoir un « bon » produit qui répond aux critères de délais – coût – qualité, mais aussi de mettre en place toute la démarche du processus de développement de produits dès les premières phases de la conception jusqu'à la vente et la maintenance. La prise en compte de toutes les contraintes dues à des métiers divers, intervenant dans le processus de développement du produit, devient un vrai problème pour les industriels lors que l'on se place dans un contexte de compétitivité mondiale. En effet, afin de pouvoir concevoir et produire efficacement et à moindre coût en présence des contraintes multi-métiers, des méthodes et des outils performants sont nécessaires. Dans cette optique, les métiers d'assemblage, de

maintenance, d'ergonomie occupent une place de plus en plus importante. Effectivement, le processus de développement d'un produit se termine habituellement par des phases de conception de son processus de production (usinage, assemblage,...) et de tests de validation du produit nécessitant la fabrication de prototypes physiques multiples. Ainsi, chaque erreur dans la conception mécanique ou dans le choix d'un procédé de fabrication entraîne une augmentation forte de coût et de temps de développement du produit. Alors, il est nécessaire de pouvoir identifier, prédire, éviter de multiples problèmes bien en amont car leur résolution s'avère très coûteuse lorsque les moyens de production retenus pour un produit comportant certaines erreurs ou peu optimisés sont déjà mis en place.

La solution la plus prometteuse est sans doute l'utilisation des outils de CAO dans le développement d'un nouveau produit. Ces outils forment un support fort pour la conception dès la phase de création d'un premier dessin jusqu'à l'envoi à des fournisseurs des données de définition d'un produit complet et validé numériquement. On n'imagine plus le développement efficace du produit sans la création de sa représentation numérique 3D, facile à modifier, commode pour différentes discussions entre des acteurs de conception, intéressante pour les transferts de données, efficace pour différents tests et calculs. Il est désormais possible de modéliser et d'analyser numériquement des phénomènes physiques complexes, de simuler et d'optimiser un processus d'usinage sans utiliser une machine-outil, de concevoir un processus d'A/D avec une séquence optimale associée et le visualiser. Cela permet, par conséquent, de diminuer considérablement un nombre de prototypes physiques, de réduire le temps et le coût total du cycle de développement de produit.

Cependant, comme nous l'avons remarqué, les réalités industrielles font aller les industriels plus loin dans leur activité. Notamment, on essaie maintenant de prendre en compte d'autres types de contraintes comme les problèmes d'accessibilité, de visibilité ou de fatigue d'un monteur au cours d'assemblage, les difficultés de maintenance d'un produit vendu, le placement optimal des lignes de production et la visualisation générale du processus de production, l'estimation d'un espace de travail pour un robot ou un être humain et même la modélisation d'un environnement extérieur afin de considérer des relations complexes entre le produit travaillant dans les conditions réelles et son environnement. Aujourd'hui, on est aussi intéressé par la perception des caractéristiques physiques d'un objet conçu et encore inexistant, par exemple, son poids ou sa rigidité lors de sa manipulation au cours d'une opération d'assemblage, etc. Ainsi, tous ces besoins ont conduit à l'apparition dans les années quatre-vingt-dix de la Réalité Virtuelle (RV) au sein des grandes entreprises comme PSA, Renault, Aérospatiale (actuellement EADS), BMW, le CEA et bien d'autres. Ces nouveaux outils permettent à ce jour d'être immergé dans un monde entièrement virtuel, de déplacer et de toucher des objets virtuels et même de percevoir un certain nombre d'efforts comme les interactions lorsque l'objet déplacé rentre en collision ou le poids de cet objet, ce que par ailleurs la CAO classique fut incapable d'offrir.

Toutes ces fonctionnalités proposées par la RV sont très répandues vis-à-vis des besoins industriels et notamment, lors d'une étude/optimisation des opérations d'A/D. Par exemple, la RV permet de simuler une opération d'A/D ou de maintenance d'une pièce ou d'un ensemble de pièces dans le cas d'un système mécanique complexe, fortement encombré avec visibilité réduite, de générer une trajectoire d'A/D libre des collisions pour une pièce donnée et de percevoir des efforts une fois cette pièce entrée en collision en temps réel, d'estimer l'espace de travail de l'opérateur et de prendre en compte des contraintes du point de vue de l'ergonomie comme les mouvements provoquant une fatigue rapide ou nécessitant des opérations de manutention pour des composants lourds, etc.

Toutefois, malgré les avantages évidents dont la simulation virtuelle dispose, les opérations d'A/D ou de maintenance sont extrêmement diversifiées et il n'existe pas de solution unique pour les réaliser même si l'on tient compte de certains critères d'optimisation. De plus, il est nécessaire de considérer la nature des composants en vue de leur montage, à savoir leur souplesse possible ayant pour conséquence le changement parfois très important de leur forme durant le processus de manipulation virtuelle. Actuellement, il n'existe pas véritablement d'outil, notamment dans le domaine d'A/D virtuel, permettant de considérer de manière réaliste le phénomène de déformation des composants au cours de leur manipulation. En effet, il est apparu récemment un petit nombre d'outils traitant ce type de manipulation, mais de façon parfois très approximative, i.e. la déformation des pièces virtuelles à caractère flexible est produite à partir d'un modèle mécanique très simplifié. Il convient de noter que la contrainte principale pour toute simulation virtuelle est le temps de réponse qui doit être extrêmement rapide. La prise en compte de cette contrainte uniquement peut conduire à la

génération de résultats complètement irréels du point de vue de la mécanique et donc, inexploitable pour toute étude/optimisation d'A/D ou d'autre opération. En effet, l'utilisation de tels modèles simplifiés dans le but de gagner du temps ne permet pas de fournir au concepteur une information correcte et fiable comme la forme réaliste déformée d'une pièce flexible pour le contrôle des interférences réelles entre la pièce virtuelle manipulée et son environnement extérieur, de percevoir les données mécaniques associées à la déformation (efforts, contraintes mécaniques dans la pièce déformée,...), etc.

Ainsi, l'objectif de ces travaux de thèse est de :

- proposer une méthodologie générale pour la simulation des opérations d'A/D et de maintenance virtuelles de pièces déformables compte tenu de différentes contraintes du milieu industriel,
- contribuer au développement des méthodes permettant la modélisation réaliste et rapide d'un comportement de pièces flexibles subissant une déformation importante au cours de leur manipulation d'A/D virtuel, notamment, des pièces de type poutres flexibles souvent rencontrées dans la pratique industrielle,
- développer un outil logiciel permettant aux concepteurs d'étudier/analyser de manière adéquate et rapide une manipulation d'A/D donnée à partir de paramètres réalistes fournis par un modèle mécanique adéquate du comportement de poutres flexibles.

Le présent mémoire est organisé de la façon suivante. Le premier chapitre présente les principales méthodes et outils en conception mécanique ainsi que des approches utilisées couramment pour la simulation des opérations d'A/D. Les principaux avantages et inconvénients des ces dernières méthodes sont abordés. En conséquence, l'intérêt de la RV dans la simulation des opérations d'A/D et de maintenance, notamment en ce qui concerne le caractère flexible de différents composants, est discuté. Par ailleurs, de nombreux exemples d'utilisation de la RV dans l'A/D sont donnés et leurs principales limites sont également exposées.

Le chapitre 2 présente de façon synthétique certains objectifs de la RV et ses concepts généraux. Les interfaces de manipulation couramment utilisées en RV et surtout dans le domaine d'A/D virtuel sont exposés et discutés. En effet, le problème de l'utilisation efficace des interfaces de RV est un facteur important pour toute manipulation virtuelle, car c'est par l'intermédiaire de ces interfaces que l'opérateur peut communiquer, interagir avec les objets, percevoir des résultats à l'issue de la simulation virtuelle, etc. Nous montrerons que ce problème devient encore plus complexe lorsqu'il s'agit de la manipulation et de la prise en compte de manière adéquate du comportement mécanique de pièces complexes comme celles à caractère flexible. Enfin, les principaux modèles de représentation des objets virtuels à caractère déformable, utilisés couramment dans le domaine de la RV, seront présentés et discutés.

Le chapitre 3 propose une méthodologie générale pour la simulation des opérations d'A/D et de maintenance virtuelles de pièces déformables. Cette méthodologie contient des étapes importantes à suivre dès la phase de définition des objectifs de simulation d'A/D jusqu'à la phase d'analyse des résultats et l'optimisation du processus d'A/D et permet aux concepteurs d'étudier/analyser/optimiser un tel processus. En particulier, les problèmes importants comme la caractérisation des propriétés d'un matériau ainsi que l'intégration des modèles CAO extérieurs à l'environnement de simulation sont mis en évidence.

Le chapitre 4 présente un modèle mécanique afin de pouvoir simuler les pièces de type poutres flexibles de manière adéquate. Ce modèle permet de décrire le comportement de poutres flexibles soumises à des grands déplacements géométriquement non-linéaires. Une fois adapté à des particularités de simulation virtuelle, ce modèle devient particulièrement intéressant dans le contexte d'A/D virtuel de pièces flexibles : il fournit des informations réalistes du point de vue mécanique et intéressantes pour les diverses études d'une opération d'A/D compte tenu de la contrainte de temps de réponse.

Le chapitre 5 est consacré aux aspects de mise en place numérique du modèle et de son évaluation du point de vue du réalisme des résultats ainsi que du temps de réponse qui est une fonction complexe des méthodes numériques utilisées, des espaces dans lesquels la manipulation virtuelle est

effectuée, de la qualité des conditions aux limites fournies. Par ailleurs, le problème important d'existence de solutions multiples est mis en évidence lorsque la manipulation virtuelle d'une pièce flexible est réalisée dans l'espace des configurations suivant la tendance actuelle de l'utilisation des interfaces motrices de localisation spatiale en RV.

Le chapitre 6 est consacré à l'étude, expérimentale et virtuelle, d'une opération d'assemblage réelle. Tout d'abord, un certain nombre de critères d'évaluation basés sur des paramètres caractéristiques des opérations d'A/D de pièces flexibles est proposé. Ces paramètres peuvent être extraits de données réalistes, fournies par le modèle mécanique intégré dans un système de simulation d'A/D virtuel et utilisés dans une étude/analyse/optimisation d'une opération d'A/D ou de maintenance virtuelle donnée. Ainsi, des exemples d'une telle étude sont présentés dans ce chapitre afin de pouvoir évaluer et caractériser une opération d'assemblage d'une pièce flexible réelle mais aussi de valider un certain nombre d'aspects évoqués dans la méthodologie de simulation des opérations d'A/D virtuelles proposée et d'appliquer cette méthodologie à un cas d'étude précis.

Enfin, le chapitre 7 présente brièvement un outil logiciel développé au cours des travaux de cette thèse. Cet outil tient compte de certains aspects de la méthodologie de simulation d'A/D de pièces flexibles, fournit des données réalistes en ce qui concerne les paramètres d'évaluation des opérations d'A/D de pièces de type poutres flexibles et permet de considérer une certaine diversité des opérations d'A/D (manipulation à une ou deux mains), la nature de différentes données d'entrée générées par les interfaces de RV, etc. Un module de ce logiciel a été intégré dans un environnement de RV dans le cadre d'un projet commun entre le laboratoire 3S de Grenoble et l'Institut d'Image à Chalon-sur-Saône.

Chapitre 1

Méthodes et outils en conception mécanique : des méthodes classiques aux maquettes virtuelles

Table des matières

1.1. Evolution des méthodes en conception mécanique	12
1.1.1. Méthodes classiques de conception	12
1.1.2. Nouvelles méthodes de conception	14
1.1.2.1. <i>Ingénierie simultanée</i>	14
1.1.2.2. <i>Conception intégrée</i>	15
1.1.2.3. <i>Conception pour un métier X (DFX)</i>	15
1.1.3. Analyse et synthèse des méthodes de conception	16
1.2. Méthodes de simulation du processus d'assemblage/désassemblage (A/D)	17
1.2.1. Introduction	17
1.2.2. Classification des méthodes de simulation d'A/D	18
1.2.3. Méthodes automatiques	20
1.2.4. Méthodes semi-automatiques	22
1.2.5. Méthodes interactives de type temps-réel	22
1.2.6. Analyse des méthodes de simulation d'A/D	25
1.3. Intérêt de la réalité virtuelle dans la simulation des opérations d'A/D et de maintenance	31
1.3.1. Introduction	31
1.3.2. Méthodes de simulation d'A/D virtuel	31
1.3.2.1. <i>Classification des méthodes de simulation d'A/D virtuel</i>	32
1.3.2.2. <i>Méthodes non-interactives de simulation d'A/D virtuel</i>	33
1.3.2.3. <i>Méthodes interactives de simulation d'A/D virtuel</i>	35
1.3.3. Problèmes de simulation d'A/D virtuel de pièces flexibles	42
1.3.4. Pourquoi la réalité virtuelle pour la simulation d'A/D et de maintenance de pièces flexibles ?	44
1.3.5. Analyse des méthodes d'A/D virtuel	46
1.4. Conclusions	47

1.1. Evolution des méthodes en conception mécanique

1.1.1. Méthodes classiques de conception

Avant de parler des nouvelles méthodes d'aide à la conception, la fabrication et la maintenance, commençons par l'analyse des approches classiques en suivant leur évolution reflétant, en effet, l'évolution des besoins d'un être humain et donc, de la complexité d'un produit nécessitant la modélisation de plus en plus complexe de son comportement physique. Cette brève analyse nous permettra de nous positionner par rapport aux méthodes de conception existantes afin de pouvoir montrer que l'utilisation de nouvelles approches comme la RV n'est pas seulement un effet de mode, mais surtout une opportunité effective pour différents métiers intervenant dans le cycle de vie du produit.

Selon Laffont qui évoque dans [Laffont 1984] un exemple de développement de la conception dans le domaine aéronautique, les premiers « actes de conception » ont vu le jour durant la Renaissance grâce, entre autres, aux travaux de L. de Vinci. Les esquisses de ce célèbre ingénieur, basés sur des travaux de certains ingénieurs italiens et, bien évidemment, sur sa propre imagination, montrent les premiers pas vers des procédures méthodiques de conception ainsi que la nécessité de créer et d'archiver les premières bases de données et de connaissances des anciens ingénieurs italiens. Les croquis de bicyclette, de planeur et d'autres mécanismes reflètent le passage fondamental vers la représentation graphique du produit en question – le dessin. Les représentations graphiques ont souvent été complétées par des analyses élémentaires des forces à développer, des schémas de fonctionnement et de mesure, etc. et seront appelées par S. Mer « objets intermédiaires » à la fin de 20^{ème} siècle [Mer 1998], [Blanco 1998].

La révolution industrielle du 19^{ème} siècle est marquée par l'apparition des entreprises manufacturières et l'approbation des premiers modes organisationnels de travail. La nécessité de production de masse et, en conséquence, la forte croissance de la taille des entreprises industrielles au début du 20^{ème} siècle requièrent la mise en place des nouvelles méthodes organisationnelles ce qui provoque un changement au niveau du fonctionnement des différentes structures de l'entreprise. Comme exemple, on peut citer le mode de fabrication à la chaîne de « l'Oldsmobile » d'Olds (1901) ou « Ford T » de Ford (1908) avec la répartition des tâches. F. Taylor pose comme un des grands principes de l'organisation scientifique du travail, de séparer la conception du travail de sa réalisation [Taylor 1902], [Segrestin 1992], [Blondaz 1999]. Les bureaux d'études et de méthodes, ateliers de fabrication et d'assemblage sont séparés : des actions spécifiques associées au développement et à la production du produit sont réalisées par des employés de métiers différents dans des départements de l'entreprise différents désormais délocalisés. On s'aperçoit ici que la façon de travailler devient de plus en plus linéaire et séquentielle.

En se basant sur l'observation et la structuration des méthodes employées par les entreprises jusque dans les années soixante-dix, G. Pahl et W. Beitz modélisent le processus de conception du produit fondé sur l'approche organisationnelle de répartition des tâches [Pahl & al. 1986], [Beitz & al. 1994]. Selon cette modélisation, la démarche conceptuelle débute par la définition des besoins et des fonctions d'un futur produit (étape qualitative), comprend des phases d'identification de solutions et de choix d'une solution et se termine par la description détaillée du produit (étape quantitative).

Globalement, l'activité de conception est présentée de façon systématique : elle comprend quatre phases qui se réalisent l'une après l'autre de façon séquentielle et sont résumées ci-dessous.

La phase de détermination des besoins (Defining Requirements) permet de répertorier les fonctions du produit qui peuvent être les fonctions qualitatives ou quantitatives évoluant au cours de la conception. En effet, cette phase permet de planifier dans le temps les différentes étapes de la conception.

La phase conceptuelle (Conceptual Design) établit des relations entre les fonctions du produit et la structure du système correspondant en se basant sur des « éléments de solution » qui ont été choisis sur des critères technico-économiques [Roucoules 1999]. Dans un premier temps, le concepteur formulera globalement le problème posé de façon claire et précise. Un élément de solution est une structure basée sur un principe physique pour réaliser une fonction donnée. La structure du produit est alors exprimée géométriquement de telle façon que tous les éléments de structure soient

correctement reliés pour réaliser le système. Le concepteur peut revenir en arrière tant que le choix de principes de solutions ne lui paraît pas optimal.

La phase de conception architecturale (Embodiment Design) commence uniquement lorsque la phase conceptuelle est achevée. Le dimensionnement de la structure se réalise par des questions (Check-list) en utilisant des guides pour le concepteur afin de prendre en compte des différents points de vue sur le produit et ne pas oublier des paramètres importants. En effet, cette phase est structurée de façon à utiliser une démarche « pas à pas » afin de valider chaque solution possible, en partant d'une définition grossière et en allant vers une définition détaillée. Cette phase de la conception consiste alors en la création du dessin d'ensemble et des formes préliminaires (positionnement géométrique des sous-ensembles de composants et des composants eux-mêmes, matériaux, simulations de comportement, etc.). Durant cette phase, le concepteur peut également revenir en arrière lorsqu'il estime que les solutions finalement sélectionnées lors de la phase conceptuelle ne répondent pas aux contraintes de conception.

La phase de conception détaillée (Detailed Design) consiste en la préparation de documents de conception pour la fabrication (les plans de définition) : définition exacte des formes des composants, des matériaux, des tolérances des dimensions définitives, de la qualité des surfaces, des procédés de mise en forme, etc. Cette dernière phase comprend différentes vérifications ainsi que l'optimisation des contraintes correspondantes à la conception: contraintes admissibles dans les pièces, critères technologiques prescrits par les réglementations, contraintes ergonomiques définies par les normes, etc. Ici, le concepteur peut également revenir en arrière dans le processus de conception.

Pour résumer, il est clair que la méthode systématique classique est une méthode très séquentielle ne permettant pas d'obtenir rapidement une solution. Cette méthode prend en considération le trio délais – coût – qualité au travers des règles qu'elle propose et des questions présentées dans la Check-list, ce qui est très proche des préoccupations des industriels. Cependant, la prise en compte de contraintes de fabrication et d'assemblage ne se limite pas à la démarche conceptuelle : des règles sont proposées au concepteur à travers des savoir-faire technologiques afin d'éviter des problèmes de fabrication et d'assemblage. Alors, le technologue n'intervient pas directement dans cette approche, selon l'hypothèse de Pahl, car l'information technologique est à la disposition du concepteur.

Selon cette approche systématique, un ingénieur de bureau d'études est dédié à la conception, un ingénieur de bureau d'études ne s'occupe que de la fabrication, un agent du service de maintenance ne suit le produit qu'après sa vente, etc. A ce propos, L. Blondaz remarque que chaque acteur participant au cycle de vie du produit est cloisonné dans son propre domaine et développe ses compétences en fonction des tâches et des missions qui lui incombent [Blondaz 1999].

Du point de vue économique, les coûts du produit sont engagés dès les premières phases de la conception : G. Boothroyd cite un chiffre d'environ 70% en se basant sur des données d'un rapport de Ford Motor Company [Jo & al. 1993]. Cependant, les dépenses réelles sont encore relativement faibles selon M. Clautrier (Figure 1.1) : 80% du coût global est engagé lors des premières phases de la conception tandis que 75% est réellement dépensé lors de la phase de production et seulement 20% du coût couvre la phase du développement [Clautrier 1991]. C'est donc au niveau des premières phases de la conception que les gains possibles sont les plus importants car c'est la production qui est la plus coûteuse par rapport aux autres phases du cycle de vie du produit, d'où l'importance de la maîtrise des processus de fabrication/assemblage. Donc, des nouvelles méthodes de conception ont été introduites dans les années quatre-vingt.

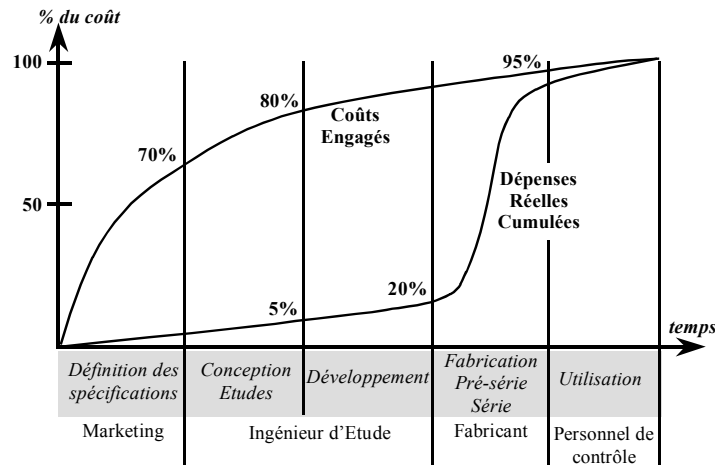


Figure 1.1. Coûts engagés et réellement dépensés lors du cycle de vie du produit [Clautrier 1991].

1.1.2. Nouvelles méthodes de conception

Les concepts des méthodes classiques, basées sur la répartition des tâches et donc, sur le cloisonnement des départements de l'entreprise, fait apparaître des dysfonctionnements multiples ; ces méthodes sont donc remises en cause. Des nouvelles méthodes de conception sont expérimentées et, ensuite, généralisées : désormais, c'est l'interaction des relations entre les bureaux d'études et de méthodes qui est mise en jeu.

1.1.2.1. Ingénierie simultanée

Une nouvelle approche nommée Ingénierie simultanée (Concurrent Engineering) a été donc développée à la fin des années quatre-vingt [Jo & al. 1993] afin de tenir compte des réalités du monde qui devient de plus en plus concurrentiel. Cette méthode a pour but de confronter différents métiers (ingénieur d'études, ingénieur de méthodes, ingénieur de production, agent de maintenance, etc.), tenir compte des points de vue de chaque profession intervenant dans le cycle de vie du produit. Ainsi, « les représentants des différents métiers » travaillent en parallèle ce qui permet de définir un produit satisfaisant les acteurs du développement du produit tant en réduisant le temps de développement ainsi que le coût du produit. Ce parallélisme des tâches permet d'évaluer, d'effectuer différentes vérifications et donc, de valider rapidement les décisions basées sur de nombreuses opinions, les remarques et les contraintes des acteurs du développement en éliminant les solutions non satisfaisantes du point de vue de la conception, la production, etc.

Une approche axiomatique de N. Suh [Suh 1989] est basée sur le point suivant : l'activité de conception comprend différents domaines (besoin du client, conception, fabrication, etc.) qui sont reliés. Un modèle de Conception distribuée [Brissaud & al. 1996] complète l'approche de Suh et considère une propriété de distribution des tâches au cours de la conception. En effet, la conception se réalise par l'interaction entre les acteurs du processus de conception en mettant en relation les connaissances propres à chaque métier. D. Brissaud remarque que concevoir c'est mettre en relation différentes entités (individus, objets et connaissances) qui ne peuvent être déterminées au préalable [Brissaud & al. 1998]. Les métiers possèdent des connaissances particulières, et lors de la conception ces connaissances sont mises en relation [Tichkiewitch 1996]. Le modèle de conception distribuée met en évidence des relations entre le processus de fabrication et d'autres processus de développement du produit : la fabrication doit intervenir dès les premières phases de la conception.

A la fin des années quatre-vingt, on trouve des méthodes de conception qui reflètent la philosophie du concurrent engineering. Les constructeurs automobiles européens (Renault,...) adoptent une organisation en « plateau-projet » qui réside dans des principes d'ingénierie simultanée : différentes personnes intervenant dans le développement d'un véhicule ainsi que les représentants des fournisseurs se réunissent physiquement en constituant un plateau-projet afin de raccourcir les délais

de conception. L'organisation sous forme de plateau-projet ne modifie pas la structure physique de l'entreprise qui reste partagée selon différentes divisions telles que les divisions Etude, Méthode, Achat... [Roucoules 1999]. Par contre, au niveau organisationnel, un groupe des personnes est réuni afin de pouvoir participer en même temps aux discussions pour trouver des compromis et finalement, choisir la meilleure solution au niveau de la conception. Donc, maintenant on s'oriente vers une méthodologie plus « affinée » de conception parallèle nommée Conception intégrée.

1.1.2.2. Conception intégrée

Cette méthode se place dans le même contexte de l'ingénierie simultanée. Le principe de la conception intégrée est également de mettre en parallèle les acteurs de conception, mais surtout en les faisant interagir, coopérer, comprendre les contraintes de chacun [Tichkiewitch 1992], [Tichkiewitch 1997].

L'approche de conception intégrée se focalise sur la mise en place de la coopération dynamique et efficace des acteurs de conception. Dans ce cas, une coopération ne réussit et perdure que si elle passe par des situations « gagnant-gagnant », chacun doit tirer profit de cette coopération basée sur la négociation [Blondaz 1999]. Donc, lorsque l'on parle de la conception intégrée, on parle plutôt de la conception collaborative basée non seulement sur le schéma d'une réunion de négociation, mais aussi sur l'interaction efficace entre différents métiers. La prise en compte des contraintes de chaque métier dès les premières phases de conception, la résolution des conflits entre les métiers par la compréhension des spécificités associées à chaque métier intervenant dans le cycle de vie du futur produit, la recherche de compromis et de la meilleure solution sont des éléments essentiels du processus de conception collaborative.

Selon la démarche de conception intégrée, le processus de conception débute par la première phase : la conception initiale. Au cours de cette étape, la naissance du produit se fonde sur les connaissances des différents métiers des acteurs afin de répondre aux besoins fonctionnels du futur produit. Donc, il s'agit de l'établissement de différents schémas, esquisses, etc., la création des premiers plans comportant les principaux éléments du produit, des surfaces fonctionnelles, etc. A l'issue de la première étape de ce travail collaboratif, les autres métiers (calcul, assemblage, maintenance, etc.) intervenant dans le cycle de vie du produit ajoutent leurs contraintes et apportent leurs connaissances particulières. Ensuite, il s'agit de la phase de la conception détaillée qui se termine par l'établissement des documents de conception correspondants (plans de définition, ...).

Pour résumer, chaque acteur, expert dans son domaine, devient en quelque sorte un concepteur, car il contribue de manière effective à l'élaboration du produit au cours de son développement. Cette contribution est basée sur l'échange dynamique des connaissances entre les experts.

1.1.2.3. Conception pour un métier X (DFX)

La conception pour un métier X (Design For X, ou DFX) a pour objectif de répondre à des contraintes associées à un métier X, par exemple, l'assemblage, la fabrication, le recyclage, la maintenance, la qualité, etc. Les approches de ce type peuvent être considérées comme l'ensemble des méthodes d'aide à la prise de décision destinées au concepteur si elles sont utilisées au cours des conceptions architecturale et/ou détaillée ; alors elles se placent dans le contexte de l'ingénierie simultanée. Une approche DFA (Design For Assembly), la première approche de type « concevoir pour un métier donné », est apparu au début des années quatre-vingt. Ensuite, c'est le DFM (Design For Manufacturing), une approche plus généralisée, qui a émergé. Evidemment, d'autres approches ont été développées suivant la même philosophie – « concevoir pour un métier » pour prendre en considération des contraintes associées aux métiers intervenant dans le cycle de vie du produit : Design For Environment (protection de l'environnement, recyclage du produit, désassemblage, etc.) [Allenby & al.1994], Design For Serviceability (aspects ergonomiques, maintenance, désassemblage, etc.) [Blanchard & al. 1995], etc. Arrêtons-nous sur les deux méthodes les plus utilisées, DFM et DFA, car nos travaux se placent également dans le contexte de contribuer au développement d'outils afin de prendre en considération des problèmes d'A/D ainsi que de maintenance.

Conception pour la fabrication (DFM)

Une approche Conception pour la fabrication (DFM) peut être utilisée à plusieurs étapes de la conception d'un produit comme outil permettant d'évaluer la fabricabilité du produit. Une telle évaluation se fonde sur différents critères afin de prendre en compte des contraintes particulières liées aux métiers de la fabrication comme l'usinage, le moulage, le frittage, etc. [IPD 1994], [Fabricius 1994].

Selon la méthode DFM, le concepteur doit « affiner » la définition d'une (des) pièce(s) en utilisant un certain nombre de règles imposées par le DFM. Les données d'entrée pour le DFM sont un plan de la pièce en question. Alors, il est possible de concevoir des formes non-fonctionnelles de la pièce compte tenu des contraintes de fabrication, d'adapter ces formes afin d'assurer la faisabilité et donc, de déterminer un processus de production en réduisant le coût de production. Cependant, les modifications possibles du produit ne doivent pas influencer sur les objectifs du produit définies durant la phase de détermination des besoins, ni le fonctionnement du produit, ni sa qualité. Les contraintes de fabrication sont associées, par exemple, aux machines-outils à utiliser, aux modes de mise en position, etc. [Feng 1995], [Aoussat & al. /1 1998].

Delbressine propose une approche à travers la création d'un nouveau modèle produit intégrant simultanément les intentions des concepteurs et les contraintes des métiers de la fabrication [Delbressine 1989]. Selon cette approche, l'analyse de fabricabilité est effectuée au cours de la conception en utilisant les fonctions du produit spécifiées par le concepteur, intégrées dans le modèle produit et « compréhensibles » pour les métiers liés à la fabrication. Ce point de vue rejoint celui de l'équipe Conception Intégrée du laboratoire 3S de Grenoble qui a proposé un concept de « peau et squelette » pour élaborer un modèle multi-vues du produit [Tichkiewitch 1996], [Aoussat & al. /1 1998].

Conception pour l'assemblage (DFA)

La méthode Conception pour l'assemblage (DFA) a été introduite aux Etats-Unis et au Japon au début des années quatre-vingt avec l'apparition des approches de Boothroyd & Dewhurst et AEM-Hitachi [Boothroyd & al. 1983], [Boothroyd & al. 1992].

Une approche de G. Boothroyd et P. Dewhurst comporte trois étapes principales. Premièrement, il faut définir une méthode d'assemblage pour le produit considéré et choisir le type d'équipement afin de réaliser l'assemblage compte tenu du nombre de composants constituant le produit, le volume de production, etc. Ensuite, il est nécessaire d'évaluer l'assemblabilité des composants à partir d'abaques suivant des critères d'assemblage : l'alimentation, la manipulation des composants, le coût d'assemblage, etc. Finalement, si l'évaluation du produit du point de vue des contraintes d'assemblage remet en cause le produit donné, une re-conception du produit est nécessaire.

En effet, l'intérêt de cette méthode est de pouvoir apporter des améliorations au produit en simplifiant le processus d'assemblage, en diminuant le coût d'assemblage, etc. à partir des critères d'assemblabilité et des différentes règles qui peuvent être implémentées dans un outil logiciel d'aide à la conception, par exemple, un outil développé par Boothroyd Dewhurst Inc. [BDI 1995], [Aoussat & al./2 1998], [Legardeur 1998], [Blondaz 1999]. Les critères les plus importants sont le nombre de composants constituant le produit et le temps d'assemblage. Ainsi, la simplification du processus d'assemblage passe essentiellement par la diminution du nombre de composants et, en conséquence, la diminution du temps et du coût total d'assemblage. La problématique de l'A/D sera développée et analysée plus en détails dans la section suivante consacrée à l'état de l'art des méthodes de simulation du processus d'A/D.

1.1.3. Analyse et synthèse des méthodes de conception

En analysant les différentes méthodes de conception, on peut faire ressortir quelques éléments importants. Dans un contexte de compétitivité mondiale, le développement d'un produit repose désormais sur des aspects de Concurrent engineering. Dans ce contexte, le développement d'un produit n'est plus séquentiel, mais se base sur des aspects de conception parallèle prenant en compte différentes contraintes des métiers intervenant dans le cycle de vie du produit. Ce mode de conception

(simultanée, intégrée, etc.) nécessite la communication entre les acteurs de la conception représentant les différents métiers concernés. Cette coopération entre les acteurs permet, d'une part, de connaître, de comprendre et d'intégrer les différents points de vue des différents métiers, et d'autre part, de guider le processus de conception vers une meilleure solution, d'optimiser et de valider cette solution au lieu de faire des retours multiples lors de la conception en invalidant trop tard les choix faits ce qui entraîne l'augmentation du temps et des coûts de développement du produit.

Dans toutes les méthodes de conception, on identifie une première phase qui est une phase de définition des besoins ayant objectif d'établir un cahier des charges fonctionnel. Cette étape permet déjà de proposer des solutions possibles. La phase suivante consiste en une recherche de solutions répondant au cahier des charges. C'est lors de cette étape que la conception effective commence : le processus de développement débute par la conception globale (ou architecturale) et ensuite, se poursuit par la phase de la conception détaillée. L'évaluation et le choix des solutions se réalisent alors en ce basant sur des connaissances, des critères propres aux représentants des différents métiers. Il est nécessaire de faire travailler en parallèle les responsables du calcul, de la production, de la qualité etc. afin de pouvoir optimiser la conception du produit.

A l'issue de la conception proprement dite, les documents de conception sont finalement établis et comportent une information concernant la définition de chaque sous-ensemble et composant du produit conçu, la nomenclature et la description des performances du produit ainsi que les aspects technologiques. La constitution de ces documents est nécessaire pour la dernière étape de la conception du produit – la validation du produit – avant la phase de l'industrialisation effective (lancement) du produit. Cette étape de conception nécessite la construction d'un (des) prototype(s) reproductible(s) industriellement afin de valider le produit conçu du point de vue de la mécanique, la qualité, l'ergonomie, la maintenance, etc. Des problèmes rencontrés lors des tests de validation du produit entraînent des retours (qui sont parfois multiples) vers la conception du produit afin d'évaluer et d'utiliser d'autres solutions possibles. Ces retours se traduisent parfois par la difficulté de prendre en considération toutes les contraintes, parfois contradictoires, de la conception, de la fabrication, du marketing, etc., l'imprévisibilité des problèmes, l'impossibilité d'évaluer toutes les solutions semblant pertinentes sans réaliser un prototype physique à cause de l'inadéquation ou, tout simplement, l'absence d'outils d'aide à la conception et à la prise de décisions, etc.

Chaque dysfonctionnement identifié, chaque problème rencontré lors de la phase de validation, chaque retour vers la conception nécessitent la réalisation de prototypes physiques multiples, ce qui entraîne l'augmentation forte du temps et des coûts de développement du produit. Donc, de nouvelles méthodes pour la conception, pour la prise de décision, de nouveaux outils sont requis. Cette nécessité a fait émerger, par exemple, une méthode DFMA (Design For Manufacturing and Assembly) qui est une approche proposant de prendre en compte à la fois des procédés d'assemblage et de fabrication dès les premières phases de la conception, notamment, durant la phase de la conception architecturale lorsque les décisions relatives à l'assemblage et à la fabrication jouent un rôle important dans la suite de la conception détaillée. Ainsi, c'est à partir de ce moment qu'il faut penser au processus de fabrication, d'A/D, de maintenance car c'est là que les coûts de fabrication, d'assemblage sont engagés. En conséquence, ces coûts pourront être fortement réduits, le temps total de développement ainsi que celui de production du produit conçu et validé seront également diminués.

1.2. Méthodes de simulation du processus d'assemblage/désassemblage

1.2.1. Introduction

Cette section se focalise sur l'état de l'art concernant les méthodes d'aide à la conception et à la fabrication/assemblage qui font partie des méthodes de type DFMA, DFA, DFX et sont utilisées au cours de la conception simultanée/intégrée pour simplifier l'étude des processus d'A/D et de maintenance afin de les améliorer. Malgré l'apparition de méthodes DFA il y a une vingtaine d'années, des méthodes et des outils orientés vers le domaine de l'usinage ont surtout été développés. Cependant, l'activité d'A/D est une des étapes importantes de la fabrication : elle peut représenter jusqu'à 40% du coût de fabrication d'un produit manufacturé et environ 30% des investissements en

moyens de production pour les entreprises [Schepacz 1991], [Rejneri 2000]. Ces quelques chiffres montrent que les recherches dans ce domaine peuvent conduire à une source d'économie appréciable. De plus, il ne faut pas oublier que la prise en considération des problèmes liés au processus de suivi du produit, par exemple, la maintenance, au cours du développement du produit est également une source d'économies non-négligeable pour les industriels.

Dans un contexte de compétitivité mondiale, les industriels sont de plus en plus contraints par la modernisation des outils de développement afin d'accélérer la mise sur le marché de leurs produits dont la durée de vie devient de plus en plus courte. Les entreprises se focalisent maintenant sur l'optimisation du fameux trio « délais – coût – qualité » : amélioration continue de la productivité et de la qualité en diminuant les délais et les coûts de production et en pensant aux surcoûts apparaissant lors de la maintenance ou du recyclage du produit. Cette optimisation est devenue encore plus importante lorsque l'informatique est arrivée dans le monde industriel. Désormais, l'entreprise n'est plus limitée par les moyens techniques de base, mais dispose des outils permettant la représentation graphique du produit (la DAO, la simulation du comportement physique du produit et la création d'une maquette numérique sans fabriquer de nombreux prototypes physiques, etc.), la possibilité de stockage et de transfert d'informations, le développement à distance par Internet et même la simulation en RV.

Cependant, il existe peu d'outils performants dans le domaine de l'assemblage/maintenance, d'outils capables de produire les informations nécessaires de nature qualitative et quantitative au cours des différentes phases de la conception ainsi que du suivi du produit. Les approches existantes dans le domaine de la conception de produits sont essentiellement basées sur l'aspect d'automatisation du développement, d'où l'apparition d'outils automatisés d'aide à la prise de décision lors d'étude du processus d'A/D. Ceci semble très intéressant pour les entreprises, car l'automatisation importante de ce processus mène, selon les opinions des industriels, à des gains de qualité, de temps d'assemblage et donc, de productivité et de coût final du produit. Mais le passage vers l'automatisation totale du processus de conception et d'études des contraintes associées comme la fabrication, l'assemblage, la maintenance ou l'ergonomie est-il une solution unique et efficace vue la diversité des problèmes à aborder lors de ces études ? Quant à l'assemblage, par exemple, A. Aoussat remarque que la complexité et la diversité des opérations de montage est une des raisons majeures entraînant la difficulté et, parfois, l'impossibilité de développer des outils d'aide à la conception de type DFA/DFMA, qui ne reposent que sur des aspects de génération automatique des consignes pour la conception ou la re-conception [Aoussat & al./2 1998]. Dans ce cas, il est difficile de proposer et d'évaluer de nouvelles solutions alternatives.

Une autre question importante est l'objectif d'utilisation des outils de type DFA/DFMA : l'étude et la prise en compte des contraintes d'A/D et de maintenance pour le développement entraînant la re-conception du produit ou simplement, la génération de consignes pour « l'étude locale » d'un sous-ensemble qui ne perturbe pas la conception d'un nouveau produit. Cette question ouvre alors une discussion sur le problème suivant : à quel moment de la conception des outils DFA peuvent être réellement intégrés et utilisés (même s'il est clair que des problèmes d'A/D doivent être pris en considération assez tôt lors du développement du produit) ?

Quelques problèmes évoqués ci-dessus montrent, en effet, différentes pistes possibles concernant le développement des outils informatiques d'aide à la prise de décision pour la conception. Donc, nous allons structurer par la suite des outils informatiques existants dans le domaine de l'A/D afin de montrer des différents flux dans ce domaine ainsi que préciser notre place par rapport aux approches de simulation des opérations d'A/D qui seront présentées et analysées dans cette section.

1.2.2. Classification des méthodes de simulation d'A/D

Tout d'abord, il semble utile de préciser le terme « simulation d'une opération d'A/D ». En fait, du point de vue de la simplification des différents calculs associés aux opérations d'A/D, l'opération d'assemblage est souvent représentée dans les logiciels d'aide à la conception comme un ensemble d'actions appliquées à un composant et donc, comprend les phases suivantes [Allen 1987], [Aoussat & al./2 1998], [Rejneri 2000] :

- l'alimentation,
- la préhension,

- la manipulation,
- l'insertion/extraction,
- le lâcher.

De plus, les systèmes de simulation d'A/D comportent généralement un module permettant de générer des séquences d'A/D lorsqu'il s'agit de l'étude d'un mécanisme donné. Le processus de génération des séquences d'A/D est également subdivisé en plusieurs étapes particulières liées, notamment, à la nécessité de la représentation d'un produit sous forme géométrique (l'ensemble de volumes « fermés » en termes de CAO) et à la modélisation des contacts entre les composants constituant le produit donné. Des aspects du séquençement seront développés plus en détails lors de l'analyse des méthodes automatiques de simulation des opérations d'A/D.

Ainsi, une telle structuration d'une opération d'A/D, ou de « la simulation » d'une opération d'A/D, représente une base afin de définir des critères à utiliser lors du processus d'évaluation d'un produit du point de vue des contraintes d'A/D et/ou de maintenance. Finalement, la phase d'évaluation du produit par le système de simulation d'A/D génère différentes consignes pour le concepteur afin d'améliorer la qualité, l'assemblabilité ainsi que le coût du produit en question de manière globale (re-conception quasi totale du produit) ou locale, sélective (modifications locales possibles dans la structure du produit/composant ou simplement, dans le process de production, dans la planification des trajectoires d'A/D, etc.). Donc, les méthodes de simulation des opérations d'A/D peuvent être considérées comme :

- des méthodes d'aide à la conception DFA permettant de minimiser le nombre de composants, diminuer le nombre de directions d'assemblage, générer des séquences d'A/D, etc. et donc, entraînant la modification/adaptation du produit selon des règles de conception pour l'assemblage;
- des méthodes d'assistance DFA permettant de générer des séquences d'A/D, de prendre en considération certaines particularités de comportement des composants et d'étudier les trajectoires d'A/D de manière interactive, de choisir un matériel de montage, etc. Ainsi, ces méthodes, ne contribuant qu'au processus de développement/optimisation du produit, n'entraînent pas la re-conception du produit : les améliorations structurelles possibles ne modifient pas globalement le produit.

Selon des techniques existant dans le domaine de simulation d'A/D, on constate que les méthodes de type génération automatique ou semi-automatique des consignes pour le concepteur ou simplement, *méthodes automatiques* ou *semi-automatiques*, tendent vers des modifications importantes d'un produit et donc, entraînent la re-conception. Ces méthodes sont essentiellement basées sur des règles et des critères structurés pour la conception et donc, permettent d'évaluer un produit quantitativement.

Il existe également des techniques de simulation d'A/D basées sur l'intervention partielle ou totale d'un opérateur. Dans ce cas, il ne s'agit que de l'étude d'une seule phase de manipulation d'un composant à assembler/désassembler déplacé directement par l'opérateur (par exemple, une évaluation d'une trajectoire d'A/D du point de vue mécanique, géométrique, ergonomique, etc.), ou bien d'une évaluation partielle d'une (des) séquence(s)/manipulation(s) d'A/D réalisée par l'opérateur, soit une autre situation nécessitant l'intervention de l'utilisateur. Alors, ce type de simulations d'A/D est caractérisé par un niveau d'interactivité et d'analyse qualitative fort. Ce sont essentiellement des méthodes de type *interactives* (par exemple, en utilisant un système de RV ou un logiciel robotique de manipulation interactive) ainsi que *semi-automatiques* qui nécessitent l'intervention de l'utilisateur et donc, font partie des méthodes d'assistance n'entraînant pas, en conséquence, la re-conception d'un produit donné.

Ainsi, les méthodes de simulation d'A/D, qui seront présentées par la suite, sont classées de la manière suivante :

- méthodes automatiques de simulation d'A/D,
- méthodes semi-automatiques de simulation d'A/D,
- méthodes interactives de simulation d'A/D de type temps réel.

1.2.3. Méthodes automatiques

Les méthodes automatiques DFA de simulation des opérations d'A/D ont pour but de proposer au concepteur des améliorations d'un produit de façon automatique. Donc, le couplage du système de simulation d'A/D avec les outils de CAO est nécessaire pour extraire automatiquement des données géométriques requises par le système de simulation d'A/D directement à partir d'un modèle géométrique CAO d'un produit sur un stade donné de la conception. Une classification des méthodes automatiques courantes est proposée ci-dessous selon les différents types d'objectifs :

- minimiser le nombre de composants et diminuer le coût d'assemblage,
- évaluer l'assemblabilité du produit et produire une séquence d'assemblage à moindre coût,
- méthodes mixtes basées sur les deux aspects cités ci-dessus.

L'objectif de la première famille de méthodes DFA est une réduction du nombre de composants conduisant à leur standardisation. Ces méthodes sont essentiellement concentrées sur des règles de conception, d'assemblabilité, d'analyse de la géométrie des composants constituant le produit, le coût du processus d'assemblage, etc. [Aoussat & al./2 1998]. En effet, la complexité des systèmes d'assemblage et les temps d'assemblage sont à peu près proportionnels au nombre de composants du produit. Par conséquent, du point de vue de l'assemblage, la suppression d'un composant permet théoriquement [Rejneri 2000] :

- la réduction du temps et des coûts liés aux opérations de montage du composant,
- la réduction du nombre de moyens de montage et donc, la simplification des chaînes de montage,
- la réduction de la probabilité de défaillance lors du montage,
- l'amélioration de la qualité,
- la réduction des stocks,
- la simplification possible du produit.

A titre d'exemple, les sociétés telles que Hewlett Packard annoncent que la diminution de 20% du nombre des composants entraîne à la réduction de 40% des coûts de montage [Defaux 1989].

Quant aux aspects de séquencement, la détermination et l'évaluation des séquences d'assemblage repose globalement sur la subdivision de la simulation en quelques étapes chronologiques [O'Shea & al. 1998], [Zha & al. 1998], [Aoussat & al./2 1998], [Rejneri 2000] afin d'obtenir des séquences d'assemblage et de les évaluer automatiquement :

- la modélisation du produit,
- la détermination des mobilités des composants,
- la détermination des séquences d'assemblage,
- l'évaluation des séquences d'assemblage.

La modélisation d'une opération d'A/D débute, dans ce cas, par une phase de modélisation automatique du produit fini à partir d'un modèle CAO : le produit fini est alors considéré comme un graphe construit à partir des composants élémentaires constituant le produit donné (les sommets du graphe) et incluant des relations entre ces composants (les arêtes du graphe). Ce graphe constitue une donnée d'entrée imposée par les approches actuelles pour toute étude concernant l'obtention des séquences d'assemblage d'un produit et l'évaluation éventuelle de ces séquences. La détermination des mobilités des composants sert à la détermination des séquences d'assemblage. En effet, le calcul des séquences d'assemblage se réalise par l'inversion des séquences de désassemblage générées à partir du graphe du produit compte tenu des mobilités relatives des composants déterminées sans considérer des aspects particuliers, comme la prise en compte des déformations possibles d'un composant au cours d'une manipulation d'A/D ou l'évaluation des efforts nécessaires à développer afin de pouvoir effectuer une opération d'A/D donnée.

La phase d'évaluation des séquences d'assemblage termine le processus de simulation, ou bien elle est combinée avec la phase du calcul des séquences. L'évaluation des séquences se base sur divers critères :

- cinématique : les mobilités des composants et, en conséquence, les directions d'assemblage, etc.,
- géométrique : l'accessibilité, la planification des trajectoires d'A/D, l'absence de collisions entre le composant manipulé et un obstacle/environnement extérieur, etc.,
- technologique : la nature des contacts entre les composants et le comportement des composants (le serrage, la nécessité de déformation afin de monter/démonter une pièce particulière,...), la démontabilité, l'utilisation d'outils spéciaux de montage, les données de la nomenclature (la présence de pièces standardisées, leur désignation et matériaux,...), etc.,
- ergonomique : la manutentionabilité (la masse des composants, leur forme, etc.), la sécurité pour l'opérateur, la visibilité de l'opération d'A/D, les contraintes de maintenance, etc.

Un des problèmes commun à toutes les approches de génération des séquences d'A/D est l'explosion combinatoire des séquences compte tenu du nombre, généralement très élevé, de composants d'un produit. Afin de réduire les temps de calcul et l'explosion combinatoire, G. Dini propose une méthode basée sur les algorithmes génétiques ce qui permet de générer et d'évaluer les séquences d'assemblage simultanément [Dini & al. 1999]. L'évaluation des séquences générées est effectuée en utilisant une fonction qui prend en compte simultanément les contraintes géométriques, le nombre de changements d'orientation, le nombre de prises de pièces pour la préhension et la manipulation des composants, la possibilité de grouper des opérations d'assemblage similaires, etc.

N. Rejneri propose une méthode d'aide au choix des composants candidats à l'assemblage afin de ne propager que les séquences valides lors de la détermination et l'évaluation simultanées des séquences d'A/D [Rejneri 2000]. La particularité de cette approche est la prise en considération d'informations technologiques associées à la géométrie des composants du produit afin de réduire fortement la complexité algorithmique du problème. L'ensemble des informations géométriques et technologiques participe à la diminution du nombre de séquences par :

- la création d'associations de composants, ce qui permet de diminuer le nombre de composants à étudier et à manipuler pour la génération des séquences,
- la définition de critères d'évaluation et de rejet des composants, ce qui permet d'éliminer et de sélectionner rapidement les séquences inadaptées et de propager uniquement les séquences valides.

Les critères technologiques supplémentaires dans [Rejneri 2000] sont des informations attachées aux composants (la désignation technologique, le matériau, etc.) et aux contacts (les ajustements) du produit. De plus, un problème de prise en compte des déformations possibles des composants déformables (des anneaux élastiques et des ressorts) est également considéré dans cette approche. Ainsi, des critères cinématiques, géométriques et technologiques sont regroupés dans une fonction d'objectif qui évalue, élimine et sélectionne les composants candidats à l'assemblage afin de propager uniquement les séquences valides d'assemblage des points de vue géométrique et technologique simultanément.

Dans le cadre de la conception simultanée/intégrée, les consignes générées par le système automatique de simulation d'A/D entraînent la re-conception de l'architecture du produit et/ou de la géométrie de certains composants du produit, mais contribuent aussi à l'établissement d'un dialogue entre des différents acteurs du développement. En effet, certains changements proposés par le système informatique ne peuvent parfois être pris en compte que partiellement : un point de vue quantitatif/qualitatif d'un expert est souvent nécessaire afin de définir des changements effectivement constructifs dans l'architecture et dans la géométrie des composants du produit durant la re-conception.

Le haut niveau d'automatisation requis pour les processus d'évaluation et de séquençement des opérations d'A/D par les méthodes automatiques de simulation d'A/D nécessite la présentation géométrique CAO du produit fini. Donc, ce type de méthodes ne peut être utilisé que lors des étapes avancées de la conception. Cet effet limite l'utilisation de ces méthodes ne permettant la confrontation de points de vue des différents acteurs que durant les dernières étapes du processus de développement. Par conséquent, ceci peut entraîner, parfois, des retours importants et donc, des investissements non-

négligeables quant à la re-conception du produit si les échanges entre des métiers de conception et de fabrication/assemblage ne sont pas intervenus lors des premières phases de la conception.

1.2.4. Méthodes semi-automatiques

Les méthodes semi-automatiques de simulation des opérations d'A/D reposent, en général, sur les mêmes concepts d'évaluation et de séquençement que les méthodes automatiques abordées dans la section précédente. La principale différence entre ces deux types de méthodes est la possibilité d'intervention de l'utilisateur durant la simulation du processus d'A/D et donc, l'analyse semi-automatique d'une opération d'A/D donnée.

Dans le cas d'utilisation des méthodes semi-automatiques, l'utilisateur peut intervenir lors de la phase de :

- modélisation du produit,
- évaluation de l'assemblabilité, des séquences d'A/D proposées, etc.

La modélisation du produit, correspondant à une étape de la génération d'un graphe comportant des composants élémentaires et des relations entre eux, peut être effectuée partiellement par le concepteur. Par exemple, certaines relations entre les composants, souhaitables du point de vue de l'assemblage, peuvent être établies ou précisées de manière manuelle afin de « guider » le processus de génération des séquences d'A/D en diminuant le temps de calcul des séquences, en assurant l'évaluation la plus appropriée. La nécessité de décrire des relations particulières consiste à définir les surfaces souhaitables d'assemblage, les directions d'assemblage privilégiées, les relations spécifiques entre les composants élémentaires qui sont liés par des liaisons particulières, comme le serrage et la soudure, ce qui signifie l'impossibilité de générer le processus d'assemblage par l'inversement direct simple du graphe, etc.

Théoriquement, l'établissement du graphe ne nécessite pas, dans le cas d'un système semi-automatique, la création obligatoire d'un modèle CAO du produit : l'utilisateur peut spécifier lui-même les composants de ce graphe. Ceci est parfois nécessaire dans le cas d'un problème de transfert de données et de représentation spécifique requise du produit pour être utilisable dans un système donné de simulation d'A/D.

En ce qui concerne la phase de l'évaluation (l'assemblabilité du produit, les séquences d'A/D, etc.), cette étape est généralement basée sur de nombreux critères géométriques, technologiques, ergonomiques qui peuvent être couplés avec des systèmes experts ou des bases de connaissances (par exemple, le système Lucas décrit dans [Rejneri 2000]). Le système Lucas propose une série de questions, dont la nature varie selon les réponses données au fur et à mesure par l'utilisateur. Ainsi, les composants sont classés en deux catégories, suivant qu'ils sont essentiels ou non. L'efficacité de la conception est simplement la proportion des composants essentiels dans l'assemblage. Le système permet aussi l'analyse de coût des composants pour différents procédés de fabrication : moulage, forgeage, frittage, usinage, etc. Les étapes ultérieures de la simulation consistent en l'évaluation des différents problèmes relatifs à la manipulation, l'insertion et la fixation des composants, etc.

Le caractère interactif des approches semi-automatiques permet également d'éviter des problèmes de blocage du système de simulation d'A/D, de réduire le temps de calcul, etc. lorsque le système n'est pas capable de produire un résultat, par exemple, lors de la phase d'évaluation des séquences d'A/D à cause de paramètres bloquants, d'un problème de multiplicité des solutions, de la difficulté ou l'impossibilité de trouver une trajectoire d'A/D même si elle existe, etc. Par exemple, la difficulté d'évaluation d'une opération d'assemblage, provoquée par la prise en compte simultanée de contraintes contradictoires, de règles de conception pour la fabrication/assemblage dont le nombre est souvent très élevé, mène à la nécessité de faire appel à l'aide du concepteur pour décrire les contraintes de manière qualitative et faire un choix en se basant sur des règles/consignes plus pertinents.

1.2.5. Méthodes interactives de type temps réel

La présente section a pour le but de présenter quelques méthodes interactives de simulation des opérations d'A/D de type temps réel. L'intérêt principal d'utilisation des méthodes de simulation temps réel est la visualisation des résultats du processus de simulation qui sont souvent « masqués »

lorsque les méthodes automatiques/semi-automatiques sont utilisées. Ainsi, l'analyse d'une opération d'A/D et/ou de maintenance sera réalisée de façon qualitative.

En effet, il existe différentes méthodes de type temps réel parmi lesquelles trois grandes familles ont été distinguées :

- la visualisation uniquement des déplacements d'un composant en temps réel sans le manipuler pour l'étude d'une phase d'extraction,
- la manipulation d'un composant en temps réel pour une étude d'assemblage robotisé,
- la manipulation d'un composant en temps réel dans un environnement de RV pour l'étude des opérations d'A/D et/ou de maintenance.

Ainsi, les méthodes de type temps réel interviennent surtout lorsqu'il est nécessaire d'évaluer interactivement une opération d'A/D. Cette évaluation se réalise afin d'étudier/optimiser :

- des séquences d'A/D pour le problème de séquencement lors des dernières phases de conception et de la re-conception d'un produit,
- une opération d'A/D ou de maintenance donnée lors de :
 - l'étude/optimisation locale pour un séquencement pré-défini,
 - la phase de conception architecturale d'un nouveau produit,
 - l'étude d'une opération de maintenance d'un nouveau produit ou d'un produit existant, la prise en compte de contraintes ergonomiques pour une opération donnée, etc.

L'environnement de simulation des opérations d'A/D peut inclure un module de calcul des séquences d'A/D. Dans ce cas, les déplacements d'un composant à assembler/désassembler se produisent soit de façon automatique avec la visualisation du résultat de calcul de la séquence d'A/D et de recherche de la trajectoire d'assemblage par des approches probabilistes [Kavraki & al. 1996], [Hsu & al. 1999], par exemple, soit de façon interactive avec la manipulation et la visualisation des déplacements de la pièce en temps réel. Alors, le modèle géométrique d'un produit fini sera requis pour une telle étude.

Lorsqu'il s'agit de l'étude, l'évaluation, l'optimisation d'une opération donnée d'A/D ou de maintenance, les séquences d'A/D sont habituellement pré-établies durant une étape de calcul (s'il s'agit d'un nouveau produit, par exemple) : le module de calcul des séquences d'A/D peut être externe dans ce cas. Donc, l'étude et l'évaluation d'une opération donnée s'effectue lors des phases interactives de préhension, de déplacement, de lâcher du composant en question. Ces manipulations se produisent essentiellement à l'aide d'environnements de RV ou de robotique.

De façon générale, les méthodes interactives ont un rôle d'assistance et n'entraînent pas de re-conception significative du produit. Les modifications possibles sont essentiellement la re-conception d'une pièce manipulée et les éléments du mécanisme qui seront connectés à cette pièce, le changement des séquences d'A/D, la précision de la nature de l'opération (manuelle, robotisée), le choix d'outillage nécessaire pour l'opération, etc. Les modifications/choix nécessaires peuvent se faire avec la participation des acteurs du processus de développement du produit pour prendre en considération les différents points de vue des métiers concernés (le concepteur, le technologue, le monteur, l'agent du service de maintenance, l'ergonome, etc.).

Les travaux de cette thèse contribuent au développement des outils logiciels pour la simulation et l'étude des opérations d'A/D et de maintenance dans un environnement de RV. Donc, certains aspects de l'assemblage virtuel seront plus particulièrement décrits par la suite.

Généralement, toute modélisation dans un environnement de RV se base sur deux éléments principaux :

- représentation d'une scène virtuelle où un objet en question évolue,
- modélisation du comportement d'un objet virtuel lors de sa manipulation interactive.

En ce qui concerne la simulation des opérations d'A/D et de maintenance virtuelles, une scène virtuelle (ou un environnement extérieur) à un composant à manipuler est représentée par un modèle géométrique d'un produit donné, par exemple, un mécanisme. Donc, un transfert des données issues

d'un modèleur géométrique CAO vers un environnement de RV, exprimé par le transfert du modèle CAO avec/sans la préparation éventuelle des données, est nécessaire. Le problème d'intégration des données issues de la CAO dans un environnement de RV sera discuté dans les chapitres suivants.

La modélisation du comportement d'un objet virtuel comprend deux aspects importants durant la phase de manipulation dans un environnement de RV :

- la génération des déplacements d'un objet virtuel lorsque cet objet ne change pas de forme (objet rigide),
- la prise en compte des déformations possibles de la forme géométrique d'un objet déformable.

Actuellement, il existe des environnements de RV et de robotique permettant la manipulation en ligne d'un objet virtuel rigide. Ces outils sont souvent utilisés pour l'étude d'opérations d'A/D manuelles ou par un robot lors de la phase de génération des trajectoires d'assemblage. Dans ces environnements, les trajectoires d'A/D représentent des déplacements successifs de l'objet virtuel manipulé suivant les degrés de liberté (DDL) associés à l'objet en question. Le nombre de DDL du composant à manipuler dans un environnement virtuel 3D, ou le nombre de paramètres minimum qui spécifient complètement la position de ce composant, est égal à six : trois coordonnées spatiales et trois angles définissant l'orientation du composant. Parfois, le nombre de DDL est limité à trois positions afin de diminuer le temps de calcul de la trajectoire si l'environnement extérieur de la pièce à manipuler n'est pas très contraint pour la génération interactive de déplacements (absence de zones étroites,...).

La plupart des logiciels de simulation d'A/D virtuel permet la recherche de trajectoires hors collisions : le déplacement d'un objet virtuel rigide, généralement long et délicat, est réalisé par l'opérateur grâce à sa faculté de vision globale avec l'aide de fonctions de détection de collision [Chedmail & al. 1998]. La manipulation d'un objet virtuel s'effectue via des interfaces spécifiques de RV avec/sans retour d'information en termes d'efforts/déplacements produits. Dans le cas de l'utilisation de dispositifs à retour d'efforts, par exemple, l'opérateur effectuant une manipulation d'assemblage pourra « sentir » les efforts développés et donc, intuitivement corriger une trajectoire afin de diminuer des efforts à appliquer ou générer une trajectoire sans collision. La présentation des périphériques courants en RV est faite au chapitre 2.

La prise en considération des déformations d'un composant virtuel à assembler est importante lorsqu'il s'agit de modéliser correctement le comportement physique de ce composant. Cette modélisation est nécessaire afin de générer et visualiser des changements importants de la forme géométrique de la pièce soumise à des :

- grands déplacements sous une charge donnée,
- grandes déformations sous une charge donnée,
- déformations provoquées par un changement important de température, etc.

Il est clair que la représentation correcte du comportement des objets virtuels nécessite la modélisation du comportement de ces objets et donc, l'utilisation de différents modèles (mécaniques, thermiques, etc.) afin de produire les changements de forme adéquats des objets. Alors, l'aspect d'intégration des modèles de comportement des pièces en question dans des environnements de RV est important dans ce cas.

Dans le contexte de l'assemblage, des outils de simulation d'opérations A/D, entraînant l'intégration des modèles physiques, commencent à apparaître sur le marché. Citons, par exemple, un outil de simulation de l'assemblage virtuel par soudage SYSWELD développé par la société ESI Group [ESI Group 2003] pour la conception simultanée/intégrée. Cet outil, assistant du métier d'assemblage, permet aux concepteurs et techniciens de réduire les délais de mise en oeuvre de simulation et d'analyse des pièces et procédés de fabrication. Cette approche a pour l'objectif de simuler les déformations de la structure provoquées par les effets du soudage sur des assemblages. Donc, un modèle thermomécanique est utilisé afin de générer une simulation plus réaliste. En conséquence, la simulation d'assemblage rend possible l'analyse de l'influence des séquences de soudage et des conditions de bridage, permettant ainsi de déterminer les conditions optimales du procédé aboutissant aux déformations minimales.

En ce qui concerne la simulation d'A/D virtuel de composants qui sont susceptibles de produire des changements importants de forme – les pièces flexibles – lors de la manipulation dans un

environnement de RV, cette catégorie de simulations nécessite également l'utilisation de modèles particuliers, par exemple, des modèles mécaniques non-linéaires. Ceci permettra de tenir compte du comportement complexe de ces pièces et donc, de générer correctement des informations associées à leur manipulation.

Malheureusement, les approches courantes dans le domaine de simulation des opérations d'A/D et de maintenance sont essentiellement basées sur les modèles de pièces rigides. Donc, un composant à assembler (rigide, déformable) est généralement représenté comme un composant rigide ayant une seule forme invariante lors de la manipulation virtuelle. Ceci permet de diminuer fortement le temps de calcul durant la manipulation virtuelle qui comprend différentes phases successives :

- fournir une information en entrée selon le dispositif de RV utilisé : efforts imposés, déplacements et angles imposés,
- générer un mouvement d'un objet virtuel : ce mouvement est lié au mouvement de la main virtuelle, tenant cet objet, et correspond à une partie de la trajectoire d'A/D,
- vérifier si l'objet virtuel est libre de collisions avec son environnement extérieur,
- visualiser et, éventuellement, transmettre d'autres informations en sortie : géométrie de la pièce manipulée, efforts appliqués, etc.

Lors qu'il s'agit de la simulation d'une opération d'A/D d'un objet virtuel à caractère déformable, l'utilisation de modèles de pièces de type « pièces rigides » n'est plus appropriée. En effet, afin de tenir compte des déformations possibles d'un tel objet lors d'une opération d'A/D virtuel, il est nécessaire de faire appel aux modèles plus complexes permettant de générer en temps réel une information réaliste associée à la pièce déformable manipulée. Cette information de nature géométrique, mécanique, etc. comprend notamment :

- la géométrie déformée de la pièce sous les déplacements/efforts imposés par l'opérateur,
- les efforts à développer par l'opérateur qui impose à une pièce flexible virtuelle les déplacements et l'orientation souhaitables,
- l'état de contraintes dans la pièce déformée.

Ainsi, les modèles physiques à employer afin de produire ces données peuvent être de nature mécanique non-linéaire, afin de prendre en considération le fait que les pièces flexibles peuvent « travailler » dans le domaine des grands déplacements, par exemple. Les contraintes principales, quant à l'utilisation de ces modèles, sont :

- la génération d'informations (géométrique, mécanique, etc.) réalistes,
- le temps de calcul.

En effet, à l'issue de la simulation du comportement d'une pièce à caractère flexible, basée sur un modèle mécanique, les données requises pour la modélisation d'une opération d'A/D doivent être correctes, réalistes. Ceci est important car la vérification d'absence de collisions entre un composant flexible manipulé et déformé et l'environnement extérieur lors de la recherche d'une trajectoire d'A/D nécessite le calcul d'interférences réalistes entre le composant et son environnement. Les interférences réalistes ne peuvent être identifiées que lorsque la déformation du composant flexible est correctement modélisée et donc, la forme déformée du composant est réaliste. Les modèles mécaniques à utiliser pour la simulation correcte du comportement de pièces flexibles doivent être également assez « rapides » car il est indispensable d'assurer la fluidité des mouvements de la pièce manipulée lors de la simulation d'une opération d'A/D donnée. Les principaux modèles pour la simulation rapide du comportement d'objets déformables seront présentés au chapitre 2.

1.2.6. Analyse des méthodes de simulation d'A/D

L'objectif principal de la conception simultanée/intégrée est d'organiser le processus de conception de façon parallèle et de prendre en compte tous les points de vue des acteurs concernés des différents métiers intervenant dans le cycle de vie d'un produit – le bureau d'études et le calcul, l'usinage et l'assemblage, la maintenance et l'ergonomie – en les faisant dialoguer, interagir, coopérer. Dans cette section, certaines contraintes des métiers d'assemblage et de maintenance ont été

abordées. La nécessité de prise en compte de ces contraintes lors de la conception du produit a fait naître de différentes méthodes, orientées vers l'A/D, la maintenance, l'ergonomie et présentées dans cette section. Résumons les principaux points abordés dans cette section et comparons de façon synthétique les méthodes de simulation des opérations d'A/D présentées.

Différents outils d'aide à la conception et la re-conception ont été élaborés afin d'intégrer les phases d'étude de la fabricabilité, l'assemblabilité, la maintenance, l'ergonomie d'un produit au plus tôt dans le processus de conception. Notamment, l'apparition des outils CAO a contribué au développement progressif des approches automatiques de simulation des opérations d'A/D. Ceci a augmenté significativement le niveau d'automatisation du processus de développement du produit : la conception en tant que telle, mais aussi des différentes phases intégrées désormais dans le processus de conception – la génération des gammes d'usinage, le séquençement et la planification des trajectoires pour l'A/D, l'évaluation des séquences d'A/D, le choix des moyens de production, etc. Les transferts de données CAO, la simulation semi-automatique des opérations d'usinage, d'A/D, le calcul et l'évaluation automatiques des séquences d'A/D, etc. simplifient la prise de décision, réduisent fortement les délais et les coûts de développement d'un produit mécanique. La possibilité de simulation rapide de telle ou telle opération, l'intervention des acteurs des différents métiers permettent de coopérer pleinement au cours du développement du produit, facilitent le travail de conception, favorisent les échanges entre les acteurs afin de prendre en considération les contraintes de conception, de fabrication, d'assemblage, de maintenance, etc. dès les premières phases de la conception.

Toutefois, malgré la large utilisation des outils de CAO, la visualisation simple d'une pièce ou d'un mécanisme présentés par un modèle géométrique (surfacique, volumique), la génération d'une gamme d'usinage ou le calcul des séquences d'A/D basés sur les méthodes automatiques et, en conséquence, ne rendant pas transparent le processus de simulation ou d'évaluation, ne permettent pas pleinement considérer, évaluer, optimiser certains aspects. Notamment, dans le domaine d'A/D et de maintenance, la recherche de la trajectoire d'A/D, l'étude de l'accessibilité, la prise en compte d'un comportement physique des pièces flexibles, l'évaluation et la sensation des efforts nécessaires à développer lors de la manipulation et le montage/démontage d'un composant, etc. sont aussi importantes que le calcul des séquences d'A/D car cela permet d'évaluer et d'optimiser au mieux non seulement le processus d'A/D, mais aussi d'améliorer, d'optimiser la structure du produit développé ainsi que des fonctions des métiers de service accompagnant le produit donné après sa vente (la maintenance, en particulier). Ainsi, ces besoins industriels ont poussé à développer des outils qui vont plus loin dans la modélisation de la réalité. En effet, il est important non seulement de représenter un objet en 3D ou un résultat du calcul, mais aussi de pouvoir visualiser le processus d'évaluation d'un événement (par exemple, le processus de recherche de trajectoires d'A/D), de manipuler des objets, leurs associer des sensations dans un environnement entièrement virtuel. Ces besoins ont donc fait émerger de nouvelles approches de type simulation en temps réel.

Actuellement, certaines opinions indiquent que telle simulation virtuelle peut remplacer entièrement les méthodes automatiques ou semi-automatiques de simulation des opérations d'A/D. En fait, la question principale d'utilisation des différentes méthodes élaborées pour l'étude, l'optimisation des processus d'A/D, de maintenance, etc. est l'objectif de cette étude, la possibilité d'extraction des paramètres influant sur le développement, l'optimisation d'un produit mécanique, son amélioration du point de vue de la production, l'usage, la maintenance. Pour le montrer, notons des principaux points forts et faibles des méthodes de simulation d'A/D automatique/semi-automatique et virtuel, synthétisés dans le Tableau 1.1.

	Méthodes (semi-) automatiques	Méthodes de type temps réel
Objectifs de simulation	Détermination des séquences d'A/D et évaluation éventuelle	Évaluation d'une (des) séquence(s) d'A/D et/ou d'une opération donnée d'A/D ou de maintenance
Type du produit à étudier	Nouveau produit, essentiellement	Nouveau produit et produit existant
Phases de développement	Conception détaillée, étude de la fabricabilité et de l'assemblabilité, séquençement d'A/D, re-conception	Conception architecturale/détaillée, étude de l'assemblabilité, de l'accessibilité et de la maintenance, planification de trajectoires d'A/D, re-conception
Niveau de représentation du produit pour la simulation	Description détaillée du produit fini (la forme du produit reste inchangée au cours de la simulation), modèle CAO du produit sans défaut de représentation	Environnement extérieur d'une pièce à manipuler, pièce à manipuler elle-même (les formes de l'environnement et de la pièce peuvent être modifiées au cours de la manipulation)
Contrainte de temps de simulation	Le temps de simulation n'est pas une contrainte (il est cependant souhaitable de diminuer le temps de calcul)	Le temps de simulation est une contrainte essentielle

Tableau 1.1. Comparaison des méthodes de simulation des opérations d'A/D et de maintenance.

Objectifs de simulation des opérations d'A/D et de maintenance :

Le but de la simulation des opérations d'A/D basée sur les méthodes automatiques et semi-automatiques est de pouvoir déterminer des séquences d'A/D et, éventuellement, les évaluer afin de choisir une séquence optimale compte tenu des critères technologiques, géométriques, cinématiques, etc. Donc, l'analyse d'un produit à étudier a un caractère quantitatif : la simulation des opérations d'A/D se traduit par la sélection, le rejet, l'évaluation des séquences à partir des critères fixés par le concepteur (la minimisation du nombre de composants, la diminution des directions d'assemblage, la recherche des trajectoires d'A/D, la réduction du coût d'assemblage, etc.). Il est possible pour l'utilisateur d'intervenir dans le processus de simulation si le logiciel est incapable de choisir une séquence ou si une solution fournie semble difficilement réalisable vis-à-vis de critères subjectifs du concepteur, du technologue ou d'autres acteurs possédant les connaissances et les compétences nécessaires. Il est important de noter qu'il est difficile de mettre en place des critères concernant une étude des opérations de maintenance entraînant un changement de composant(s) et donc, nécessitant soit une seule opération de démontage, soit plusieurs opérations qui ne suivent pas l'ordre de désassemblage établi à partir de règles générales par une méthode automatique.

Les méthodes interactives de type temps réel ont pour un objectif d'assistance au cours de l'évaluation d'une ou des séquences d'A/D établies précédemment par une des méthodes automatiques de génération des séquences d'A/D, par exemple, la réalisation d'une étude complémentaire et approfondie d'une opération d'A/D ou de maintenance en observant, en manipulant, en contrôlant le processus de simulation en temps réel, l'évaluation multicritère basée sur la vision globale de l'utilisateur ainsi que les connaissances et les compétences des concepteurs présents lors de la simulation. Ainsi, l'analyse d'un produit en question et l'évaluation des opérations d'A/D et de maintenance ont un caractère :

- qualitatif : la possibilité de développer et de sentir des efforts lors d'une manipulation virtuelle, la détection des obstacles et leur perception en temps réel, etc.,
- quantitatif : la possibilité de manipuler directement un composant, d'observer et de contrôler les contacts avec des obstacles lors de la recherche d'une trajectoire d'A/D, la possibilité de contrôler les valeurs des efforts appliqués ainsi que des différentes contraintes de conception

en temps réel, la visualisation des modifications possibles de la forme du composant manipulé, l'obtention d'une information plus claire pour évaluer l'accessibilité, etc.

Ainsi, la procédure de simulation n'est plus masquée, elle s'effectue directement par l'opérateur en temps réel et devient lisible pour un être humain. Ceci permet aux concepteurs de comprendre rapidement et plus clairement un phénomène, un problème ce qui est indispensable à l'optimisation et à la re-conception du produit.

Type du produit à étudier :

Les méthodes automatiques sont essentiellement utilisées pour l'étude d'un nouveau produit mécanique au cours du développement. L'analyse d'un nouveau produit s'effectue de façon globale et intégrale du point de vue des différentes règles de DFA/DFMA ainsi que des critères spécifiques fixés par le concepteur afin d'établir une nouvelle séquence d'A/D qui sera une séquence générale et définitive à l'issue de la re-conception si nécessaire.

Quant à l'étude d'une opération d'A/D ou de maintenance dans un environnement de RV, l'analyse de ces opérations peut être effectuée pour :

- un nouveau produit : l'étude plus approfondie mais de manière locale d'une opération donnée par rapport aux méthodes automatiques, la prise en compte de phénomènes qui ne peuvent pas être pris en compte par les méthodes automatiques, etc.,
- un produit déjà existant : l'étude d'une opération d'A/D pour la maintenance du produit lorsque l'utilisation des méthodes automatiques n'est plus pertinente car les règles générales à respecter ne sont plus applicables de manière automatique à une configuration de démontage particulière, si nécessaire, afin d'accéder à un composant à changer, l'apprentissage du personnel (agents du service de maintenance, en particulier) pour assurer une opération de maintenance de façon optimale, rapide, ainsi que pour éviter un endommagement d'autres pièces du produit ou un danger possible pour un être humain, etc.

Phases de développement du produit dans lesquelles la simulation d'A/D et de maintenance peut intervenir :

Les méthodes automatiques de simulation des opérations d'A/D interviennent, en général, lors de la phase de la conception détaillée car l'étude de la fabricabilité et l'assemblabilité, la génération automatique des séquences d'A/D avec leur évaluation éventuelle automatique et/ou semi-automatique, le choix des modes et des moyens de production, etc. nécessitent la description détaillée d'un produit fini ou d'un des sous-assembles finis du produit à étudier. Cette description se traduit par la création d'un modèle géométrique CAO du produit avec tous les composants afin de pouvoir établir un graphe de décomposition du produit et donc, générer/évaluer des séquences d'A/D, par exemple. En fonction des objectifs d'étude d'un produit donné, des consignes éventuellement produites par un outil logiciel d'aide à l'étude de l'assemblabilité peuvent entraîner une re-conception du produit avec des modifications importantes.

En ce qui concerne les simulations des opérations d'A/D dans un environnement de RV, ces études peuvent être menées tant lors de la conception architecturale que détaillée. En effet, l'étude d'une opération d'A/D d'un composant donné ne nécessite pas, en principe, la description détaillée du produit. Alors, une manipulation d'un composant virtuel peut être effectuée à partir de la représentation non-détaillée, non-complète ou même simplifiée de l'environnement extérieur du composant à manipuler car il s'agit d'effectuer/évaluer une opération précise d'A/D d'une seule pièce. De même, si un produit à développer se base sur un produit existant avec des modifications de relations entre des sous-assembles du produit qui peuvent être représentés en tant que blocs (l'assemblage par blocs des sous-ensembles, par exemple), ces relations ou, simplement, les connexions sont facilement étudiées dans un environnement de RV en s'appuyant sur des modèles géométriques CAO du produit déjà existant sans le re-calcul d'un graphe de décomposition et donc, sans la détermination des séquences d'A/D et leur évaluation (sous l'hypothèse que les modifications de relations/connexions ne sont pas importantes).

De plus, l'étude des opérations de maintenance avec un démontage particulier d'un certain nombre de composants du produit (afin d'accéder à une pièce à changer, par exemple) ainsi que la planification de trajectoires d'A/D qui sont différentes lors du processus de montage, de démontage (complet ou partiel, en cas de besoin) ou d'une opération de maintenance sont également possibles dans un environnement de RV lors des phases de conception architecturale, détaillée d'un nouveau produit ou des études/ optimisation d'une opération particulière de maintenance d'un produit déjà existant. Il faut également remarquer le fait que toutes ces études dans un environnement de RV ont un caractère local, à savoir une manipulation d'un seul composant donné pour une opération précise, en comparaison du processus de génération des séquences d'A/D et de leur évaluation par les méthodes automatiques. Ainsi, les modifications/améliorations éventuelles qui peuvent être apportées à un produit à l'issue d'une étude dans un environnement de RV ont également un caractère local quant à la re-conception possible du produit.

Niveau de représentation géométrique du produit pour la simulation d'A/D :

Comme il a été remarqué précédemment, les méthodes automatiques et la plupart des méthodes semi-automatiques de simulation des opérations d'A/D nécessitent la description détaillée d'un produit fini afin de générer des séquences d'A/D. Cette description ou, autrement dit, le modèle de CAO ne doit pas comporter de défauts de modélisation géométrique : problèmes de connexion des surfaces, superpositions et intersections de surfaces, volumes ouverts, surfaces mal orientées, etc. Un modèle géométrique avec des défauts de construction ne permet pas de déterminer correctement les mobilités des composants constituant le produit donné. Par ailleurs, au cours du calcul des séquences d'A/D ainsi que leur évaluation, la forme de tous les composants du produit reste inchangée afin de ne pas perturber le processus de calcul automatique.

Quant à la simulation des opérations d'A/D virtuel, lors d'une manipulation virtuelle précise, il s'agit de l'étude d'une opération pour un composant donné dans son environnement. Par ailleurs, cet environnement doit être défini s'il n'existe pas sous forme numérique. Ainsi, des données concernant l'environnement virtuel et la pièce à manipuler elle-même sont distinguées car, dans le cas général, elles sont de nature différente : les pièces rigides, flexibles, ainsi que l'évaluation relative de la géométrie d'une pièce à manipuler par rapport à son environnement extérieur. Donc, l'environnement de la pièce en question reste statique, il est « figé » dans la plupart des cas. Par contre, la pièce à manipuler « évolue » dans son environnement : elle change de position et d'orientation, éventuellement, de forme compte tenu de son comportement flexible, par exemple, etc.

Une autre remarque importante est la possibilité de modifier directement la géométrie et les propriétés physiques d'une pièce manipulée lorsque l'étude d'une opération d'A/D ou de maintenance se réalise dans un environnement de RV. En effet, au cours de la simulation d'une opération d'A/D, par exemple, il arrive de proposer différentes modifications (constructives, géométriques, matériaux, ...) du point de vue de la conception, de l'assemblage, de la maintenance, etc. concernant une pièce donnée à étudier. Alors, il est plus facile de modifier la géométrie ou d'autres caractéristiques de la pièce en question directement dans un environnement de RV, si l'on effectue un nombre réduit de simulations d'assemblage virtuel, par exemple, que de refaire le calcul complet des toutes les séquences d'A/D en utilisant une méthode automatique ou en attendant la définition géométrique complète d'un sous-ensemble ou même du produit fini afin de pouvoir démarrer les calculs automatiques associés s'il s'agit de la conception architecturale. De même, les modifications locales possibles de l'environnement extérieur dans une zone de connexion de pièce manipulée avec son environnement (un mécanisme donné) n'entraînent pas une re-analyse complète par les méthodes à caractère automatique. Dans ce cas, il semble possible d'apporter des modifications directement dans le modèle, c'est-à-dire sans le retour complet aux données du modèle de base et donc, sans la régénération d'un modèle adapté à la simulation virtuelle. Ainsi, la forme de l'environnement de la pièce peut également évaluer de manière locale au cours de la simulation virtuelle. Des problèmes de transfert de données entre un modéleur géométrique industriel CAO et un environnement de RV seront discutés ultérieurement.

Contrainte de temps de simulation d'A/D :

Généralement, il est toujours souhaitable de diminuer le temps de calcul des simulations numériques quelque soit la méthode (automatique, la RV, etc.). Néanmoins, le temps de simulation est une contrainte essentielle pour les méthodes de type RV comparativement aux méthodes automatiques/semi-automatiques car lors de la simulation dans un environnement de RV, il est nécessaire de manipuler un objet virtuel en temps réel. Donc, de différents modèles de simulation à intégrer dans un environnement de RV sont soumis à une contrainte forte de production d'information en temps réel, en particulier, la génération des mouvements d'un objet virtuel, la vérification des interférences entre un objet et son environnement, la génération rapide de la forme déformée d'une pièce flexible, etc. Le problème de simulation rapide pour la modélisation des opérations d'A/D et de maintenance virtuels, notamment, la simulation rapide du comportement réaliste de pièces flexibles, est un élément important qui va être présent tout au long des discussions ultérieures dans ce mémoire.

De façon générale, les méthodes automatiques/semi-automatiques orientées DFA/DFMA ont pour but de considérer, d'étudier, d'améliorer un produit de manière globale en se basant sur de nombreux critères technologiques, géométriques, cinématiques, etc. En conséquence, les consignes générées par ces outils peuvent entraîner une re-conception importante du produit. Le couplage de ces outils avec des logiciels de CAO facilite le traitement de données, augmente le degré d'automatisation de l'étude du produit du point de vue de la fabrication, l'assemblage, diminue le temps de simulation des opérations d'A/D, etc. Cependant, le processus de calcul automatique des séquences d'A/D et leur évaluation, la génération de trajectoires d'A/D, etc. sont souvent masqués, ce qui ne permet pas, malgré l'utilisation éventuelle des bases de connaissances, d'évaluer les opérations d'A/D de façon qualitative ainsi que d'identifier des causes des difficultés d'assemblage du produit. Par ailleurs, la génération et l'évaluation des séquences d'A/D par les méthodes automatiques nécessitent une description détaillée du produit fini sous l'hypothèse que tous les composants du produit sont rigides. Ainsi, ces méthodes ne peuvent être utilisées que durant les dernières phases de la conception.

Une solution possible est une élaboration d'outils pour différentes phases de conception afin de guider le concepteur dans une recherche de solutions constructives appropriées du point de vue de la fabrication, l'assemblage, la maintenance, l'ergonomie, le recyclage. Par ailleurs, l'utilisation de ces outils d'aide à la conception de façon à prendre en considération de nombreuses contraintes multi-métiers dès les premières phases de la conception s'inscrit dans la démarche de conception simultanée/intégrée. Dans ce contexte, l'approche proposée par Bassler et décrite dans [Aoussat & al./2 1998] introduit des fonctions d'actions créatives et correctives pour les différentes phases de la conception, concernant la conception pour l'assemblage.

La démarche proposée dans ce mémoire se base sur les méthodes de temps réel : l'étude et la caractérisation du processus d'A/D et de maintenance dans un environnement de RV. L'étude des opérations d'A/D en RV a un caractère plus local par rapport aux méthodes automatiques, mais plus approfondi, en prenant en compte des critères qui sont difficilement intégrables dans les méthodes automatiques. En effet, l'utilisation de la RV permet d'évaluer une opération donnée de façon quantitative mais aussi qualitative et présente des avantages particuliers : l'étude des opérations de maintenance avec un démontage particulier partiel, la prise en compte des différents modes de saisie et la présence de l'opérateur, la planification de trajectoires d'A/D dans les zones délicates, la considération du comportement de pièces flexibles, le contrôle visuel, sensoriel, etc. Et tout cela en temps réel ! Par ailleurs, il est également possible d'étudier une opération donnée du point de vue de contraintes multi-métiers : la conception mécanique, l'assemblage, la maintenance, l'ergonomie, etc., ce qui est important dans le contexte de la conception simultanée/intégrée. Tous ces aspects d'assemblage virtuel, d'avantages de la RV, mais aussi de problèmes possibles vont être développés plus en détails par la suite.

1.3. Intérêt de la réalité virtuelle dans la simulation des opérations d’A/D et de maintenance

1.3.1. Introduction

L’émergence des outils de CAO, arrivés au sein des grandes entreprises de haute technologie (Aérospatiale, Renault, BMW,...) dans les années soixante-dix, a permis d’automatiser la création de dessins, d’effectuer les échanges d’information à caractère conceptuel, de piloter des machines-outils à commande numérique, etc. Le fort développement des méthodes pour le calcul de structures (les méthodes de type éléments finis,...), l’élaboration des approches de simulation des processus d’usinage et d’assemblage, etc. permettent maintenant de coupler différents outils logiciels d’aide à la conception : CAO – calcul – fabrication – maquette numérique. La CAO est devenue désormais un outil indispensable de développement d’un produit dans l’industrie mécanique : elle suit le produit dès la phase de création du dessin industriel jusqu’à la vente du produit encore virtuel. Donc, l’ère de la RV débute...

Les outils de CAO se basent sur des méthodes de modélisation surfacique, volumique et permettent de définir un objet virtuellement. Dans les industries qui utilisent la simulation virtuelle (aéronautique, automobile,...), les techniques de la RV servent au rendu réaliste d’un produit au cours du développement, à la visualisation des résultats de calculs, à l’animation d’un comportement simulé du système mécanique. Ces analyses à caractère qualitatif, quantitatif sont souvent utilisées dans la pratique industrielle car elles permettent d’éviter de nombreux essais, vérifications physiques lors du développement du produit. Les enjeux de l’utilisation d’outils de représentation tridimensionnelle d’un produit virtuel, de calcul du comportement mécanique, de simulation des différents processus associés à l’industrialisation du produit (les processus d’usinage, d’assemblage,...) s’expriment en termes de meilleure compréhension du phénomène en question, le dimensionnement et l’optimisation des formes et des volumes de matière, le choix des moyens de production, etc. Finalement, ceci entraîne la diminution importante du nombre d’essais et de prototypes physiques à réaliser, ce qui signifie la réduction non-négligeable des coûts et des délais de développement du produit.

En ce qui concerne l’analyse d’assemblabilité d’un produit, on revient de plus en plus, au cours de la conception, aux études des processus d’A/D et de maintenance principalement réalisées sur des prototypes physiques dans la pratique industrielle actuelle. En effet, le domaine de l’assemblage est un des domaines qui intéressent beaucoup l’industrie car la prise en compte des contraintes du métier d’assemblage et de maintenance dès les premières phases de la conception ainsi que la modélisation numérique du processus d’A/D avec la simulation réaliste du comportement physique des composants au cours de cette modélisation permettent d’optimiser le trio « qualité – délai – coût » durant le processus de conception. La nécessité de simulation d’A/D virtuel reflète les préoccupations industrielles fortes : ceci représente la réduction forte du cycle de conception du produit ainsi que le nombre de prototypes physiques à réaliser pour des tests. Les aspects d’A/D expriment aussi des exigences de conception et de production de « bons » produits, c’est-à-dire, de produits qui accomplissent au mieux les fonctions de service en termes de fiabilité, de confort, d’accessibilité, de maintenance, etc.

Cette section présente une classification des principales méthodes de simulation des opérations d’A/D virtuel élaborées récemment ainsi que quelques exemples d’assemblages virtuels. Des avantages de ces méthodes mais aussi des problèmes identifiés au cours d’une analyse des techniques actuelles d’A/D virtuel seront également abordés à travers des analyses. Notamment, le problème de simulation d’A/D de pièces flexibles est discuté, et la nécessité de simulation réaliste basée sur le comportement mécanique complexe de ces pièces est mise en évidence. En conséquence, les objectifs de notre travail seront fixés à l’issue de ces discussions.

1.3.2. Méthodes de simulation d’A/D virtuel

La possibilité de simulation des opérations d’A/D et de maintenance en RV est une alternative intéressante par rapport aux outils de simulation automatique de ces opérations dont le but est principalement d’atteindre des gains en termes de temps d’étude de l’assemblabilité d’un produit, de

réduction des investissements (financiers, humains, de formation du personnel,...) compte tenu d'un assez haut niveau d'automatisation du processus de simulation des opérations d'A/D. En effet, la RV met à disposition des concepteurs des fonctions particulières permettant d'effectuer des investigations plus fines, plus locales, de réaliser des études complémentaires des opérations d'A/D et de maintenance vis-à-vis d'une simulation automatique : la planification et l'optimisation de trajectoires d'A/D, le contrôle des différentes contraintes géométriques et mécaniques durant la manipulation temps réel, l'utilisation naturelle de la vision globale d'un être humain offrant une analyse directe d'une opération sans oublier des potentialités intéressantes de simulation d'un comportement mécanique des objets virtuels. Donc, l'étude des opérations d'A/D et de maintenance en RV peut être considérée comme une complémentarité intéressante pour des études approfondies d'assemblabilité, de maintenabilité, d'ergonomie d'un produit en phase du développement. Ainsi, il est possible de parler d'un couplage des outils de simulations automatique et interactive de type RV pour la modélisation et l'étude des opérations d'A/D et de maintenance lors de la conception mécanique.

Afin de discuter du potentiel de la RV concernant la prise en considération des contraintes liées à un comportement physique des objets virtuels, il semble intéressant de présenter les principales méthodes de simulation dans le domaine d'A/D virtuel en les caractérisant selon leurs objectifs et fonctionnalités identifiés. Tout d'abord, il nous paraît nécessaire de structurer les méthodes actuelles de simulation des opérations d'A/D virtuel.

1.3.2.1. Classification des méthodes de simulation d'A/D virtuel

Une modélisation des actions via la RV, l'assemblage virtuel y compris, est une activité assez nouvelle dans la pratique industrielle, une activité qui demande, en général, des investissements très importants en termes de formation spécifique du personnel, de dispositifs spéciaux et souvent très coûteux, etc. En ce qui concerne l'A/D virtuel, on croit paradoxalement que cette activité est un moyen de faire bouger des objets uniquement. Dans les sections suivantes on s'intéressera à des applications développées récemment pour l'A/D et la maintenance virtuels et l'on discutera d'un potentiel que la RV pourrait nous apporter, notamment, en ce qui concerne les simulations d'A/D et de maintenance de pièces à caractère flexible. Mais tout d'abord, nous voudrions proposer une classification des méthodes de simulation pour l'A/D virtuel identifiées à travers une analyse des approches développées depuis l'apparition des premières applications pour l'A/D virtuel dans les années quatre-vingt-dix.

Dans la littérature, lorsque l'on évoque des outils pour l'A/D et la maintenance virtuels, on parle principalement d'une manipulation des objets tridimensionnels, d'une détection des collisions entre un objet en question et son environnement ainsi que la possibilité de sentir des objets manipulés en termes d'efforts. Néanmoins, on ignore parfois le fait que la naissance de l'assemblage virtuel a été causée par trois éléments principaux :

- la difficulté des méthodes automatiques de simulation d'A/D de prendre en compte certaines contraintes durant la phase d'évaluation,
- le développement fort des outils de CAO et, en particulier, la possibilité d'une visualisation tridimensionnelle des objets,
- l'extension des interfaces permettant une interaction avec ces objets lors d'une manipulation.

En effet, c'est essentiellement les deux premiers éléments énumérés ci-dessus qui ont définis historiquement un nouvel axe de recherche – la recherche dans le domaine d'assemblage virtuel. Ce type d'approches est basé sur des *méthodes non-interactives*, comprenant une « simple » visualisation de composants et de sous-ensembles tridimensionnels et intégrant éventuellement des fonctions de détermination automatique des déplacements des objets sans les manipuler directement dans le monde virtuel. Notamment, la visualisation de mouvements des composants peut se résumer à un affichage de résultat de recherche d'une trajectoire d'A/D lors de l'évaluation automatique des séquences d'A/D, d'où un couplage des méthodes non-interactives et automatiques de simulation des opérations d'A/D. Parmi les méthodes non-interactives de simulation d'A/D, on peut distinguer des approches ne visualisant que « statiquement » un système de pièces rigides et la façon dont ces pièces vont composer un sous-ensemble ou un produit et des approches qui permettent suivre « dynamiquement »

une évolution d'un ensemble de pièces (par exemple, l'affichage des mouvements des pièces rigides lors de leurs phases d'extraction et de manipulation).

Maintenant, si l'on ajoute des fonctionnalités tout à fait innovantes, telles qu'une interaction avec des objets virtuels et leur perception sensorielle, on obtient un outil encore plus performant – l'*assemblage virtuel interactif* – tel que l'on le connaît actuellement. Cette famille des méthodes d'assemblage virtuel comprend notamment des interfaces de vision stéréoscopique, de manipulation directe des objets virtuels en temps réel (la génération de mouvements des objets), de perception sensorielle des objets (les retours haptique, tactiles), d'immersion totale d'un être humain dans un monde virtuel avec la représentation de mouvements de l'opérateur dans un univers virtuel à l'aide des capteurs de mouvements, etc. Les principales interfaces de RV seront détaillées au chapitre 2. Dans cette section nous n'allons présenter que quelques exemples des approches courantes dans le domaine de l'assemblage virtuel.

Ainsi, la classification suivante des méthodes de simulation des opérations d'A/D virtuelles est proposée afin de pouvoir structurer de manière qualitative des méthodes existantes dans le domaine de l'A/D :

- méthodes non-interactives de simulation d'A/D virtuel :
 - A/D non-interactif « statique »,
 - A/D non-interactif « dynamique » ;
- méthodes interactives de simulation d'A/D virtuel :
 - A/D avec une manipulation de composants,
 - A/D avec retour d'effort,
 - A/D par immersion dans un monde virtuel.

1.3.2.2. Méthodes non-interactives de simulation d'A/D virtuel

A/D non-interactif « statique »

Les premières tentatives pour réaliser un assemblage virtuel ont amené à la visualisation tridimensionnelle simple, « statique » de l'ensemble de composants rigides d'un produit mécanique. Ceci est venu de la nécessité d'expliquer aux acteurs des métiers de l'assemblage, de la production participant au développement d'un produit, une façon dont ce produit serait ou sera assemblé. Un exemple de tel assemblage créé à l'aide d'un logiciel de la société Concept 3D est représenté sur la Figure 1.2. Dans ce cas, les séquences d'A/D sont déjà établies ou bien seront déterminées au cours d'un calcul en utilisant une méthode automatique, par exemple.

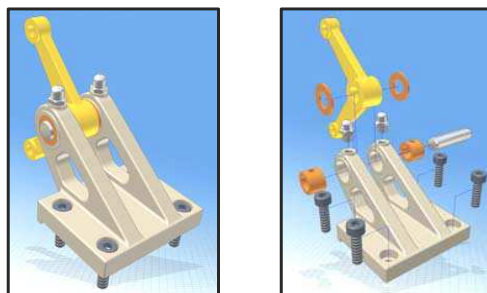


Figure 1.2. Exemple d'assemblage virtuel « statique » sans interaction avec des objets virtuels [Concept 3D 2004].

Ce type de visualisation 3D permet de comprendre qualitativement un mode de fonctionnement du produit et la façon dont ce produit pourrait être assemblé, de contrôler visuellement des problèmes possibles au niveau de la modélisation géométrique des composants, d'un sous-ensemble ou du produit complet (les intersections, les gabarits, etc.). Il est possible également de créer des animations en montrant des séquences ordonnées d'A/D prédéfini, mais aucune trajectoire réaliste ne peut être générée : la simulation des opérations d'A/D reste statique. Malgré cela, les animations simples peuvent faciliter le dialogue entre les concepteurs des différents métiers dans le cadre de la conception simultanée/intégrée. De plus, il est possible de produire un plan d'assemblage en version

papier à partir d'une telle représentation 3D. Ceci est particulièrement utile pour le service après vente ou, simplement, pour l'utilisateur qui va pouvoir assembler lui-même après d'avoir acheté un produit sous forme démontée.

Malgré les avantages des rendus réalistes 3D d'un produit encore virtuel, la représentation à l'écran de celui-ci est généralement obtenue selon la même idée : la surface extérieure d'un objet virtuel, telle qu'elle est définie, est décomposée en facettes triangulaires sur lesquelles sont appliqués des algorithmes de réflexion lumineuse, de génération d'ombrage, etc. De plus, la représentation « statique » même avec des animations possibles ne permet pas d'effectuer une analyse complète de l'assemblabilité du produit virtuel à défaut de l'évolution réaliste des objets virtuels par rapport à l'environnement extérieur représenté par un produit complet ou un environnement où ce produit sera placé. En effet, il est nécessaire de considérer des composants et des sous-ensembles à monter dans leur intégralité et complexité réelles par rapport à un produit complet ainsi qu'un environnement d'exploitation où ce produit sera utilisé, i.e. de générer et d'examiner des déplacements et des déformations réalistes des composants, de prendre en compte la présence de l'utilisateur effectuant une opération ainsi que des facteurs complémentaires dus à l'environnement d'exploitation. C'est dans ce cas que l'on pourra réaliser une analyse vraisemblable d'une opération donnée et notamment : effectuer des études de trajectoires d'A/D et contrôler des interférences réalistes avec des obstacles, examiner le comportement physique des objets déformables, inclure des études de préhension d'objet ainsi qu'un comportement d'un être humain durant l'opération d'A/D et de maintenance, par exemple.

A/D non-interactif « dynamique »

Ce type d'approches est similaire à l'assemblage non-interactif statique car ici, en général, il n'est pas possible non plus d'effectuer une manipulation directe des composants. En revanche, les méthodes de simulation d'A/D non-interactif dynamique permettent de coupler les méthodes automatiques de type séquençage d'A/D avec une phase d'évaluation des séquences et leur visualisation « dynamique ». Dans le cas d'évaluation des séquences d'A/D d'un produit virtuel, la recherche de trajectoires d'A/D libres de collisions est fréquemment incluse dans le processus d'évaluation mais reste souvent inaccessible. Par contre, le résultat d'évaluation et de recherche de trajectoires est dynamiquement affiché : les déplacements et les orientations caractérisant les mouvements des composants sont habituellement produits par des méthodes automatiques de génération de trajectoires (méthodes probabilistes [Kavraki & al. 1996], [Hsu & al. 1999], par exemple) et visualisés en temps réel.

Des techniques de pilotage de recherche des trajectoires d'A/D sont souvent utilisées afin de réduire la complexité du problème de génération des mouvements des objets virtuels (des mouvements en rotation, en translation), de prendre en compte la structure de l'environnement dans lequel l'objet virtuel en question évolue et finalement, de réduire le temps de calcul – une contrainte essentielle pour la RV. Notamment, il est possible de diminuer le nombre de mouvements inutiles en rotation en supprimant ces mouvements en fonction des zones de l'espace virtuel de travail où l'objet se déplace (les zones non-contraintes où il suffit de produire quelques segments correspondant aux mouvements de translation de l'objet), ou encore de placer automatiquement des cibles intermédiaires à partir de la détection des « trous débouchants » d'un produit virtuel [Hsu & al. 1999], [Mikchevitch 2000], [Mikchevitch & al. 2001].

La Figure 1.3 représente un exemple de processus de désassemblage virtuel d'un produit avec la visualisation d'un résultat de calcul des séquences d'A/D, leur évaluation d'après [Rejneri 2000] ainsi que la recherche d'une trajectoire associée de démontage. La visualisation dynamique d'extraction d'une vis – une pièce rigide – dans une direction de démontage est notamment indiquée.

Les avantages des méthodes de simulation d'A/D non-interactif dynamique sont :

- le couplage avec la recherche et l'évaluation des séquences d'A/D,
- le rendu tridimensionnel des objets virtuels,
- la recherche automatique de trajectoires d'A/D et leur affichage en temps réel,
- la visualisation d'un ensemble d'informations à caractère technologique, géométrique ce qui permet aux acteurs des différents métiers d'évaluer ensemble les séquences proposées par un logiciel, de les modifier/optimiser en cas de besoin dans le contexte de la conception simultanée/intégrée.

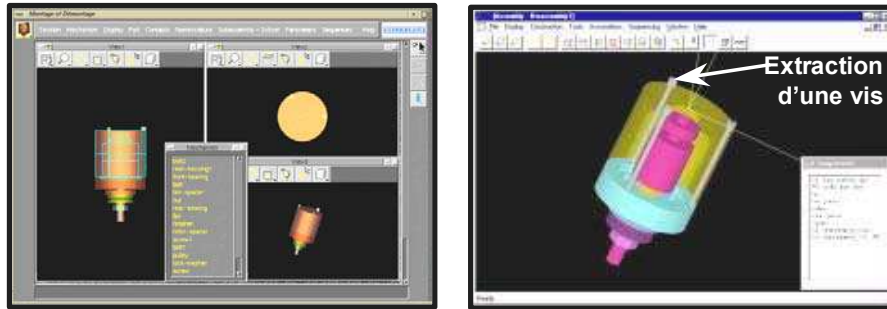


Figure 1.3. Exemple de désassemblage virtuel « dynamique » sans interaction avec un objet virtuel [Rejneri 2000].

Les inconvénients de ce type de méthodes concernent la difficulté de prise en considération des contraintes dues à différents modes de préhension des composants, d'un outillage pour le montage/démontage ainsi que la présence de l'opérateur et, par conséquent, le calcul complémentaire des collisions, le comportement mécanique de pièces flexibles, la génération automatique de trajectoires d'A/D libres de collisions physiquement non-réalisables même pour des composants rigides et le temps de calcul parfois trop important, etc. Il est également nécessaire de tenir compte des propriétés physiques d'un environnement où un produit donné sera mis en place et exploité. Et comme pour les méthodes d'A/D non-interactif statique, les méthodes de simulation d'A/D non-interactif dynamique ne permettent pas d'interagir directement avec des composants virtuels et donc, d'effectuer des études plus approfondies des opérations de montage et de maintenance : l'évaluation des efforts à développer, la prise en compte des contraintes ergonomiques, l'estimation d'un état mécanique des composants (flexibles, en particulier) en cours de montage/démontage, etc.

1.3.2.3. Méthodes interactives de simulation d'A/D virtuel

A/D avec une manipulation de composants

Le besoin des industriels de pouvoir générer des trajectoires réalistes d'A/D, d'étudier plus finement les opérations de maintenance, d'utiliser naturellement le raisonnement et la vision globale de l'opérateur lors des manipulations d'A/D, etc. a amené au développement des outils qui permettent d'interagir avec des objets virtuels en temps réel. Une des premières méthodes apparues dans le domaine d'A/D virtuel et offrant une possibilité d'interaction entre un objet virtuel et un être humain fut une manipulation directe d'objets de type génération de mouvements dans un environnement virtuel. Le lecteur intéressé peut trouver plus d'information dans les références [Oliver & al. 1995], [Dewar & al. 1997], [Jayaram & al. 1997], [Le Roy 1999], [Fuchs & al. 2001], [Chedmail & al. 2001], [Carrillo & al. 2003].

Afin de présenter quelques aspects d'une manipulation directe d'objets virtuels par un opérateur, il est important de préciser deux principaux éléments distincts à modéliser :

- un processus d'évolution d'un objet virtuel en temps réel. Cette modélisation comprend notamment :
 - une génération de mouvements (déplacements/orientations) d'un objet,
 - une modélisation du comportement physique d'un objet au cours de sa manipulation : les déformations physiquement non-linéaires, les déplacements géométriquement non-linéaires d'une structure, etc.,
 - un contrôle de collisions ainsi qu'une modélisation de l'interaction entre un objet virtuel donné et d'autres objets (lors d'une manipulation à deux mains, par exemple) et/ou l'environnement extérieur : le frottement, le glissement, etc.,
- un monde virtuel ou un environnement où l'objet virtuel en question est placé, un environnement qui reste souvent statique ou « figé » par rapport aux mouvements de l'objet manipulé.

En ce qui concerne une modélisation du processus d'évolution d'objets virtuels dans le contexte d'A/D, une manipulation séquentielle de composants dans le monde virtuel est un processus

complexe qui comprend des véritables défis technologiques. En effet, le processus de manipulation directe est constitué d'un ensemble d'opérations effectuées grâce à la vision globale de l'opérateur. Parmi ces opérations, les principales sont :

- la sélection d'objet virtuel à manipuler,
- la manipulation en tant que telle, i.e. la génération d'un ensemble de mouvements d'objet sélectionné. Une telle manipulation correspond à la génération d'une trajectoire d'A/D en temps réel et peut être :
 - une manipulation libre, sans contraintes de mouvement de l'objet,
 - une manipulation contrainte lors de la recherche de la trajectoire : suppression de mouvements de rotation, par exemple,
- la détection de collisions en temps réel lors de la manipulation afin de produire une trajectoire d'A/D libre de collisions pour une étude d'accessibilité, par exemple,
- le montage effectif s'il s'agit d'une opération d'assemblage.

Une manipulation libre est la manipulation la plus générale, mais il est intéressant parfois de supprimer des mouvements inutiles d'un composant (ou contraindre un certain nombre de DDL du composant comme la rotation, par exemple). Ainsi, les mouvements du composant sans rotation se réduisent à des translations consécutives du composant [Mikchevitch 2000], [Convard & al. 2003]. Les mouvements de composants virtuels sont souvent produits à l'aide des périphériques 2D et 3D permettant de définir des positions/angles courants désirés du composant manipulé : une souris 2D et 3D de type SpaceMouse, une SpaceBall, etc. Ces dispositifs seront présentés en détails au chapitre 2. La Figure 1.4 illustre deux types de manipulations présentées ci-dessus : libre et contrainte.

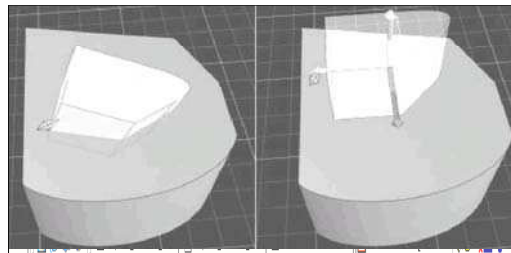


Figure 1.4. Exemple d'assemblage virtuel par interaction avec des objets virtuels : manipulations libre et contrainte [Convard & al. 2003].

Quant à la détection de collisions, ce problème s'exprime de façon suivante : il est nécessaire d'investiguer si deux solides en mouvement relatif sont en collision à un instant donné. Deux méthodes de détection de collisions sont les plus utilisées [Lallemand & al. 1994]. La première est fondée sur le calcul de distances : elle ne traite que les objets convexes, mais présente l'avantage de donner la distance entre les objets rendant possible la prévention des collisions. La seconde, plus générale et souvent utilisée dans la RV considère les objets non convexes et est basée sur le calcul d'interférences entre les solides. Afin de diminuer le temps de vérification de collisions, la dernière méthode se décompose souvent en deux phases :

- une représentation d'un composant manipulé par une boîte englobante associée, un test si cette boîte rentre en collision avec d'autres composants ou avec l'environnement extérieur et une analyse en temps réel,
- s'il s'avère qu'au cours d'une analyse la boîte englobante d'un composant est en intersection avec une autre pièce, une étape de la vérification plus fine commence : il s'agit alors de vérifier si le composant en question représenté déjà comme un objet facettisé est en intersection effective.

Si le composant entre en collision avec d'autres pièces lors de la simulation d'une opération d'A/D ou de maintenance, deux types de poursuites de la manipulation sont couramment proposés :

- la manipulation est poursuivie, mais une collision est indiquée par un changement de couleur des objets en collision, par un signal sonore, etc. ; le composant peut donc passer à travers

d'autres objets virtuels, ce qui représente un certain handicap pour l'optimisation d'une trajectoire d'A/D, par exemple,

- la manipulation est bloquée dans la direction du mouvement causant la collision.

Le montage effectif, ou la dernière phase d'une opération d'assemblage dans une zone proche d'un endroit d'un système mécanique où une pièce sera installée, est souvent une étape très délicate, nécessitant le contrôle de plusieurs paramètres à la fois : le mouvement complexe d'une pièce avec la prise en compte de translations mais aussi de rotations, la direction prioritaire du mouvement de la pièce, la zone fortement contrainte par la présence des obstacles, etc. Il existe actuellement des techniques de type « reconnaissance des contraintes » [Jayaram & al. 1997], [Jayaram & al. 1999], [Carrillo & al. 2003] permettant d'identifier automatiquement et a priori des contraintes possibles dans une zone de montage (concentration des obstacles, différents types de contacts géométriques, etc.), de proposer une solution possible de montage par une recherche et une association de directions, d'axes de montage, de formes des pièces à assembler (un arbre et un alésage, deux surfaces planes, etc.), de déplacer et d'installer automatiquement une pièce dont une direction et un axe de montage proposés par le système d'assemblage virtuel sont validés par l'opérateur. La Figure 1.5 illustre une telle identification automatique des directions prioritaires de montage avec leur indication à l'opérateur par différentes couleurs dans un environnement VADE de simulation des opérations d'A/D virtuel conçu à l'Université de Washington [Chandrana 1997], [Jayaram & al. 1999]. Ces fonctions de détection automatique représentent un avantage particulier : la possibilité d'éviter des mouvements délicats d'une pièce à assembler dans une zone proche de la mise en position effective de cette pièce. Par ailleurs, une représentation de main virtuelle (avatar) donne une meilleure lisibilité du processus de manipulation, permet d'explorer différentes préhensions d'une pièce et de considérer des collisions entre une main virtuelle (ou un dispositif tenant une pièce à assembler) et l'environnement extérieur (d'autres pièces d'un mécanisme ou un environnement représentant un poste de travail d'opérateur, par exemple).

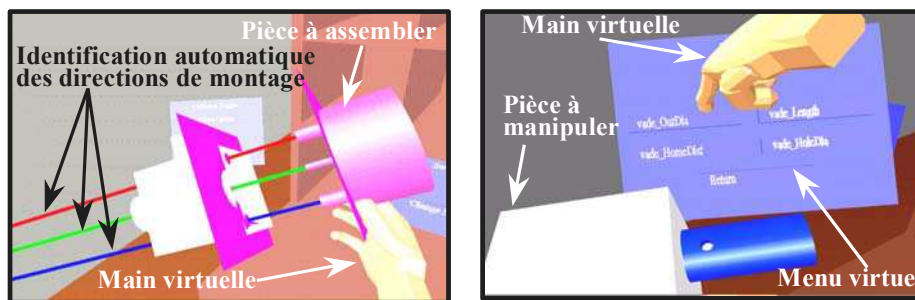


Figure 1.5. Exemple d'assemblage virtuel par interaction avec des objets virtuels [Jayaram & al. 1999].

Quant à l'environnement extérieur dans lequel un composant virtuel en question évolue, cet environnement est statique, i.e. il reste « figé » par rapport aux mouvements du composant, il ne se déplace pas lors de manipulation du composant à assembler/désassembler et ne change pas de forme. Néanmoins, il est envisageable actuellement d'introduire des outils permettant de modifier la forme du composant solide manipulé au cours de l'étude des opérations d'A/D et de maintenance s'il s'avère que la forme initiale de ce composant solide pose des problèmes en termes d'assemblabilité du produit, d'accessibilité du composant, etc. Ceci est extrêmement intéressant du point de vue de la conception simultanée/intégrée si de nombreux acteurs de métiers différents sont présents lors d'une manipulation virtuelle dont le but est une étude/optimisation d'une opération de maintenance, par exemple. Dans le cas de modifications requises de la géométrie d'un composant, une réactualisation de la géométrie pourrait se faire directement dans un environnement virtuel sans passer par un modèle géométrique de base du composant avec un gain non-négligeable du temps d'étude d'une opération donnée. Ce problème sera développé plus en détails au chapitre 3. Toutefois, notons que certains systèmes paramétriques de CAO commercialisés (ProEngineer, Catia,...) supportent la possibilité de régénération de la géométrie de pièces solides si une modification de dimensions de pièces est requise

au cours d'une simulation d'opérations d'A/D virtuel et donc, peuvent être couplés avec des systèmes de simulations virtuelles afin de réaliser ces modifications dimensionnelles à l'aide des menus virtuels [Jayaram & al. 1999].

Certains outils pour la simulation d'opérations d'A/D virtuel disposent de fonctions afin de coupler le problème de séquençement automatique avec une investigation complémentaire de l'assemblabilité du produit basée sur les manipulations d'objets virtuels, la recherche de trajectoires d'A/D libres de collisions, l'étude de préhension de pièces, etc. dans un environnement de RV [Jayaram & al. 1999], [Carrillo & al. 2003]. Ces fonctions sont particulièrement utiles dans le contexte de la conception simultanée/intégrée car elles facilitent le dialogue entre les concepteurs des différents métiers.

Actuellement, il est parfois possible de simuler certains phénomènes physiques comme les effets de pesanteur des pièces rigides (des balancements, des chutes de pièces, etc.), des phénomènes de déformation, de glissement des pièces en contact, etc. En effet, chaque simulation d'un phénomène physique doit se reposer sur une modélisation rigoureuse compte tenu des propriétés mécaniques des pièces. Par exemple, dans le cas de simulations de processus de montage et de maintenance, il est indispensable de considérer : les propriétés du matériau, les lois décrivant des phénomènes de contact, de déformation de pièces flexibles, etc. Des modèles actuellement employés dans le contexte de simulations en RV seront décrits au chapitre 2. Néanmoins, il est nécessaire de souligner que toute modélisation physique doit être compatible avec la simulation dans un environnement de RV sous la contrainte de temps de réponse qui doit être extrêmement court afin d'assurer la fluidité des images lors d'une manipulation virtuelle.

A/D avec retour d'efforts

Les difficultés des dispositifs de génération de mouvements d'objets virtuels au niveau de la commande des composants à assembler/désassembler, une absence de sensations des composants manipulés (du grec « haptain » – *toucher*) ont poussé au développement de périphériques spéciaux nommés dispositifs *haptiques* permettant de toucher, de simuler une perception sensorielle des objets virtuels. Ces nouveaux dispositifs sont issus du domaine de la robotique (commande des robots, télé-manipulateurs) et ont été intégrés avec succès dans diverses simulations en RV. Il existe actuellement deux types de dispositifs haptiques :

- des dispositifs tactiles,
- des dispositifs à retour d'efforts.

Les premiers ont pour le but de pouvoir simuler le toucher d'un objet virtuel, la sensation de rugosité, de température, etc. [Le Roy 1999], [Fuchs & al. 2001]. En ce qui concerne la simulation des opérations d'A/D et de maintenance virtuels, c'est la seconde famille de dispositifs haptiques qui est la plus utilisée et offre des fonctionnalités supplémentaires par rapport aux outils déjà devenus classiques comme la souris 3D, la SpaceBall ou le joystick. En effet, les dispositifs à retour d'efforts permettent en temps réel de sentir un objet virtuel, de simuler sa rigidité et son poids durant une manipulation virtuelle, de simuler un effet mécanique lorsqu'un composant à assembler entre en collision avec son environnement, etc. Toutes ces fonctionnalités contribuent aux études de maintenabilité et de manutentionabilité du produit en phase de développement, aux estimations complémentaires de l'assemblabilité, l'ergonomie d'un produit à partir des efforts ressentis au cours de l'A/D et la maintenance virtuels, etc. Finalement, la vision globale de l'opérateur, sa capacité à contrôler les mouvements relatifs des composants et à pouvoir réfléchir au cours d'une manipulation donnée, et maintenant, la perception sensorielle des composants déplacés constituent un système complexe d'opérations qu'un être humain réalise plus naturellement. Ainsi, les gestes de l'opérateur sont plus réalistes, les actions simulées en assemblage virtuel avec un dispositif à retour d'efforts permettent de mieux comprendre une tâche donnée et de l'optimiser. La présentation détaillée des dispositifs haptiques, leurs avantages et limites seront données dans le chapitre 2. Néanmoins, donnons ici quelques références concernant l'A/D virtuel avec l'utilisation de dispositifs à retour d'efforts [Le Roy 1999], [Fuchs & al. 2001], [Chablat & al. 2002], [Amundarain & al. 2002], [Moreau 2003].

Pour illustrer un des intérêts de l'utilisation des dispositifs à retour d'efforts dans l'A/D et la maintenance virtuels, donnons un exemple de simulation de montage d'un moteur de vitre électrique

d'une portière de voiture Renault (Figure 1.6). Cette simulation est effectuée au sein du laboratoire LIST au CEA sur une plate-forme d'immersion virtuelle Phare à l'aide de périphériques à retour d'efforts Virtuose 6D de la société Haption dans le cadre d'un projet Perf-RV [Perf-RV 2003], [LIST CEA 2003], [Haption 2003]. Le but de ce projet est de développer un outil de prototypage virtuel permettant d'effectuer différentes études d'assemblabilité, d'accessibilité, de maintenabilité d'un produit virtuel, d'anticiper/optimiser des gestes pour le processus de production, etc. afin de réduire les essais sur des prototypes physiques et donc, atteindre des gains en termes de temps et de coûts de développement du produit. R. Gelin, responsable du service robotique et systèmes interactifs, explique à propos des besoins industriels d'une telle simulation : « Cette méthode permet également de démontrer à une phase précoce du projet l'intérêt d'un nouveau produit ou procédé, et d'identifier précisément les souhaits et besoins des utilisateurs finaux ».

En effet, lors de l'industrialisation d'un produit et notamment, lors du montage de pièces ou de sous-ensembles de pièces, il arrive qu'un geste demandé aux employés soit difficilement réalisable, voire impossible à réaliser du point de vue de l'accessibilité ou de l'ergonomie [LIST CEA 2003]. Alors, une simulation en amont des opérations de montage virtuel, comme celle représentée sur la Figure 1.6 et basée sur l'utilisation naturelle des dispositifs à retour d'efforts avec l'immersion de l'opérateur dans un monde virtuel, permet d'investiguer, de comprendre, d'optimiser des actions réalistes pour l'A/D.



Figure 1.6. Exemple d'assemblage virtuel par interaction avec des objets virtuels : montage virtuel avec un dispositif à retour d'efforts [LIST CEA 2003].

Il existe actuellement de nouveaux dispositifs à retour d'efforts pour l'A/D virtuel couplés avec un prototype réel du composant à assembler produit par une technique de prototypage rapide (la stéréolithographie, par exemple) [Moreau 2003]. Ce type de connexion permet de tenir le composant prototypé dans la main tout au long de la manipulation virtuelle et donc, de sentir plus naturellement les efforts lorsque le composant virtuel entre en collision avec des obstacles, de planifier une trajectoire d'A/D plus réaliste, etc.

Généralement, comme dans le cas de la manipulation directe des composants virtuels avec les dispositifs de type SpaceMouse, SpaceBall, etc., les dispositifs haptiques à retour d'efforts de type Virtuose, PHANToM de la société SensAble Technologies, etc. ne permettent pas des manipulations de pièces virtuelles de type flexible. Ce handicap pousse les centres de recherche à développer de nouveaux outils, car de nouvelles simulations, plus complexes du point de vue de la modélisation de pièces flexibles et de la contrainte essentielle de la RV – la simulation en temps réel – sont demandées actuellement par des industriels. R. Gelin remarque dans une interview [LIST CEA 2003] : « Ces recherches s'orientent, entre autres, vers la simulation d'objets déformables comme des tôles, des câbles, des interactions solide – liquide ».

A/D par immersion dans un monde virtuel

La possibilité de manipulation directe de composants 3D dans les zones encombrées d'un mécanisme virtuel, l'utilisation de la vision globale d'un opérateur lors d'une manipulation virtuelle, la perception d'objets offerte par des dispositifs haptiques, les algorithmes de calcul de collisions, etc. représentent un ensemble de fonctions performantes permettant d'étudier, d'évaluer des opérations d'A/D et de maintenance virtuelles même si certaines interfaces de RV restent encore restreintes technologiquement (difficultés de simulation de pièces flexibles en temps réel, limites mécaniques et

technologiques des dispositifs haptiques, etc.). Mais est-il réellement possible de réaliser une opération de maintenance, par exemple, sans prendre en compte la présence d'un monteur, sans considérer le comportement d'un être humain, sans étudier l'ergonomie d'une tâche donnée ? L'apparition des périphériques permettant d'immerger un être humain dans un monde virtuel apporte quelques éléments de réponse au problème de l'étude plus complète des opérations d'A/D et de maintenance dans un environnement de RV.

En effet, un monteur ou un agent de maintenance réalisant une opération donnée peuvent être représentés en tant que mannequins virtuels, immergés dans un monde virtuel (un poste de travail avec le mécanisme virtuel à étudier, par exemple) et interagissant avec des composants, des engins virtuels. Ceci permet de vérifier si un monteur manipulant un composant virtuel peut effectivement avoir un accès à un endroit de montage, vérifier l'accessibilité à une pièce à changer placée dans un endroit délicat et masquée par d'autres pièces, estimer l'ergonomie des mouvements du monteur dans les conditions données, etc.

Les premières approches apparues dans ce domaine furent des simulations à l'aide d'un mannequin programmé [Chedmail & al. 2001]. Dans le cas de telle simulation, certaines tâches du mannequin sont programmées, par exemple :

- relier le repère d'un composant virtuel manipulé à une ou deux mains du mannequin,
- définir une cible du regard, un champ de vision du mannequin,
- relier linéairement une trajectoire d'A/D d'un composant avec un corps du mannequin.

Ainsi, lors d'une manipulation d'un composant virtuel, les collisions non seulement entre ce composant et son environnement extérieur, mais aussi entre le mannequin (ses bras, son corps) et son monde extérieur sont détectées et signalées en temps réel. Chedmail et Le Roy ont défini un système multi-agents offrant l'évitement automatique des collisions à l'aide un agent « glisseur » qui fait glisser des sujets actifs dans un monde virtuel (le composant manipulé, les membres du mannequin) sur leur environnement extérieur. Cette approche permet également d'assurer une attitude cohérente du mannequin en forçant ses pieds à toucher le sol et son corps à rester vertical [Chedmail & al. 1999], [Le Roy 1999], [Chedmail & al. 2001].

La Figure 1.7 illustre un exemple d'utilisation d'un mannequin pour un problème défini par SAAB dans le cadre d'un projet européen CEDIX/IRCYN/SAAB : l'étude d'accessibilité d'une bouteille d'oxygène dans un environnement encombré [Chedmail & al. 1999], [Le Roy 1999]. La fonction de recherche d'une trajectoire de montage libre de collisions entre le système à étudier (la bouteille d'oxygène et le mannequin la manipulant) et l'environnement extérieur garantit l'évitement de collisions entre le mannequin et l'environnement est également investigué et donc, la trajectoire trouvée est effectivement réalisable. Une étude ergonomique peut alors être effectuée à partir des données liées aux articulations des membres du mannequin (les positions/orientations des bras, du dos,...). De plus, la prise en compte de la masse de l'objet virtuel transporté permet d'estimer si la charge supportée est acceptable pour un être humain, si les positions des bras reliés à l'objet transporté, les gestes du monteur associés aux moments du levage/posage d'un composant, etc. sont cohérents par rapport aux normes ergonomiques [Waters & al. 1994], [Karhu & al. 1995], [Stevenson 1998], [Chedmail & al. 2001].

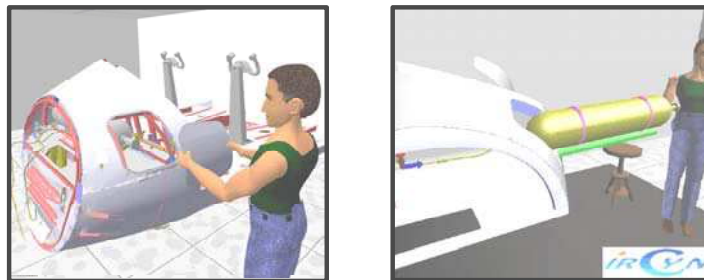


Figure 1.7. Exemple de simulation d'opération de maintenance virtuelle par immersion d'un mannequin programmé [Le Roy 1999].

Afin de représenter un comportement humain aussi naturel que possible au cours d'une manipulation virtuelle et de restituer les efforts appliqués à un composant manipulé, une technique d'immersion d'un être humain dans un monde virtuel a été développée [Chedmail & al. 2001]. Cette technique est souvent liée à la représentation d'un opérateur immergé à travers un mannequin virtuel. Ainsi, le mannequin peut non seulement interagir avec le composant à manipuler et représenter plus fidèlement ses mouvements naturels lors de la simulation d'une opération donnée. Les interfaces d'immersion virtuelle que l'on peut trouver aujourd'hui sur le marché sont assez variées, et des exemples de ces dispositifs seront donnés dans le chapitre 2. Néanmoins, illustrons quelques exemples d'interfaces d'immersion souvent utilisées dans les simulations des opérations d'A/D virtuel. Les principaux périphériques sont des lunettes de vision stéréoscopique et des casques de RV offrant à un opérateur une vision 3D de scènes virtuelles. La Figure 1.8a présente un exemple de simulation par immersion de l'opérateur [VMG 2001]. Différents capteurs utilisés pour la détection de mouvements de l'opérateur sont également des outils intéressants : ils permettent d'immerger un être humain dans un monde virtuel en définissant fidèlement les mouvements d'un mannequin virtuel qui réalisera une tâche donnée en « remplaçant » l'opérateur dans le monde virtuel. En effet, ce n'est plus un mannequin « programmé », ce mannequin devient « humanisé » car il tient compte du comportement de l'opérateur réalisant une tâche donnée, il est désormais lié à l'opérateur (concept d'avatar¹ en RV). Ainsi, les propriétés de recherche intuitive, de nature créative d'un être humain sont utilisées.

Afin d'éviter des collisions entre l'environnement et l'opérateur immergé, devenu un mannequin virtuel, les techniques de détection de collisions sont utilisées. Il est également possible de simuler un retour d'effort en utilisant des dispositifs haptiques pour permettre une meilleure perception des efforts exercés par l'opérateur et donc, offrir la possibilité d'investiguer en temps réel une opération simulée du point de vue ergonomique. Cependant, il faut souligner que l'utilisation de ces dispositifs est limitée à certaines configurations, par exemple, vis-à-vis des contraintes technologiques et mécaniques de ces dispositifs (singularités mécaniques, impossibilité de produire des moments, etc.) incompatibles avec des actions naturelles de l'utilisateur immergé. Un exemple de montage virtuel d'un moteur de vitre électrique d'une portière d'une voiture Renault au sein du CEA représenté sur la Figure 1.6 illustre une telle simulation par immersion de l'opérateur avec l'utilisation du Virtuose 6D, dispositif à retour d'efforts.

La Figure 8b présente une plate-forme au sein du laboratoire LIST/CEA pour la simulation des opérations d'A/D virtuel par immersion d'un mannequin commandé par un opérateur immergé dans un environnement virtuel [Perf-RV 2003]. Le comportement réel de l'opérateur, ses mouvements dans l'espace sont capturés à l'aide d'un système optique et permettent d'animer le mannequin virtuel de façon réaliste.

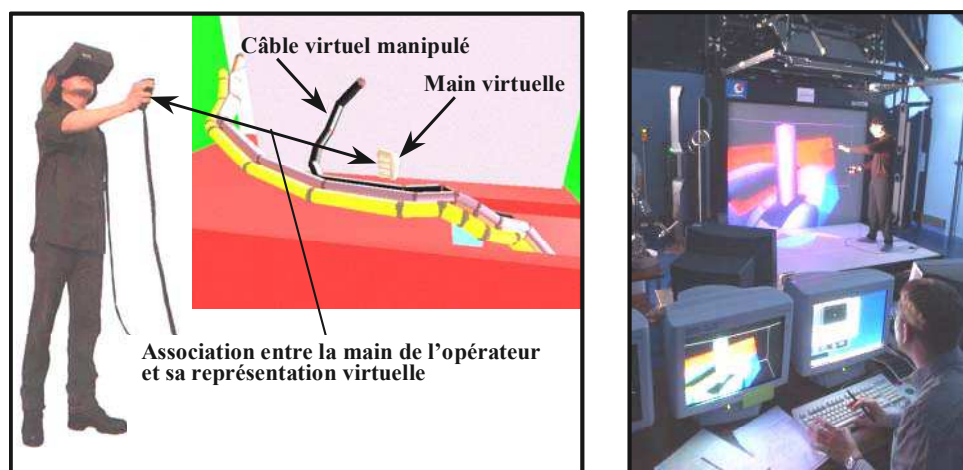


Figure 1.8. Exemple de simulations d'A/D virtuel par immersion de l'opérateur :
(a) manipulation d'un câble virtuel [VMG 2001],
(b) plate-forme d'immersion du CEA avec un mannequin virtuel [Perf-RV 2003].

¹ Avatar (humain) est une représentation virtuelle de (ou des) l'utilisateur(s) du dispositif RV [Fuchs & al. 2001].

Un autre dispositif intéressant d'immersion de l'opérateur dans un monde virtuel pour la simulation d'opérations d'A/D virtuelles est un périphérique de type CAVE ou salles immersives. L'opérateur est alors placé dans un « cube » constitué de 3 à 6 écrans sur lesquels des images stéréo d'une scène virtuelle sont projetées en fonction de la position de l'opérateur [Chedmail & al. 2001], [Sutcliffe & al. 2003]. Ce périphérique de RV est très utile particulièrement dans le contexte de la conception collaborative/intégrée car l'opérateur ne s'isole plus dans son monde virtuel pour simuler une tâche donnée : d'autres acteurs d'une équipe multidisciplinaire peuvent être immergés en même temps dans le monde virtuel. Ceci apporte la dimension nécessaire pour un travail en équipe, aide à partager des connaissances, à optimiser un produit virtuel. Notamment, la société PSA travaille actuellement sur l'utilisation de CAVE dans le processus de conception : les revues de projets autour de données représentant un état donné d'un produit virtuel [Perf-RV 2003].

1.3.3. Problèmes de simulation d'A/D virtuel de pièces flexibles

Comme nous l'avons vu dans les exemples précédents, il existe à ce jour des outils de RV permettant de simuler principalement les opérations d'A/D et de maintenance de pièces rigides ne changeant pas sa forme au cours d'une manipulation virtuelle. Néanmoins, le besoin industriel pousse à développer des outils qui vont plus loin dans la modélisation de la réalité et notamment, qui permettent de réaliser une modélisation plus complexe des opérations d'A/D virtuel de *pièces flexibles*.

Afin de mettre en évidence certains problèmes de simulation d'A/D de pièces flexibles, considérons tout d'abord un exemple d'opération de montage/démontage de système de freinage d'une voiture (Figure 1.9). Selon le processus de démontage défini par un industriel, il est nécessaire de :

- ① Démontez le tuyau flexible 1, soulevez un réservoir d'expansion 2.
- ② Dévisser les connexions 1.
- ③ Démontez les bâtis 1 et 2, retirez le tuyau flexible vidé 3 (souvent difficile).

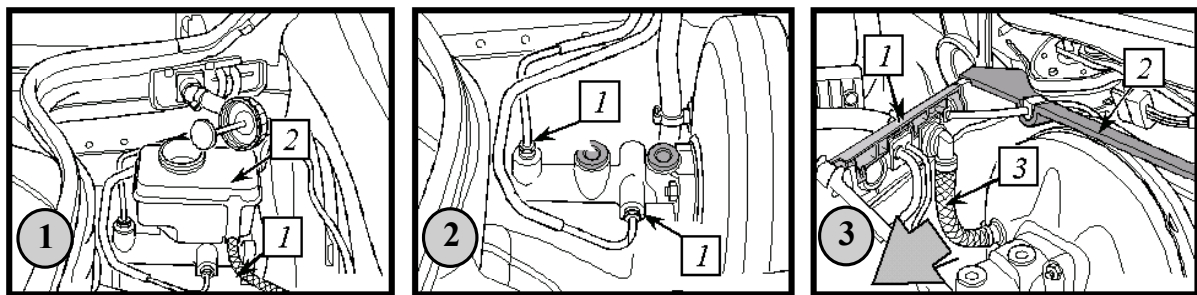


Figure 1.9. Exemple de processus de démontage du système de freinage (selon BMW).

A première vue, le simple fait de voir ces quelques dessins du mécanisme avec des formes « figées » à un moment donné des différentes pièces fournit suffisamment d'information pour savoir (ou plutôt comprendre) ce qu'il faut faire en principe. En pratique, cette simple tâche de démontage devient un problème compliqué pour un être humain car :

- les opérations d'A/D sont difficiles à cause d'un espace de travail limité : les pièces à monter/démonter sont invisibles, l'accessibilité est insuffisante, la position de travail d'un ouvrier est difficile, ce qui peut produire une certaine fatigue, etc.
- les pièces flexibles changent de forme lors de l'A/D. Ces pièces peuvent avoir une structure facilement endommageable au cours du montage. De plus, elles peuvent avoir des propriétés particulières quant au matériau, notamment, la « mémorisation » des états contraints de la pièce flexible au cours de sa déformation. L'état de contrainte est difficilement contrôlable par l'ouvrier durant le montage, ce qui peut poser des problèmes lors de l'exploitation du produit si l'état de contrainte final de la pièce flexible installée s'avère important, etc.,
- l'encombrement et l'occultation de l'espace de travail ainsi que la géométrie spécifique et le caractère flexible de certaines pièces influent négativement sur la recherche de trajectoires

d'A/D : la fatigue de l'ouvrier, les collisions multiples, les endommagements possibles de pièces à caractère flexible, etc.,

- les manipulations à deux mains ou un outillage de fixation spécifique peuvent être requis pour certaines opérations d'A/D, etc.

Comment l'on a déjà vu, certaines des ces contraintes peuvent être étudiées en utilisant des fonctionnalités de la RV comme la manipulation directe des objets virtuels, l'immersion de l'opérateur, l'utilisation des dispositifs haptiques. Cependant, il est plus difficile de modéliser les mouvements de composants flexibles au cours de la simulation d'A/D car il est nécessaire désormais de prendre en compte le comportement complexe de ces composants. Par exemple, lorsque l'utilisateur souhaite avoir accès à une autre pièce virtuelle (rigide ou déformable) masquée par un tuyau flexible, il procède de la manière suivante : il impose un grand déplacement à ce tuyau virtuel en le déformant. De plus, au cours de cette déformation, le tuyau peut rencontrer un obstacle sur sa trajectoire, ce qui complique la tâche de l'ouvrier. Ainsi, les mouvements de cet objet flexible généreront un déplacement des points d'application des efforts transmis par une/deux main(s) de l'opérateur ainsi qu'une modification de l'orientation des supports des ces efforts, ce qui n'est pas le cas lors de la génération de déplacements souvent linéaires et séquentiels d'un composant virtuel simulé par un objet rigide qui préserve sa forme lors de sa manipulation. Par ailleurs, il est nécessaire de remarquer que dans la plupart des manipulations réelles, la main de l'opérateur suit la trajectoire générée. Donc, il est indispensable de pouvoir simuler des conditions aux limites de même nature lors d'une manipulation virtuelle d'une pièce flexible compte tenu des changements simultanés de direction des forces appliquées et de la forme géométrique du composant flexible.

La forme déformée, physiquement réaliste du composant virtuel flexible « travaillant » dans le domaine de grands déplacements est importante, car elle permet d'analyser une trajectoire A/D, de vérifier l'absence d'interférences effectives entre le composant manipulé et son environnement. Les efforts à appliquer à ce composant lors d'une manipulation virtuelle, produits par une telle simulation sont également utilisés pour évaluer la déformation du composant flexible (l'état de contrainte du composant), contribuer à la détermination d'un outillage pour une opération d'A/D donnée (une ou deux mains humaines, un bras de robot, des pinces, etc.) ou encore à l'évaluation de l'ergonomie d'une tâche. Finalement, l'étude des opérations d'A/D et de maintenance de pièces flexibles en grands déplacements, la prise en compte de leur comportement mécanique dans un environnement virtuel doit permettre au concepteur de considérer les séquences possibles d'A/D et ainsi, évaluer et optimiser le processus d'A/D de produits mécaniques comprenant des pièces flexibles. Cependant, ceci peut être atteint à condition que l'objet flexible virtuel soit correctement représenté du point de vue géométrique (forme déformée réaliste) et physique (efforts réalistes associés à la forme déformée de la pièce).

Malgré les interfaces existantes en RV, fournissant des mouvements et des efforts partiellement réalistes lors des manipulations de composants virtuels à caractère flexible, les systèmes actuels de simulation d'opérations d'A/D virtuel ne peuvent pas fournir une solution satisfaisante sans l'insertion des modèles mécaniques capables de traiter fidèlement le problème de grands déplacements géométriquement non-linéaires, de produire des efforts réalistes lors du processus de simulation virtuelle [Léon & al. 1999], [Léon & al. 2001], [Hergenröther & al. 2001]. Par exemple, les dispositifs haptiques ne sont encore pas tout à fait capables de produire des forces et des moments sur un domaine étendu par rapport aux efforts réels exigés pour une opération donnée. Il est donc indispensable de considérer la complexité du rapport entre les grands déplacements caractérisant les déformées d'un composant flexible et les efforts appliqués à celui-ci en tenant compte des changements simultanés de direction des forces lors d'une manipulation virtuelle. Le problème devient encore plus complexe lorsqu'il s'agit de la modélisation des phénomènes physiques nécessitant l'application des conditions aux limites non-linéaires, par exemple, des efforts conservatifs à produire par des dispositifs à retour d'efforts, la prise en compte du frottement, etc. De ce fait, un aspect important des travaux de cette thèse est une simulation adéquate de composants flexibles dans un environnement de RV.

Il est donc nécessaire de mettre en place une approche incluant un modèle particulier de comportement géométriquement (et éventuellement, physiquement) non-linéaire d'objets déformables, mais aussi de profiter des capacités temps réel des systèmes de RV en termes de représentation géométrique, d'interfaces de capture de mouvements et de retour d'efforts. En conséquence, en ce qui

concerne une pièce virtuelle flexible déformée, l'information géométrique/efforts à développer doit être fournie à l'opérateur en temps réel : c'est là que réside la difficulté essentielle.

Finalement, l'objectif de cette thèse est de contribuer au développement d'outils pour la simulation réaliste du comportement de pièces flexibles, de faire un lien entre les dispositifs existants en RV et la modélisation de pièces flexibles, d'élaborer une méthodologie de simulation des opérations d'A/D de ces pièces en RV en se basant sur des modèles mécaniques suffisamment rapides afin de produire une information en temps réel concernant :

- la déformée réaliste d'une pièce virtuelle flexible sous des déplacements/ efforts imposés par des dispositifs de RV lors de la manipulation de cette pièce,
- la trajectoire réaliste d'A/D d'une pièce virtuelle flexible au cours de la simulation d'une opération d'A/D ou de maintenance,
- les forces/moments réalistes à appliquer à une pièce flexible pour atteindre des configurations géométriques souhaitées en utilisant des dispositifs de RV,
- les forces/moments internes d'une pièce flexible sous des déplacements/efforts donnés lors d'une simulation d'A/D virtuel,
- les informations pour évaluer/optimiser une opération donnée d'A/D et de maintenance du point de la conception mécanique, de l'assemblabilité, l'ergonomie, etc.

1.3.4. Pourquoi la réalité virtuelle pour la simulation d'A/D et de maintenance de pièces flexibles ?

Malgré certains problèmes de simulation réaliste du comportement de pièces flexibles dans un environnement de RV, l'utilisation de la RV dans l'étude des opérations d'A/D et de maintenance de pièces flexibles présente des avantages particuliers par rapport aux techniques automatiques de simulation de ces opérations. Cette section résume certains de ces avantages de manière non-exhaustive afin de montrer l'intérêt de l'utilisation de la RV pour la simulation des opérations d'A/D et de maintenance de pièces flexibles.

La simulation des opérations d'A/D et de maintenance de systèmes mécaniques comportant des pièces flexibles dans un environnement de RV permet de :

- visualiser de manière dynamique et immersive des scènes virtuelles. En effet, les scènes 3D sont affichées en temps réel sans « masquer » le processus et les résultats de simulations. L'opérateur contrôle visuellement un événement virtuel affiché sur l'écran d'un poste de travail ; il peut être également « plongé » dans un monde virtuel par des techniques d'immersion afin d'avoir une évaluation plus intuitive,
- manipuler directement des pièces, les toucher, sentir les efforts appliqués, etc. Ces fonctionnalités de la RV permettent non seulement d'interagir directement avec une pièce virtuelle flexible, mais aussi se mettre à la place d'un monteur en simulant/optimisant ses actions par rapport à une simple visualisation 3D,
- contrôler différentes contraintes de conception, d'assemblage, d'ergonomie et donc, évaluer les opérations d'A/D et de maintenance en temps réel. Cette évaluation se réalise par l'affichage temps réel des résultats de simulation d'un comportement mécanique d'une pièce flexible qui évolue dans son environnement au cours de la manipulation. Les contraintes à contrôler sont les valeurs admissibles d'efforts à appliquer à la pièce manipulée, les valeurs admissibles caractérisant l'état de contrainte dans la pièce flexible, la géométrie déformée de la pièce (la courbure, ...), etc.,
- utiliser naturellement la vision globale (contrôle) de l'utilisateur en cumulant des aspects à la fois quantitatifs (les formes déformées réalistes d'une pièce flexible, sa trajectoire, son positionnement ainsi que celui de l'opérateur par rapport à l'environnement extérieur,...) et qualitatifs (les contraintes de conception, la perception des efforts appliqués à la pièce manipulée,...) d'étude des opérations d'A/D du point de vue de la conception mécanique, l'assemblabilité, l'ergonomie, etc.,
- modifier/optimiser la géométrie de pièces flexibles lors d'études d'A/D dans différentes phases de (re-)conception du système mécanique. En effet, lors de l'étude d'une manipulation

d'A/D et de maintenance, les efforts/trajectoires générés pour une géométrie et un matériau donnés de la pièce ainsi que la géométrie de l'environnement extérieur peuvent produire des situations critiques du point de vue de l'ergonomie ou de la conception (dépassement des valeurs des efforts ou d'une contrainte admissibles,...). En conséquence, ceci peut entraîner une re-conception locale du produit étudié, à savoir la modification de la géométrie de la pièce flexible (longueur, caractéristiques de sa section, etc.) ou des solutions constructives de connexion de la pièce flexible avec son environnement (géométrie des points d'attache, de la fixation,... de la pièce par rapport à son environnement), etc.,

- guider la recherche de trajectoires d'A/D de pièces flexibles, générer les trajectoires réalistes sans fixer des DDL de la pièce flexible à manipuler. Ces études se réalisent de façon plus réaliste et naturelle car l'opérateur manipulant la pièce flexible se base sur la recherche intuitive d'une solution, il observe et modifie les trajectoires réalistes d'A/D en temps réel, trajectoires qui sont générées à partir de la simulation de comportements cinématique et mécanique d'une pièce flexible qui dispose en réalité de 6 DDL (changements importants de forme géométrique de la pièce flexible en termes de déplacements et de rotations de chaque section intermédiaire de la pièce),
- faciliter l'étude des opérations d'A/D et de maintenance dans des environnements complexes avec des zones étroites, des pièces flexibles masquées par d'autres pièces, etc. C'est un point important pour l'amélioration des conditions de travail d'un ouvrier : la fatigue d'un ouvrier, la position et le nombre optimal d'ouvriers pour une opération donnée, les gains au niveau de temps d'assemblage, etc. Ainsi, l'utilisation des outils de simulation d'A/D virtuel aide à choisir une trajectoire d'A/D, à optimiser les séquences d'A/D compte tenu de l'espace de travail limité, l'accessibilité insuffisante, les particularités de comportement de pièces flexibles en grands déplacements, les pièces flexibles masquées par d'autres pièces, etc.,
- prendre en compte un outillage nécessaire lors de l'A/D, la présence d'un être humain par l'immersion dans un environnement de RV pour le contrôle des collisions. La représentation géométrique de l'outillage spécifique requit pour une opération donnée, l'immersion de l'opérateur (ses mains, ses bras ainsi que son corps, si nécessaire) fournissent une information complémentaire à prendre en compte lors de la manipulation d'une pièce flexible et du contrôle d'absence de collisions non seulement entre la pièce manipulée et le mécanisme, mais aussi entre l'outil utilisé, le monteur et l'environnement extérieur. Ainsi, la simulation d'A/D ou de maintenance devient plus réalistes,
- optimiser les actions de l'opérateur : différentes manières de saisir la pièce flexibles, différents placements de l'utilisateur dans l'espace de travail, etc. Ces optimisations se font en utilisant des techniques d'immersion de l'opérateur,
- faciliter l'apprentissage du personnel. Une opération optimisée peut être enregistrée et ensuite utilisée pour l'apprentissage du personnel afin de diminuer le temps d'A/D, par exemple,
- etc.

Par conséquent, la simulation des opérations d'A/D et de maintenance de pièces flexibles en RV est un moyen très efficace offrant au concepteur la possibilité d'étudier une manipulation virtuelle en tenant compte des multiples contraintes de façon quantitative/qualitative, de considérer le comportement physique de pièces flexibles, d'optimiser une séquence d'A/D en se basant sur des données réalistes de simulations temps réel en RV. Cependant, ceci ne peut être atteint que si un composant flexible en question est correctement représenté du point de vue de son comportement mécanique complexe, d'où la nécessité de l'intégration de modèles mécaniques fidèles, mais suffisamment rapides, de pièces flexibles dans un environnement de simulation des opérations d'A/D virtuels.

Il faut également noter que l'utilisation des dispositifs de RV facilite l'étude et l'optimisation de systèmes mécaniques lors de la conception simultanée/intégrée. Avec la confrontation de différents acteurs, la recherche de solutions prenant en considération différents points de vue et la satisfaction de multiples contraintes métiers intervenant dans le processus d'élaboration du produit deviennent plus faciles. Notamment, la manipulation directe d'une pièce flexible, la visualisation immersive de son

état déformé, le contrôle dynamique de contraintes de conception, d'ergonomie, etc. associées à la manipulation donnée permettent de faire intervenir différents concepteurs, experts dans leurs domaines, qui peuvent donc travailler de façon intégrée, plus constructive et efficace.

1.3.5. Analyse des méthodes d'A/D virtuel

L'assemblage virtuel représente un outil performant, alternatif et complémentaire aux approches (semi-)automatiques de simulation des opérations d'A/D. Cet outil propose les fonctionnalités particulières comme l'interaction avec des objets virtuels, la visualisation temps réel du processus et des résultats de simulations des opérations d'A/D et de maintenance avec l'étude possible d'un processus de désassemblage particulier, la possibilité d'évaluer localement mais plus finement une opération donnée en temps réel en se basant sur des critères quantitatifs et qualitatifs, etc.

Parmi des approches courantes de simulation d'A/D virtuel (approches interactives, non-interactives) présentées dans les sections précédentes, ce sont les méthodes interactives qui présentent un intérêt particulier pour des évaluations plus complètes des opérations d'A/D et de maintenance. En effet, ces méthodes comportent des techniques d'interaction directe avec un objet virtuel (sa manipulation, sa perception en terme d'efforts appliqués,...), la visualisation du processus de manipulation et les de simulations associées, le contrôle d'interférences, la prise en compte d'un comportement mécanique des pièces au cours de la manipulation, l'immersion totale d'un être humain afin de prendre en considération la présence d'un opérateur, etc. De plus, la possibilité d'évaluation quantitative/qualitative et directe du processus et des résultats de simulation d'A/D virtuel par différents acteurs concernés par le développement d'un produit ouvre des horizons pour l'intégration des outils de simulation virtuelle dans différentes phases de la conception tout au long du processus de développement simultané, intégré.

Ainsi, les résultats de manipulations virtuelles et notamment, de simulation des opérations d'A/D et de maintenance peuvent être utilisés dans le processus d'optimisation d'un produit dès les premières phases du développement sans la fabrication de nombreux prototypes physiques très coûteux en termes de temps et de prix, en réduisant les tests d'A/D. Cependant, les résultats de ces simulations doivent être réalistes afin de pouvoir les utiliser dans les optimisations des caractéristiques du produit et des opérations requises pour la production, la maintenance, etc. En particulier, cet aspect de validation de résultats, l'utilisation des résultats réalistes dans l'étude/optimisation des opérations d'A/D et de maintenance devient un problème important pour des industriels lorsqu'il s'agit de la simulation des opérations d'A/D de systèmes mécaniques contenant des pièces déformables comme des tuyaux flexibles, des durits, des câbles, des anneaux élastiques, des tôles, etc.

En ce qui concerne la simulation des opérations d'A/D et de maintenance de pièces flexibles, la simulation correcte de ces opérations ne peut plus être réalisée par une simple manipulation d'un objet à caractère rigide avec la génération de mouvements séquentiels et linéaires. Dans ce cas, c'est la modélisation d'un comportement physique de pièces flexibles qui est mise en jeu. En effet, l'étude et l'amélioration des opérations d'A/D, de maintenance, etc. du point de vue de la conception, de l'assemblabilité, de la maintenabilité, de l'ergonomie, les modifications éventuelles au niveau de la géométrie et du matériau de pièces flexibles ainsi que les modifications « locales » de géométrie de l'environnement, le contrôle des interférences entre une pièce flexible et son environnement extérieur, la génération de trajectoires réalistes d'A/D, etc. supposent la génération de la géométrie déformée et des efforts à développer réalistes associés à la pièce déformable. Les valeurs réalistes de ces caractéristiques ne peuvent être obtenues qu'à partir d'une modélisation correcte du comportement de pièces flexibles. Ceci nécessite donc l'intégration de modèles physiques de telles pièces flexibles dans un environnement de simulation des opérations d'A/D virtuel.

En effet, deux aspects importants sont mis en jeu lors de la manipulation de pièces flexibles dans un environnement de RV : la modélisation d'un comportement réaliste de pièces flexibles au cours de leur manipulation et la génération d'informations associés à la géométrie déformée de ces pièces ainsi qu'aux efforts requis en temps réel. Ainsi, les modèles mécaniques de pièces flexibles doivent être suffisamment rapides afin d'assurer la fluidité des images durant la simulation virtuelle. Malheureusement, il n'y a que peu d'approches parmi des systèmes actuels de simulations des opérations d'A/D virtuel qui incorporent un modèle rapide de comportement mécanique de pièces flexibles. Ces approches, essentiellement basées sur des modèles de comportement de pièces

déformables dans le domaine des petits déplacements ou sur des modèles mécaniques simplifiés de pièces flexibles travaillant le domaine de grands déplacements, seront présentées au chapitre 2. Notons, néanmoins, que ces approches ne répondent pas ou ne répondent que partiellement aux problèmes de simulation de pièces flexibles évoqués dans les sections précédentes.

1.4. Conclusions

L'utilisation maintenant habituelle de la CAO au sein d'une entreprise, l'exploitation de plus en plus courante d'une maquette numérique dans l'industrie, le besoin d'aller toujours plus vite à moindre coût dans la conception d'un produit stimulent les ingénieurs et les chercheurs pour le développement d'outils logiciels toujours plus performants. Notamment, les outils utilisés couramment en conception permettent de créer une représentation tridimensionnelle d'un nouveau produit, de modéliser son comportement, de vérifier/optimiser certains aspects conceptuels et donc, de valider le produit avant même de le fabriquer. Désormais, la simulation basée sur l'utilisation d'une maquette numérique intervient tout au long du processus de développement d'un produit dès les premières phases de conception jusqu'à la vente : la modélisation mécanique des structures, la simulation des mécanismes, le calcul de phénomènes très complexes comme le crash ou l'aérodynamisme, la génération des gammes de fabrication, la simulation des opérations d'usinage et d'A/D, etc.

Parmi ces outils actuels de CAO/CFAO, la RV occupe une place de plus en plus considérable : elle propose aux concepteurs non seulement la visualisation réaliste d'un produit numérique complexe par exemple pendant la revue d'un projet, mais aussi permet de simuler et d'optimiser certaines actions ou opérations difficilement modélisables et contrôlables en utilisant des outils habituels de CAO. Notamment, la RV offre des fonctions particulières comme la modélisation d'environnements extérieurs complexes dans lesquels le produit virtuel sera placé, la possibilité d'interagir avec des objets virtuels et même de percevoir certaines de leurs propriétés, l'immersion dans un monde virtuel, l'étude et l'analyse d'un comportement complexe d'une structure en temps réel lors de sa manipulation virtuelle, etc.

Le principal avantage de l'utilisation des outils de CAO et de RV dans le développement d'un nouveau produit est la réduction forte du nombre de tests liés à la vérification/optimisation du futur produit comme les tests de résistance, les études d'accessibilité, l'optimisation des opérations d'A/D. Par conséquent, une telle réduction entraîne une diminution importante du nombre de prototypes physiques à fabriquer, ce qui permet de réduire considérablement le temps et le coût du cycle de développement du produit en augmentant constamment sa qualité [Gomes & al. 1998], [Chedmail & al. 2001]. Auparavant, il était nécessaire de créer dans certains cas jusqu'à 80 prototypes physiques pour des tests divers afin de pouvoir valider entièrement un nouveau modèle d'avion (d'après des données de Dassault Aviation). Maintenant ce chiffre est fortement diminué. Le groupe PSA a des objectifs de réduire de trois à de deux ans le temps de développement d'un nouveau modèle de véhicule (d'après le chef de projet J.-J. Urban-Galindo [PSA 2004]). La création d'une représentation entièrement numérique d'un produit améliore aussi la qualité des relations entreprise-fournisseurs. Par exemple, toujours chez le PSA, grâce au partage des données associées au produit représenté sous forme virtuelle (maquette numérique), les concepteurs ont la possibilité de bénéficier d'un savoir-faire des fournisseurs en travaillant en parallèle avec eux sur un projet donné en temps réel. Les gains sont évidents : la diminution de temps et de coût de développement du produit, ce qui est important pour celui qui conçoit et fabrique dans le contexte de compétitivité globale.

Les fonctionnalités offertes par la RV, la possibilité de partage des données sous forme numérique, la résorption de la distance entre les différentes unités de l'entreprise permettent maintenant de parler d'ateliers et d'usines virtuels. Par exemple, le groupe PSA a fait un choix stratégique qui consiste à passer à un niveau plus évalué dans le processus de développement du produit, ce qui par ailleurs a déjà apporté ses fruits. La simulation des ateliers virtuels grâce à des technologies d'usine numérique plus le partage de la maquette numérique et l'échange/intégration des compétences des bureaux d'études des fournisseurs ont permis de diviser par deux les diverses anomalies du point de vue de leur nombre et de leur temps de résolution.

En ce qui concerne les applications d'assemblage, il est possible de construire une chaîne d'assemblage virtuelle (exemple d'un atelier numérique) et donc, de développer le produit et en même

temps que son processus de fabrication. Cela permet en conséquence d'identifier, de prévoir des difficultés de fabrication bien avant la phase de lancement effectif de production et ainsi d'éviter leur résolution souvent trop coûteuse lorsque les moyens de production sont déjà mis en place. En simulant le processus d'assemblage virtuellement, il est facile de vérifier l'accessibilité à tel ou tel composant, d'estimer le temps de passage d'un poste de travail à l'autre, de prendre en compte des aspects ergonomiques et même de s'assurer dans le cas d'assemblage robotisé que les mouvements des robots sont possibles et optimiser ces mouvements.

Toutefois, malgré les avantages particulièrement intéressants de la simulation virtuelle en ce qui concerne le développement d'un produit mécanique et l'élaboration parallèle des procédés de fabrication dans le contexte de concurrent engineering, il existe des contraintes spécifiques dues notamment à la conception d'un processus d'A/D. En effet, comme on l'a vu précédemment, les opérations d'A/D sont extrêmement diversifiées, un outillage à utiliser lors d'une opération d'A/D dépend de sa nature (manuelle et nombre de mains ou de monteuses, robotisée), les composants à assembler sont à caractère rigide ou déformable et peuvent subir une déformation considérable lors de la phase de manipulation. Il existe également un problème de choix en ce qui concerne le placement du monteuse, la manière dont l'opération sera réalisée, les différentes possibilités de saisir une pièce à assembler, etc. Ainsi, il convient de noter que l'A/D virtuel est caractérisé par un haut niveau d'interactivité dû à la diversification des techniques d'assemblage, des composants ainsi qu'au facteur humain.

A ce jour, il n'existe pas de simulateur virtuel permettant de prendre en considération les contraintes de simulation d'A/D énumérées ci-dessus. La plupart des outils de simulation d'A/D virtuel ne permettent que la réalisation des déplacements d'un objet virtuel à caractère rigide, une perception des propriétés physiques comme la rigidité ou le poids d'un objet virtuel déplacé, la perception d'efforts très approximatifs dus à des collisions avec des obstacles dans l'espace, la visualisation et l'immersion d'un être humain dans le monde virtuel. Jusqu'à présent, l'utilisation de tels outils fut suffisante pour le concepteur. Maintenant, l'objectif lors des études d'A/D basées sur la simulation virtuelle est de considérer en temps réel des phénomènes complexes ayant lieu pendant telle ou telle opération d'A/D. Notamment, on parle de plus en plus d'un besoin de quantifier de manière adéquate la déformation des composants durant leurs manipulations virtuelles, d'évaluer rapidement et correctement des paramètres mécaniques mis en jeu durant de telles manipulations, de permettre d'extraire et d'exploiter efficacement une information réaliste issue de ces manipulations dans l'étude et l'analyse plus approfondies ainsi que l'optimisation du processus d'A/D et de maintenance.

Compte tenu de ces besoins industriels forts, formulons ainsi l'objectif de cette thèse. Les travaux de la présente thèse ont pour le but de :

- proposer une méthodologie générale pour la simulation des opérations d'A/D et de maintenance virtuelles de pièces déformables. Cette méthodologie doit :
 - contenir toutes les étapes importantes à suivre dès la phase de définition des objectifs de simulation d'A/D jusqu'à la phase d'analyse des résultats et l'optimisation du processus d'A/D,
 - tenir compte des réalités industrielles comme l'utilisation complémentaire des outils classiques de CAO, la réalisation d'expérimentations si nécessaire et à moindre coûts, etc.,
 - permettre à des concepteurs d'étudier/analyser/optimiser une opération d'A/D virtuelle donnée d'une pièce déformable à partir d'un certain nombre de paramètres d'évaluation d'A/D à fournir par le système de simulation virtuelle,
- contribuer au développement de méthodes permettant la modélisation réaliste et rapide d'un comportement de pièces flexibles subissant un changement important de forme au cours de leur manipulation d'A/D virtuel. De ce fait, il convient de :
 - s'appuyer sur une modélisation mécanique afin de pouvoir considérer de façon réaliste des changements de forme des pièces souples, notamment, des composants modélisés par une poutre flexible soumise à des grands déplacements géométriquement non-linéaires,

- tenir compte de l'importance du temps de calcul au cours de la modélisation numérique qui représente la contrainte principale de toute simulation en RV,
 - considérer l'aspect d'intégration des modèles mécaniques et, en particulier, le modèle de poutres flexibles dans un système de simulation de RV. Une telle intégration se résume à l'adaptation du modèle mécanique à des interfaces couramment utilisées en RV, notamment, la différenciation entre les données d'entrée/sortie et la modélisation des conditions aux limites,
- proposer aux fabricants des interfaces de RV une stratégie de développement de nouveaux dispositifs de RV afin de pouvoir réaliser efficacement et le plus naturellement possible une simulation d'A/D virtuelle. Une telle stratégie est basée sur :
 - la prise en compte de la nature d'une action physique réalisée par un être humain et donc transmise le plus naturellement possible à un objet virtuel rigide ou déformable,
 - la prise en compte du comportement particulier des objets déformables très peu considéré jusqu'au présent,
 - développer un outil logiciel (démonstrateur basé sur un modèle mécanique de pièces de type poutres flexibles) qui doit :
 - tenir compte de certains aspects de la méthodologie de simulation des opérations d'A/D de pièces flexibles,
 - permettre aux concepteurs d'étudier/analyser de manière adéquate et rapide une manipulation d'A/D donnée à partir des paramètres réalistes fournis. En particulier, le démonstrateur doit être utilisé pour la planification et l'optimisation de trajectoires d'A/D réalistes au cours de la manipulation de pièces virtuelles flexibles,
 - tenir compte de la diversité des opérations d'A/D (manipulation à une ou deux mains), la nature des différentes données d'entrée générées par les interfaces de RV, la contrainte de simulation temps réel, etc.

Chapitre 2

Réalité virtuelle : méthodes et modèles

Table des matières

2.1. Réalité virtuelle (RV) : objectifs, concepts, applications	52
2.1.1. Introduction	52
2.1.2. Historique du développement de la RV	52
2.1.3. Objectifs de la RV	53
2.1.4. Concepts utilisés dans la RV	54
2.1.4.1. Principes de fonctionnement d'un système de RV	54
2.1.4.2. Modélisation d'un monde virtuel	56
2.1.4.3. Concept d'interfaces en RV	58
2.1.5. Principales applications de la RV	60
2.2. Interfaces de manipulation d'objets pour l'A/D virtuel	62
2.2.1. Introduction	62
2.2.2. Interfaces de contrôle en position	63
2.2.2.1. Principe d'un contrôle en position	63
2.2.2.2. Interfaces motrices	64
2.2.2.3. Interfaces sensorielles	69
2.2.3. Interfaces de contrôle en effort	71
2.2.3.1. Principe d'un contrôle en effort	71
2.2.3.2. Interfaces sensori-motrices à retour d'effort	73
2.2.3.3. Interfaces sensorielles	75
2.2.4. Définition des espaces des configurations et des efforts	75
2.2.4.1. Espaces des configurations	76
2.2.4.2. Espaces des efforts	77
2.2.4.3. Parallèles entre le contrôle en position/effort et la manipulation d'un objet virtuel dans différents espaces	77
2.2.5. Analyse des concepts de manipulation d'objets	79
2.3. Modèles de représentation d'objets virtuels déformables	83
2.3.1. Introduction	83
2.3.2. Modèle basé sur une méthode d'éléments finis	84
2.3.3. Modèle basé sur une méthode de cinématique inverse	87
2.3.4. Modèle masses-ressorts	88
2.3.5. Modèle basé sur une minimisation de l'énergie de déformation	90
2.3.6. Modèle basé sur une approche « duale »	92
2.3.7. Analyse des modèles d'objets déformables	94
2.4. Conclusions	96

2.1. Réalité virtuelle : objectifs, concepts, applications

2.1.1. Introduction

Le développement efficace d'un produit, i.e. compte tenu de ses coûts et des temps d'industrialisation, n'est plus envisageable sans l'ordinateur. Désormais, les activités liées au développement d'un produit au sein des entreprises sont fortement informatisées. On voit que l'informatique intervient dès les premières phases de conception du produit à travers des vidéoconférences, des échanges de données via des réseaux entre des concepteurs jusqu'à la vente d'un produit encore entièrement virtuel, en passant par la conception proprement dite du produit, la modélisation de son comportement et l'optimisation de ces caractéristiques sans fabriquer des prototypes, la simulation des opérations d'usinage, d'assemblage, de maintenance et même, la conception de l'architecture des ateliers d'une usine.

Comme on l'a vu dans le chapitre précédent, certaines activités, liées notamment à l'assemblage, la maintenance, etc., ne peuvent être finement étudiées et optimisées qu'en considérant des paramètres particuliers et des contraintes supplémentaires du produit et du processus comme le comportement complexe de ce produit ainsi que celui d'un être humain, les interactions entre le produit et l'homme qui fabrique ce produit mais aussi, l'homme qui l'utilisera, les interactions entre le produit et son environnement, les contraintes de métiers, etc. Une des solutions vis-à-vis de ce problème est l'utilisation de la RV dans l'étude/optimisation du produit à travers des activités associées au développement, à l'industrialisation et au suivi de ce produit. Par exemple, la fonction d'assistance de la RV est très intéressante, complémentaire, pertinente dans les études des opérations d'A/D et de maintenance d'un produit virtuel à caractère complexe.

Nous avons déjà illustré dans le premier chapitre des fonctionnalités principales, des avantages ainsi que des exemples d'utilisation de la RV dans l'étude des opérations d'A/D et de maintenance. En particulier, un intérêt de la RV dans la simulation des opérations d'A/D de pièces à caractère flexible a été montré. Dans ce chapitre nous allons parler des concepts de base de la RV du point de vue informatique, des méthodes utilisées dans la manipulation d'objets virtuels et d'un certain nombre de problèmes des interfaces en RV. Ces informations nous permettront d'analyser certains aspects de la RV et, en particulier, de montrer de différentes contraintes à prendre en compte lors d'une modélisation du comportement physique de pièces flexibles en utilisant des dispositifs actuels de RV. Ainsi, des notions d'espaces – espaces des configurations et des efforts – seront introduites à partir de l'étude des interfaces de manipulation d'objets en RV. Ceci nous permettra d'établir un lien entre deux aspects de simulation d'objets déformables sur lesquelles ce travail de thèse est basé : la mécanique et l'informatique. Enfin, des modèles de simulation rapide d'un comportement de pièces déformables, modèles utilisés actuellement dans le domaine de la RV, seront présentés et discutés.

2.1.2. Historique du développement de la RV

Les principes de simulation par ordinateur – nécessité d'établir un « dialogue » entre l'homme et la machine – ont été formulés par I. Sutherland dans les années soixante. En effet, il s'agissait d'une première interface graphique GUI (Graphic User Interface) entre l'homme et l'ordinateur, un système basé sur la construction d'une fenêtre graphique [Sutherland 1963]. La fin des années soixante a été marquée par l'apparition d'une première interface matérielle d'interaction entre l'homme et l'ordinateur – une souris – afin de pouvoir créer un événement, « exprimer » ses désirs par un simple mouvement de la main. Mais le développement d'une partie logicielle ne s'arrête pas au simple affichage d'un événement : des logiciels conçus pour la navigation dans un monde virtuel visualisé sur un écran commencent à apparaître.

Le premier dispositif, représentant un casque avec deux mini-écrans et permettant d'observer une scène virtuelle, a été réalisé par D. Vickers de l'Université d'Utah au début des années soixante-dix [Fuchs & al. 2001]. Ceci fut un fondement de la RV : la visualisation des objets 3D et l'immersion dans un monde virtuel. Mais la curiosité d'un être humain va plus loin, au-delà de l'imagination et de l'immersion. L'homme veut simuler un futur, un comportement d'objets virtuels, avec le toucher et la manipulation de ces derniers. Ainsi, de nouvelles méthodes mathématiques et numériques sont

apparues dans les années soixante-dix – quatre-vingt : éléments finis, volumes finis, calculs de vibrations, d'écoulement, etc. Grâce aux outils de plus en plus performants, l'homme peut désormais simuler, visualiser, prédire le comportement de structures complexes.

Dans les années quatre-vingt, la symbiose de l'informatique, de l'imagerie, de la robotique, de l'automatique et surtout, de l'imagination d'un être humain a fait émerger un nouvel outil – le gant de données – un dispositif permettant de mesurer les mouvements des doigts de la main de l'homme pour déplacer des objets virtuels. Ensuite, des systèmes haptiques, permettant de restituer le toucher un objet virtuel et de percevoir des efforts commencent à apparaître. Au début des années quatre-vingt-dix, T. Massie, doctorant du MIT, a inventé un système haptique PHANToM [Massie & al. 1994]. Ce mécanisme ressemblait à une lampe articulée de bureau munie de trois moteurs et possédant à son extrémité soit une capuche en cuir pouvant accueillir un doigt, soit un stylet manipulable à la main. L'utilisateur pouvait donc « sentir » des objets en bougeant un ensemble articulé par un doigt inséré dans la capuche.

Enfin, le terme *réalité virtuelle* (de l'expression anglaise *virtual reality*) a été proposé par J. Lanier, chercheur et artiste américain, à la fin des années quatre-vingt. Depuis le début des années quatre-vingt-dix, ce terme a été diffusé et largement employé dans le monde.

Dès les premières tentatives de faire dialoguer la machine et l'homme, et notamment, ces techniques d'affichage, sont évaluées de manière significative : on peut rendre l'évaluation d'une scène graphique de plus en plus réaliste en utilisant des images de synthèse projetées sur des écrans géants d'une salle immersive ou tout simplement, créer une vision stéréoscopique aux yeux d'un homme portant des lunettes à cristaux liquides. Il en est même en ce qui concerne l'évaluation technologique des dispositifs haptiques qui seront présentés en détails par la suite. Mais on voit déjà qu'historiquement, dès sa naissance, la RV est centrée sur l'homme qui occupe une place principale dans la RV et donc, détermine le développement des applications de la RV en fonction de ces besoins.

2.1.3. Objectifs de la RV

La fonctionnalité de base de la RV est une représentation graphique d'objets 3D avec ou sans l'immersion d'un être humain dans un environnement virtuel. Néanmoins, la principale différence entre la visualisation « simple » d'objets tridimensionnels complexes (la CAO, certains jeux vidéos, etc.) ou de scènes virtuelles (les applications liées au domaine des beaux-arts ou du cinéma, par exemple), où les fonctions d'observation, de contrôle visuel, etc. sont attribuées à l'homme, et la RV est la possibilité de manipuler des objets placés dans un environnement virtuel, d'interagir avec ces objets, les sentir en temps réel. Donc, l'objectif principal de la RV est de proposer à l'homme une fonction supplémentaire et très utile : l'interaction avec des objets ou un environnement virtuels à étudier. Ainsi, en utilisant cette fonction, l'homme devient un véritable acteur, créateur d'événements artificiels, participant à ces événements et les étudiant en temps réel.

Ainsi, les principaux objectifs de la RV aidant à générer et à étudier différents événements virtuels, y compris dans le domaine mécanique, sont d'offrir à l'homme des fonctions de :

- **Visualisation.** C'est une fonction de base de la RV permettant l'affichage d'un événement virtuel en temps réel. Un événement virtuel peut se produire par l'évaluation d'une scène virtuelle composée soit d'objets uniquement virtuels, soit avec la combinaison d'objets virtuels et réels, etc. Dans ce dernier cas, on parle de *réalité augmentée*. La fonction de visualisation peut être considérée comme un aspect de l'immersion qui a pour principe de faire appel aux sens de l'utilisateur (vue, toucher, ouïe, ...) à différents niveaux.
- **Interaction.** Cette fonction permet à l'utilisateur d'agir dans un monde virtuel, d'interagir avec ce monde représenté (modélisé) par un ensemble d'objets virtuels, i.e. créer des événements, générer différentes actions en déplaçant des objets virtuels, par exemple, toucher ces objets, percevoir certaines caractéristiques physiques (poids, efforts, ...) au cours d'un événement virtuel, etc. Il faut souligner qu'il est nécessaire de pouvoir interagir avec des objets virtuels en temps réel. Des interfaces offrant une telle possibilité d'interactivité en temps réel et notamment, pour la simulation des opérations d'A/D et de maintenance virtuelles, seront présentées par la suite.
- **Immersion.** La fonction d'immersion d'un être humain dans un monde virtuel n'est pas obligatoire pour certaines études et applications en RV, mais elle est complémentaire et très

intéressante car elle permet de « plonger » l'homme dans un monde virtuel et donc, de rendre une manipulation virtuelle plus réaliste. Ceci est particulièrement apprécié dans le cas d'études des systèmes mécaniques complexes lorsqu'il est nécessaire d'interagir avec un objet virtuel donné, caché par d'autres objets, d'évaluer le positionnement d'objets virtuels en question ou d'étudier l'ergonomie de l'environnement virtuel, de trouver un placement optimal d'un opérateur ou d'un robot par rapport à un système donné dans le cas d'optimisation du processus de fabrication ou d'assemblage. L'immersion d'un être humain peut se réaliser par des techniques donnant l'impression d'être présent vis-à-vis d'une scène virtuelle donnée (les visiocasques, des systèmes optiques,...) ou en utilisant un mannequin virtuel qui évolue dans le monde virtuel en représentant l'opérateur.

- **Simulation.** Cette fonction doit permettre à l'homme de modéliser et étudier un comportement d'objet virtuel ou même des relations de cet objet avec son environnement afin d'éviter des situations délicates, dangereuses, comme l'impossibilité de se placer dans des zones radioactives, par exemple, ou d'évaluer la fatigue d'un ouvrier effectuant des opérations difficiles d'assemblage. La fonction de simulation permet aux ingénieurs ou chercheurs de mieux comprendre un phénomène physique (la synthèse nucléaire, le crash d'un véhicule, etc.) ou de prendre en considération un comportement physique complexe d'un objet à étudier lors de sa manipulation (l'opération chirurgicale sur un organe d'un être humain, l'étude des opérations de maintenance des systèmes mécaniques comprenant des pièces flexibles, etc.). Comme on l'a déjà vu dans le chapitre précédent, il est souhaitable de pouvoir produire et visualiser le processus et les résultats d'une simulation d'un phénomène physique en temps réel.
- **Assistance/Evaluation.** C'est une fonction d'aide à la compréhension d'un événement virtuel simulant un phénomène réel, à la prise de décision lors de l'étude d'un système et de son fonctionnement, etc. Ceci permet d'évaluer et d'optimiser certains paramètres d'un système en temps réel sans des démarches complémentaires comme la fabrication de prototypes physiques, des tests supplémentaires sur ces prototypes, etc. En particulier, l'assistance de la RV dans l'étude/optimisation d'un système, une revue d'un projet, etc. est très appréciée lorsqu'il s'agit de la prise en considération de nombreuses contraintes de différents acteurs/métiers pour faciliter le processus de développement d'un produit qui n'est pas encore matérialisé.
- **Apprentissage.** Cette fonction est nécessaire non seulement pour montrer, expliquer au public concerné comment un phénomène se produit, un système fonctionne ou un processus se réalise, mais aussi permettre d'apprendre certains gestes, de former des personnes pour des opérations délicates, etc.

2.1.4. Concepts utilisés dans la RV

A ce jour, de nombreux travaux en RV se résument par leur caractère multidisciplinaire : informatique, mathématiques, robotique, automatique, mécanique, psychologie, ergonomie, philosophie... Cependant, le résultat de ces travaux mène à la création et à l'interaction en temps réel de trois éléments clés afin de produire une simulation virtuelle (Figure 2.1) : *utilisateur, monde virtuel et interfaces intermédiaires*. Nous nous intéressons dans cette section aux principes de fonctionnement d'un système de RV, puis nous présentons les principaux concepts utilisés dans la RV.

2.1.4.1. Principes de fonctionnement d'un système de RV

L'interaction des principaux éléments nécessaires pour générer un événement virtuel peut se résumer généralement de la façon suivante :

1. La génération d'une action de l'utilisateur dans le monde réel.
2. La « traduction » de cette action en données d'entrée à l'aide d'interfaces de RV (ou périphériques).

3. La transmission de ces données d'entrée à un module logiciel qui commande l'évaluation d'une scène dans le monde virtuel.
4. Le calcul d'un nouvel événement virtuel et donc, la génération de données de sortie dans l'environnement de RV.
5. La « traduction » et la transmission de données de sortie à l'utilisateur à l'aide d'interfaces de RV (périphériques).
6. La perception des données de sortie (résultats de la simulation virtuelle) par l'utilisateur.

En effet, afin de produire une simulation en RV, un utilisateur doit interagir avec des objets définis dans un monde virtuel. Pour cela, l'utilisateur produit des actions qui sont « traduites » et transmises aux objets à manipuler dans un environnement de RV à l'aide d'interfaces (Figure 2.1). Ces actions sont produites physiquement et donc, l'utilisateur agit dans le monde réel. Les actions de l'utilisateur à appliquer aux objets virtuels en question sont « traduites » en fonction de l'objectif à atteindre et donc en fonction de l'interface utilisée, par exemple, l'application d'efforts aux objets virtuels avec ou sans la prise en compte de leurs propriétés physiques, la génération de mouvements d'objets virtuels et donc la définition de déplacements imposés, etc. Alors, toutes ces informations forment des données d'entrée générées à l'aide d'interfaces de contrôle (ou interfaces comportementales).

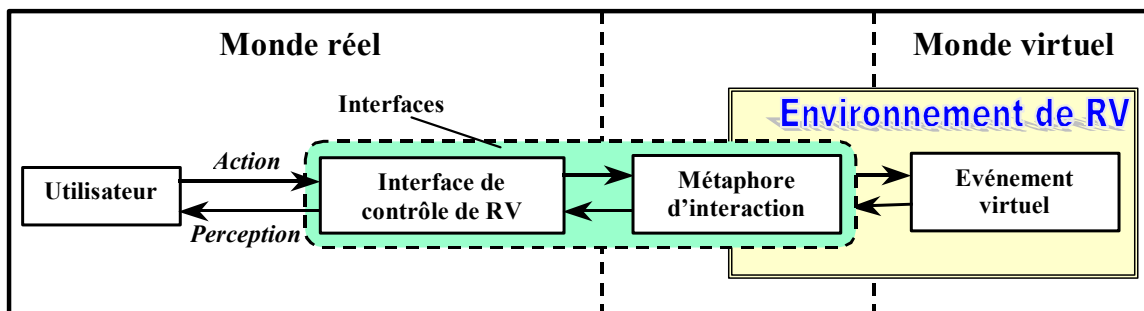


Figure 2.1. Schéma conceptuel de relation entre un utilisateur et un événement virtuel.

Les données d'entrée sont « traduites » par des interfaces, en temps réel, en données géométriques ou efforts avec un certain facteur d'échelle, i.e. en information « compréhensible » pour un logiciel qui commande l'évaluation d'une scène virtuelle. Finalement, compte tenu de la nature des données d'entrée « transmises » aux objets virtuels, un événement virtuel est créé et visualisé : la génération de mouvements d'un objet donné dans un environnement de RV, le calcul d'une forme déformée de cet objet, l'évaluation d'actions mécaniques lorsque l'objet manipulé entre en collision avec son environnement virtuel, l'estimation d'efforts à transmettre à l'utilisateur compte tenu des propriétés physiques de l'objet manipulé, etc. Cette information représente des données de sortie et doit être produite en temps réel.

Ainsi, des données de sortie (le résultat de la simulation) sont à leur tour « traduites » et transmises à l'utilisateur qui va les interpréter selon différentes perceptions : visuelle, haptique, etc. (Figure 2.1). Une telle perception se résume souvent à la visualisation d'une nouvelle scène virtuelle (les mouvements de l'objet manipulé, éventuellement la forme déformée de cet objet, la position relative d'objets manipulés et de mannequin virtuel par rapport aux autres éléments de l'environnement virtuel,...), la perception sensorielle de caractéristiques physiques associées à un objet virtuel donné ou/et à un événement virtuel calculé (le poids et la rigidité de l'objet virtuel manipulé, les efforts associés au déplacement ou à la déformation de cet objet, les actions de contact entre l'objet manipulé et son environnement,...), etc. En conséquence, l'utilisateur effectue le contrôle perceptif de l'événement virtuel et donc, indirectement, de ces propres actions.

En fonction des résultats de la simulation, l'utilisateur peut continuer à développer ces actions s'il estime que les résultats de simulation sont cohérents par rapport à l'objectif recherché (évidemment, avec une certaine subjectivité concernant ces propres actions). Dans le cas contraire, i.e. les résultats de simulation virtuelle lui semblent incohérents, l'utilisateur peut « corriger » ses propres actions, en restant toujours en interaction avec le monde virtuel. Chaque nouvelle action de

l'utilisateur va bien évidemment générer la même séquence d'opérations lors de l'interaction avec les objets virtuels : toute action sera « traduite » et transmise à l'environnement de RV qui produira un nouvel événement virtuel et fournira des informations de sortie qui représentent les données de retour. Il faut souligner que cette séquence d'opérations doit s'effectuer en temps réel afin d'assurer la fluidité des événements et des résultats visualisés, de garantir la perception adéquate des données de sortie et donc, de préserver l'illusion d'interagir « naturellement » avec des objets en étant immergé dans un monde virtuel.

Le principe de fonctionnement de systèmes de RV présenté mène à une définition de la RV. Il existe de nombreuses définitions de tels systèmes. En effet, la plupart des définitions de la RV se résument à la distinction entre les objectifs à atteindre, à des particularités des interfaces de RV utilisées, à des spécificités des domaines d'application. Une définition de la *réalité virtuelle* donnée par P. Fuchs synthétise très bien les principes de fonctionnement du système de RV présentés [Fuchs & al. 2001] : « *La réalité virtuelle est un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs* ». Nous allons présenter deux concepts principaux utilisés dans la RV et liés à deux éléments identifiés ci-dessus : un *monde virtuel* et des *interfaces de RV* incluant des interfaces *comportementales*.

2.1.4.2. Modélisation d'un monde virtuel

La modélisation d'un monde virtuel est en premier lieu une modélisation d'un événement réel soumis à un certain nombre d'hypothèses du point de vue de l'informatique, la physique, etc. ainsi qu'à des contraintes technologiques. La conception d'un environnement virtuel dépend d'une application donnée [Fuchs & al. 2001]. Pourtant, on peut trouver quelques concepts généraux de création d'un environnement virtuel, parmi lesquels les aspects de représentations *graphique* et *comportementale* d'un environnement virtuel sont les plus importants. Nous allons les considérer dans cette partie de façon synthétique.

Représentation graphique

La représentation graphique (ou visuelle) d'un monde virtuel est une fonctionnalité très importante de la RV car elle permet de visualiser à un instant donné une scène, un objet et un événement virtuels. Cette visualisation se repose sur la représentation géométrique des objets virtuels. En CAO il existe différentes techniques de description de la géométrie des objets 3D qui se résument essentiellement à la représentation de la frontière de l'objet : la représentation B-Rep (Boundary Representation) à l'aide de surfaces NURBS [Léon 1991]. Cependant, l'utilisation de ces principes dans la RV est restreinte à cause du temps important de génération des images lié aux capacités limitées des cartes graphiques des ordinateurs. De ce fait, les environnements 3D, i.e. les scènes et les objets virtuels, sont actuellement modélisés en réalité virtuelle par un ensemble de facettes planes (modèles polyédriques) [Peroche & al. 1998], [Fuchs & al. 2001].

En ce qui concerne l'utilisation de la RV dans le processus de développement d'un produit mécanique, la représentation géométrique du produit dans un environnement de RV est souvent réalisée à partir des modèles CAO (surfâciques, volumiques) créés au fur et à mesure des différentes phases de conception. Alors, ces modèles géométriques doivent être facettisés : ceci nécessite des transferts multiples de données entre les modeleurs CAO et les environnements de RV, des transferts accompagnés souvent par des pertes d'information. Néanmoins, la création d'un monde virtuel à partir de modèles CAO ne se limite pas au seul transfert de données (bien évidemment, il existe différents modes de création de mondes virtuels comme la digitalisation, puis la reconstruction d'un volume à partir de celle-ci [Lorensen & al. 1987], [Mencl & al. 1998]). Actuellement, les industriels s'intéressent de plus en plus à l'efficacité de l'exploitation des modèles transférés (ou maquettes virtuelles) en vue de leur utilisation dans diverses simulations, des revues de projet, etc. Ces besoins industriels conduisent à l'élaboration de modèles particuliers d'un environnement virtuel, adaptés en fonction de leur utilisation ultérieure. Ainsi, le processus de création de différents modèles virtuels adaptés à partir d'une maquette virtuelle générale ou un modèle CAO de base suppose l'élaboration

d'une méthodologie particulière concernant la préparation de données. La thèse de G. Drieux effectuée au laboratoire 3S de Grenoble traite certains éléments de ce problème [Drieux & al./1 2003].

Certains problèmes liés à l'élaboration d'un environnement virtuel pour la simulation des opérations d'A/D et à l'intégration de modèles physiques de pièces flexibles seront discutés plus en détails au chapitre 3. Cependant, nous pouvons déjà souligner l'importance de la création de tels modèles virtuels et notamment, de modèles adaptés à la simulation du comportement de pièces flexibles dans un environnement de RV.

Afin de pouvoir visualiser et manipuler efficacement les objets virtuels 3D, des algorithmes traitant le comportement des objets face à la lumière sont également utilisés [Bouatouch & al. 1996], [Fuchs & al. 2001]. Notons simplement que ces algorithmes ont pour objectif d'éliminer des faces cachées d'un objet virtuel, de calculer l'éclairage des propriétés optiques de sources de lumière et de l'objet, etc. et que l'élaboration des algorithmes d'éclairage est également contrainte par les limites technologiques des cartes graphiques.

Représentation comportementale

Elle concerne l'évolution dynamique d'une scène virtuelle en utilisant des méthodes de *programmation* ou d'*animation* du comportement d'objets virtuels ou en se basant sur des méthodes d'*interaction directe* avec des objets.

Les méthodes de programmation/animation représentent l'évolution d'objets et de scènes virtuels en temps réel sans/avec la modélisation d'un comportement réaliste des objets virtuels [Steketee 1985], [Arnaldi 1988], [Watt 2000], [Fuchs & al. 2001]. Ces méthodes utilisent essentiellement :

- des techniques basées sur la création d'animations à partir d'une interpolation des configurations de référence comme le keyframing, par exemple;
- des techniques de type skinning, i.e. une animation d'objets et de personnages virtuels représentés par un système « peau – squelette » : on associe un comportement visuellement « naturel » (par une capture de mouvements d'un être humain, par exemple) au squelette d'un objet virtuel. Ainsi, au cours d'une animation, les mouvements temps réel du squelette entraînent la déformation de la peau liée au squelette, ce qui donne l'impression qu'un personnage virtuel produit des mouvements « naturels » ;
- une animation temps réel générée à partir d'une modélisation d'un phénomène physique. Une telle modélisation requiert généralement l'utilisation de lois physiques (comportement mécanique de pièces déformables, comportement de fluides, etc.) ou des données enregistrées au cours d'un événement réel (capture de déplacements, décollage/atterrissage et trajectoire d'un avion ou d'un vaisseau spatial, etc.). En se basant sur les lois physiques ou/et les données réelles, la simulation, fréquemment longue, du comportement d'un objet ou d'un système est calculée, par exemple, la simulation basée sur la méthode des éléments finis. A partir de cette simulation, des animations temps réel sont produites.

L'utilisation de méthodes d'animation d'objets virtuels est intéressante : ceci permet de visualiser un événement virtuel, comprendre un phénomène physique, etc. Par contre, toute modification d'un système avec des propriétés physiques entraîne la génération d'une nouvelle animation basée sur des simulations coûteuses en temps de calcul. De plus, certaines animations temps réel ne visualisent qu'une évolution d'une scène virtuelle sans faire appel aux modèles comportementaux physiques. En conséquence, ceci ne donne qu'une impression éloignée de la réalité.

Les méthodes d'interaction supposent que l'utilisateur interagit directement avec un objet virtuel dont l'évolution est inconnue. Donc, l'étude d'un comportement d'un objet ou d'un mannequin virtuels ne s'effectue que lors d'une manipulation virtuelle. La représentation réaliste du comportement d'un mannequin peut être obtenue par l'association de ce personnage virtuel avec un être humain en utilisant des interfaces de capture de mouvements [Chedmail & al. 2001]. Alors, les mouvements du mannequin, générés en temps réel, sont réalistes car le comportement de celui-ci est associé à l'opérateur. Par contre, la représentation d'un comportement réaliste d'un objet virtuel sans l'utilisation des capteurs de mouvement est plus délicate et dépend des objectifs de l'utilisateur, des hypothèses à mettre en œuvre. Par exemple, la génération de déplacements séquentiels d'un objet

virtuel représentant une pièce rigide ou un système constitué des solides indéformables reliés entre eux par des liaisons mécaniques, se réalise en temps réel généralement sans trop de difficultés [Cozot 1996]. Mais lorsqu'il s'agit de la représentation réaliste du comportement de systèmes complexes, comme des objets virtuels flexibles, l'intégration d'un modèle de comportement physique est nécessaire [Arnaldi 1988], [Dumont 1990], [Fuchs & al. 2001]. Par conséquent, le temps de calcul, qui est une contrainte principale pour la RV, peut devenir grand pour pouvoir effectuer une simulation temps réel. Donc, des modèles physiques adaptés doivent être utilisés afin de réduire le temps de calcul. En particulier, des exemples de modèles de comportement de pièces flexibles, nous intéressant dans le cadre de cette thèse, seront analysés par la suite.

Malgré la difficulté de certains modèles comportementaux en terme de temps de calcul pour une simulation virtuelle interactive, la manipulation d'objets virtuels par interaction directe présente un intérêt particulier. La simulation interactive est importante pour l'étude et l'amélioration des opérations d'A/D virtuels, car elle permet de produire rapidement la réponse du système étudié lors de la manipulation virtuelle et donc, d'analyser et d'optimiser des paramètres intrinsèques de ce système (dimensions, propriétés physiques, etc.) sans calculs préalables. Ainsi, cette méthode favorise l'analyse des caractéristiques d'un produit et la prise de décisions durant les différentes phases de développement du produit.

2.1.4.3. Concept d'interfaces en RV

Les interfaces sont des entités importantes pour chaque simulation virtuelle, des entités réalisant toute la communication entre l'homme et l'ordinateur (ou le système de RV). En effet, nous avons réuni dans les *interfaces de RV* toutes les interfaces que l'on peut trouver entre l'homme réalisant une tâche virtuelle (mais effectuant ses actions dans le monde réel) et le système de RV représenté par le monde virtuel (tous les calculateurs intégrés au système de RV, les algorithmes, etc., i.e. toute la partie logicielle lorsque le système de RV effectue les calculs associés à la simulation de l'environnement virtuel et de son comportement jusqu'à l'obtention de ces résultats).

Deux éléments principaux parmi les interfaces ont été distingués : les *interfaces de contrôle* de RV et les *métaphores d'interaction*. Nous allons les présenter ici de façon synthétique car des détails et des exemples de ces interfaces vis-à-vis de la simulation des opérations d'assemblage virtuel seront discutés par la suite.

Interfaces de contrôle de RV

Les interfaces de contrôle de RV ou les interfaces dites *comportementales* dans la définition de la RV de P. Fuchs sont des entités matérielles et composées d'interfaces sensori-motrices permettant à l'utilisateur de transmettre/percevoir ses actions à/à travers un système de RV ainsi que de les contrôler de façon intuitive, qualitative ou/et quantitative. Les activités sensori-motrices réalisées par l'homme utilisant une interface de contrôle de RV signifient que cet homme « perçoit et agit physiquement » [Fuchs & al. 2001]. Ainsi, il s'agit d'interfaces offrant à la fois une fonctionnalité d'interaction avec des objets virtuels mais aussi de perception. Il existe aujourd'hui beaucoup d'interfaces comportementales qui peuvent être classées, selon Fuchs, en trois catégories : les interfaces *motrices*, *sensorielles* et *mixtes*. De plus, comme dans le cas de la simulation d'un environnement virtuel, la conception et le choix des interfaces de contrôle dépendent de l'application de RV et des objectifs visés.

Chaque événement produit dans un monde virtuel en temps réel est lié aux actions réalisées par l'homme dans le monde réel. Alors, les interfaces motrices ont pour objectif de capter et de transmettre les actions de l'utilisateur à un système de simulation de RV via des entités interprètes appelées *métaphores d'interaction*¹, présentées ci-dessous. Ces actions peuvent être les déplacements d'une main, des mouvements corporels ou de la tête, la parole, les efforts produits par des muscles, etc. Donc, à travers des interfaces motrices, l'homme sollicite le système de simulation de RV qui, à son tour, génère en temps réel un événement virtuel associé aux actions de l'homme, en se basant sur des modèles et des algorithmes implémentés dans la partie logicielle de ce système de simulation. Des

¹ Le lecteur trouvera plus d'informations sur ce sujet dans [Fuchs & al. 2001]

souris 2D et 3D, des joysticks, des bras mécaniques articulés comme le dispositif haptique Virtuose déjà évoqué, des capteurs de mouvements ou de voix sont quelques exemples d'interfaces motrices.

Une fois un événement virtuel calculé (par exemple, une collision entre un objet déplacé et son environnement est détectée ou une nouvelle forme déformée d'une pièce souple est produite) ainsi que des paramètres associés à cet événement (des efforts, des paramètres particuliers à contrôler, etc.), il est nécessaire de les transmettre à l'homme pour les percevoir en temps réel afin de pouvoir contrôler ses actions et l'information produite par le système de RV. Alors, les interfaces sensorielles ont pour but de transmettre ces informations à l'utilisateur en temps réel à travers de stimuli. Des écrans d'ordinateurs ou d'une salle d'immersion, des casques d'immersion, des interfaces haptiques à retour d'effort ou tactiles, des signaux sonores, etc. sont quelques exemples illustrant des interfaces sensorielles permettant la perception d'une information de retour après la simulation virtuelle.

Il existe également des interfaces mixtes, appelées *sensori-motrices*, qui permettent de transmettre une information d'entrée, générée par l'utilisateur, à un système de RV, mais aussi qui génèrent en temps réel des stimuli sensoriels, renvoyés par le même système de simulation virtuel et perçus par l'utilisateur afin de contrôler certaines informations de sortie. A titre d'exemple, on peut citer comme interfaces mixtes des dispositifs de type gants de données à retour d'efforts ou bras articulé Virtuose 6D.

Les exemples d'interfaces sensori-motrices utilisées pour la manipulation d'objets virtuels durant la simulation des opérations d'A/D et de maintenance virtuelles seront présentés et analysés dans la section suivante.

Métaphores d'interaction

Les métaphores d'interaction sont des entités particulières, représentées souvent sous forme logicielle, et ont pour objectif d'adapter ou de transformer des modes d'interaction entre l'homme, qui exploite des interfaces matérielles comportementales de contrôle de RV dans le monde réel, et le système de RV, qui va produire un événement correspondant dans le monde virtuel. Donc, il s'agit d'une traduction des informations fournies par l'utilisateur en données d'entrée « compréhensibles » par le système de RV. Ainsi, à partir de ces données d'entrée interprétées, un événement virtuel et les informations associées à cet événement sont générés puis transmis à l'utilisateur en temps réel.

En fait, une interface de contrôle de RV donnée fournit une information d'entrée de nature définie, correspondant à une action réalisée par l'homme : des configurations géométriques (positions et/ou rotations), des efforts, des signaux lumineux, sonores, électriques, etc. Cependant, à chaque information d'entrée définie différents modes d'interaction peuvent être associés. Par exemple, aux déplacements d'une souris 2D ou 3D ou d'un joystick peuvent correspondre des déplacements en translation ou en rotation d'un objet virtuel, ou même, des efforts à appliquer à un système mécanique virtuel. Cette correspondance s'effectue à l'aide des métaphores d'interaction, interprétant une information, captée par l'interface de contrôle, de façon conventionnelle et, parfois, substitutionnelle dans le but de :

- définir un mode d'interaction précis pour une action de l'utilisateur donnée,
- simplifier l'interaction entre l'homme et le système de RV,
- élargir le champ des interactions possibles, associées à une information d'entrée donnée, fournie par une interface de contrôle de RV,
- substituer, pour des raisons économiques, certaines fonctions sensori-motrices d'interfaces de contrôle de RV coûteuses, etc.

Ainsi, différentes métaphores d'interaction, exprimées sous forme logicielle, peuvent être intégrées directement dans un environnement de RV ou faire partie de cet environnement dès sa conception. Néanmoins, il faut souligner que ces métaphores ne traduisent que des données, fournies par l'utilisateur à l'aide d'une interface comportementale de contrôle, en données conventionnellement exploitables par le système de RV. Donc, cette préparation de données d'entrée pour la simulation virtuelle se réalise en dehors du monde virtuel (Figure 2.1).

Nous reviendrons encore dans ce mémoire sur des problèmes de conception de métaphores d'interaction et des aspects de simplification et de substitution de relations entre l'homme et le système de simulation de RV. Toutefois, il est important de remarquer qu'une simplification, une

substitution de certaines fonctions des interfaces de contrôle de RV par les métaphores d'interaction ne conduisent pas nécessairement à une manipulation intuitive d'objets virtuels. Une information supplémentaire concernant de différentes métaphores d'interaction peut être trouvée dans [Burkhardt & al. 1999], [Fuchs & al. 2001].

2.1.5. Principales applications de la RV

Dans cette partie nous allons brièvement présenter quelques applications principales en RV afin de montrer que l'utilisation de la RV ne se limite pas à son application uniquement aux études des opérations d'A/D et de maintenance virtuelles pour la conception et l'optimisation de systèmes mécaniques.

Secteur industriel

A part diverses études des opérations d'A/D virtuelles, déjà présentées, certaines fonctionnalités de la RV comme la visualisation d'une géométrie complexe 3D d'un produit et de résultats de calculs pour l'analyse de phénomènes physiques complexes (crash de véhicules, étude de l'aérodynamisme d'un avion,...), la visualisation immersive pour l'étude et la planification de tâches complexes, qui demandent des investissements importants sont souvent utilisées dans le domaine de la mécanique et notamment, en conception mécanique (Figure 2.2a, b). Il est également très avantageux de se baser sur une maquette numérique présentant un produit virtuel durant de multiples revues de projets ou même, lors de la vente d'un produit, représenté encore sous la forme d'une maquette virtuelle (Figure 2.3).

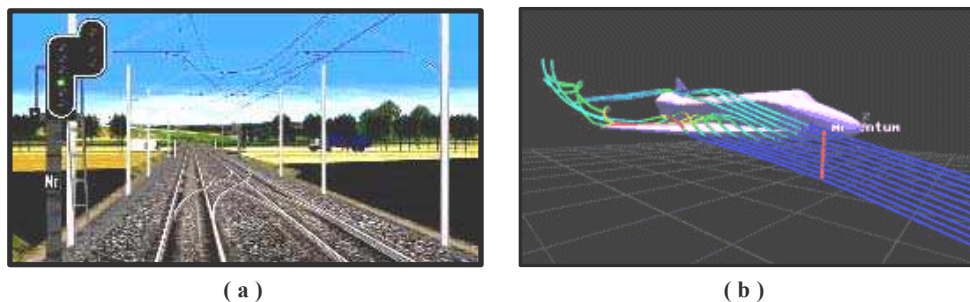


Figure 2.2. Exemples d'utilisation de la RV dans le domaine de la mécanique [Clarte 2003] : (a) mise en place d'une nouvelle ligne de TGV, (b) étude de l'aérodynamisme d'un avion.



Figure 2.3. Exemple d'utilisation de la RV lors de la vente d'un véhicule chez PSA.

Formation et apprentissage

La RV est souvent utilisée pour la formation et l'apprentissage du personnel dans :

- l'industrie pour l'étude et l'optimisation des gestes, la formation au fonctionnement d'un nouveau matériel,...
- les domaines aéronautique, militaire pour l'apprentissage grâce à des simulateurs (Figure 2.4a),...
- le domaine d'éducation pour la visualisation de certains phénomènes physiques et concepts abstraits,...

- le domaine médical pour la formation des chirurgiens (Figure 2.4b), l'anatomie, la planification des opérations, l'étude des systèmes osseux et du fonctionnement de certaines articulations afin de mettre au point des prothèses (Figure 2.4c), ...

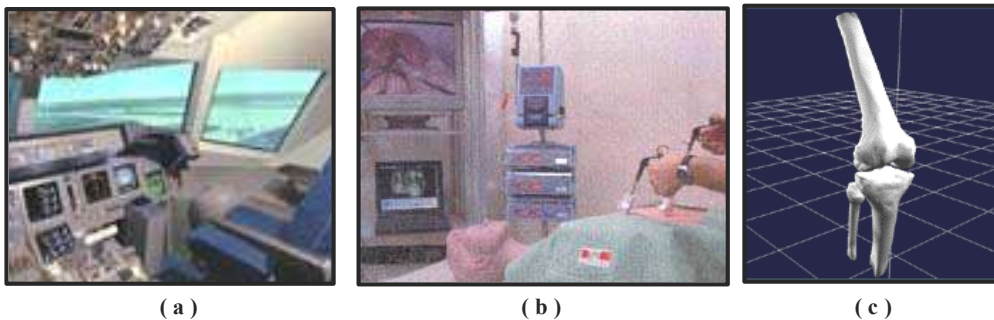


Figure 2.4. Exemples d'application de la RV dans la formation et l'apprentissage [Clarke 2003] :
 (a) simulateur de vol, (b) simulation d'opération chirurgicale,
 (c) articulation virtuelle d'un être humain.

Domaine des beaux-arts, du cinéma, des jeux vidéos

Les fonctions intéressantes de la RV comme la création d'images complexes, l'animation des personnages virtuels, les effets spéciaux, etc. ont trouvé leur application dans le domaine du cinéma. Par exemple, afin de simuler avec une grande précision les mouvements d'un visage dans le film « La Momie » (Figure 2.5a), des techniques de capture de mouvements du visage ont été utilisées [Clarke 2003].

Une autre application de la RV est le domaine des beaux-arts et, en particulier, l'architecture. Il est possible de modéliser différentes constructions de bâtiments, d'étudier l'impact esthétique, de tester des fonctionnalités de constructions futuristes, d'améliorer un projet d'urbanisme concernant un réaménagement, etc. (Figure 2.5b). La RV peut être également utilisée en architecture historique et en archéologie : la reconstruction et l'étude de différentes caractéristiques de bâtiments historiques, la modélisation des travaux à réaliser, la simulation des lieux d'une fouille archéologique, etc. (Figure 2.5c).

Enfin, des techniques et des interfaces de la RV sont largement utilisées dans le domaine des jeux vidéos.

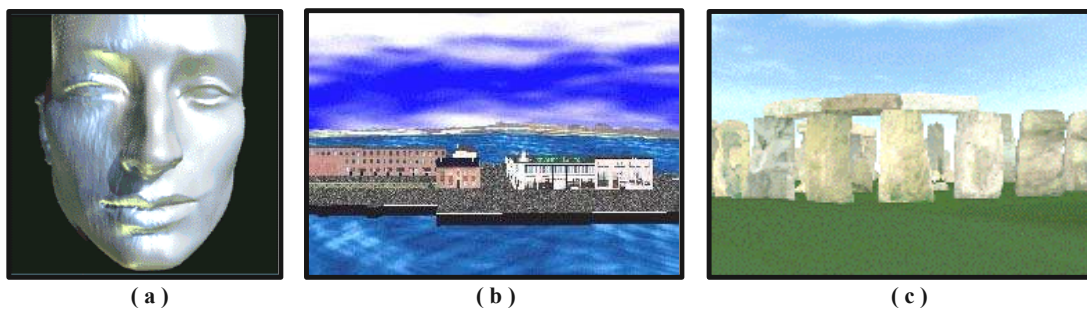


Figure 2.5. Exemple d'application de la RV dans les domaines du cinéma et des beaux-arts [Clarke 2003] :
 (a) simulation des mouvements du visage dans le film « La Momie »,
 (b) simulation du Port de Brest par la société Virtualis,
 (c) simulation du site archéologique de Carnac pour les alignements de menhirs.

2.2. Interfaces de manipulation d'objets pour l'A/D virtuel

2.2.1. Introduction

Un des objectifs principaux de la RV est de pouvoir offrir à l'utilisateur des moyens d'interaction avec le monde virtuel. Pour cela, les interfaces intermédiaires, incluant les interfaces comportementales de contrôle de RV et les métaphores d'interaction, sont utilisées. Ces interfaces ont pour but de capturer des actions de l'utilisateur, de les traduire en données d'entrée qui seront ensuite transmises en temps réel à un système de RV, générant des événements virtuels. Enfin, les données de sortie (ou de retour), produites à partir de cette simulation, sont transmises à l'utilisateur à l'aide de la même ou bien d'interfaces différentes. Ces échanges d'actions physiques et de stimuli constituent donc une boucle de communication entre l'utilisateur et le système de simulation virtuelle. Alors, la manipulation d'objets virtuels est basée sur cette boucle, permettant ainsi d'effectuer un contrôle des actions de l'utilisateur à partir des données de sortie.

Il existe plusieurs modes d'expression des besoins, des actions de l'utilisateur afin de pouvoir interagir avec le monde virtuel. Tout ceci dépend essentiellement des besoins de l'utilisateur, de l'application, des moyens financiers, etc. Par exemple, une manipulation d'objets virtuels peut être effectuée par l'interprétation des expressions corporelles ou vocales d'un être humain, conventionnellement appliquées à un ou des objets virtuels à manipuler. Ces expressions peuvent représenter :

- les déplacements d'un doigt ou d'une main,
- les déplacements globaux du corps,
- les mouvements de la tête ou la marche de l'utilisateur,
- la voix de l'utilisateur,
- les efforts développés à partir d'un travail musculaire de l'utilisateur,
- etc.

Donc, toutes ces actions de l'utilisateur forment des données d'entrée de nature tout à fait différente. En conséquence, ceci entraîne l'élaboration et l'utilisation de diverses interfaces comportementales de reconnaissance :

- de position/orientation,
- du son,
- d'efforts,
- etc.

Ainsi, il existe beaucoup d'interfaces comportementales de contrôle de RV pour pouvoir manipuler des objets virtuels et contrôler ses propres actions durant cette manipulation. Le lecteur pourra trouver des exemples d'interfaces de contrôle de RV pour la manipulation d'objets virtuels dans [Burdea 1996], [Burdea 1999], [Le Roy 1999], [Chedmail & al. 2001], [Fuchs & al. 2001]. Dans cette partie, nous nous intéressons essentiellement aux interfaces comportementales de contrôle de RV pour la manipulation d'objets virtuels dans le contexte d'A/D et de maintenance virtuels, même si ces interfaces peuvent être rencontrées dans d'autres applications de la RV, bien évidemment.

Les interfaces comportementales de manipulation d'objets virtuels, utilisées dans le domaine de simulation des opérations d'A/D et de maintenance virtuelles, peuvent être analysées en fonction des informations d'entrée et de sortie : configurations géométriques (positions et/ou orientations) à atteindre et efforts (forces et moments) à appliquer à un composant à manipuler lors d'une opération d'A/D virtuelle. De ce fait, les interfaces de manipulation qui seront représentées par la suite sont celles de :

- contrôle en position,
- contrôle en effort.

Par ailleurs, une telle distinction n'est pas arbitraire : nous montrerons également dans cette section que la caractérisation de l'information d'entrée en terme de géométrie et d'efforts, transmise à un système de RV à l'aide d'interfaces de contrôle en effort/position, est intéressante dans le cas d'une

simulation interactive des opérations d'A/D virtuelles de pièces flexibles. Ceci conduit à définir des espaces de configurations et d'efforts afin de pouvoir relier la simulation d'un comportement mécanique de pièces flexibles avec les données d'entrée/sortie, définies dans ces deux espaces, durant une manipulation de pièces flexibles virtuelles dans un environnement de simulation d'A/D virtuel.

2.2.2. Interfaces de contrôle en position

Nous nous intéressons dans cette partie aux interfaces permettant le contrôle des déplacements d'objets virtuels manipulés pour la simulation interactive d'une opération d'A/D virtuelle. Ce type de contrôle correspond à la perception de données géométriques en sortie de la manipulation virtuelle et est basé sur une des principales fonctions de contrôle d'un être humain : la vision. Avant de présenter des principales interfaces permettant de réaliser le contrôle en position, il semble important d'expliquer tout d'abord le principe de ce type de contrôle en analysant les interfaces requises.

2.2.2.1. Principe d'un contrôle en position

Avant de produire tout événement virtuel et, en particulier, de simuler une opération d'A/D virtuelle, le système de RV a besoin des données d'entrée. Ces données sont associées aux actions de l'utilisateur qui détermine une cible à atteindre (configuration finale d'une opération d'assemblage, par exemple) et capturées par une interface motrice de RV puis traduites, si nécessaire, par une métaphore d'interaction et transmises au système de RV (Figures 2.6, 2.7). Le système de simulation, quant à lui, produit un événement virtuel et fournit en temps réel un ensemble d'information associé à cet événement. Dans le cas d'un contrôle en position, les informations de sortie comprennent notamment (Figure 2.7) :

- les déplacements linéaires et/ou angulaires de l'objet virtuel rigide manipulé,
- la forme déformée d'un objet virtuel déformable manipulé, i.e. un ensemble de déplacements linéaires et/ou angulaires représentant en tout point la déformation de cet objet,
- l'environnement extérieur de l'objet virtuel manipulé.

Cette information doit être transmise à l'utilisateur effectuant la manipulation par l'intermédiaire d'une interface sensorielle. Il est évident que lorsqu'il s'agit d'un retour d'information géométrique, produite par le système de simulation, la fonction de visualisation de la RV est utilisée afin que la perception des données de sortie soit effectuée par l'utilisateur. Donc, les interfaces sensorielles visuelles sont utilisées dans ce cas. Par ailleurs, d'autres interfaces sensorielles d'aide à la compréhension et à la prise de décision peuvent être employées en complément (par exemple, des interfaces sonores pour signaler une collision détectée avec un obstacle).

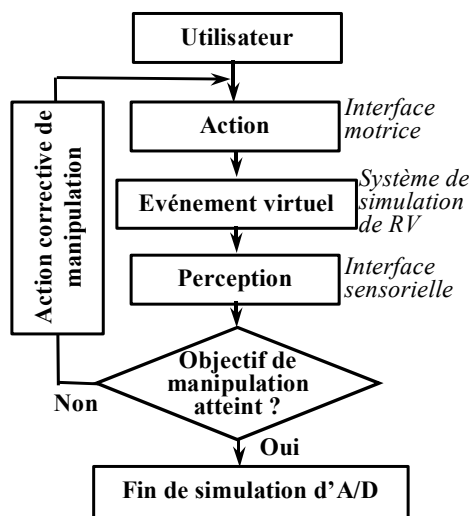


Figure 2.6. Contrôle des actions de l'utilisateur lors de la simulation d'une opération d'A/D virtuelle.

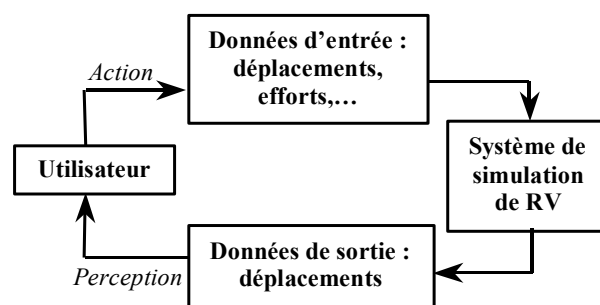


Figure 2.7. Communication entre l'utilisateur et le système de RV dans le cas d'un contrôle en position.

L'utilisateur produit ses actions de façon intuitive : il ne peut les contrôler qu'en se basant sur les informations de retour lors d'une manipulation. En effet, c'est l'utilisateur qui définit l'objectif de la manipulation virtuelle, choisit une application et des interfaces comportementales de RV, évalue les résultats obtenus au cours de la simulation d'une opération d'A/D. Ainsi, si l'utilisateur estime que les résultats de simulation ne sont pas satisfaisants en matière d'information géométrique, associée à un événement virtuel donné, une correction de ses actions est alors nécessaire. Cette correction se base sur les interfaces comportementales et constitue donc le contrôle des actions de l'utilisateur (Figure 2.6). Lorsque les résultats de simulation sont des données géométriques, alors il s'agit essentiellement d'un contrôle visuel.

Ainsi, les interfaces comportementales utilisées dans la simulation d'opérations d'A/D virtuelles lors d'un contrôle en position sont :

- les interfaces motrices permettant de capturer et de transmettre des données d'entrée à un système de simulation de RV. Les données d'entrée dépendent des capacités technologiques des interfaces motrices choisies et peuvent représenter :
 - les déplacements linéaires et/ou angulaires de la main de l'utilisateur (déplacement des doigts, orientation de la main,...),
 - les mouvements du corps entier ou d'une partie du corps de l'utilisateur,
 - les efforts produits au cours du travail musculaire de l'utilisateur, etc. ;
- les interfaces sensorielles permettant de fournir à l'utilisateur des résultats de simulation sous forme visuelle. Les données de sortie peuvent représenter :
 - les déplacements linéaires et/ou angulaires d'un objet manipulé : la trajectoire d'A/D, les formes déformées, etc.

2.2.2.2. Interfaces motrices

Interfaces de localisation spatiale

Dans cette partie nous présentons les principales interfaces motrices de localisation spatiale (2D, 3D) d'un objet virtuel à manipuler ou d'un mannequin virtuel à commander lors de la simulation d'une opération d'A/D. Ces interfaces sont nécessaires pour caractériser le positionnement d'un objet virtuel (rigide ou déformable), la trajectoire d'A/D de cet objet ainsi que le positionnement d'un mannequin par rapport à l'environnement virtuel au cours des opérations d'A/D virtuelles.

Le positionnement d'un objet virtuel et de tout membre d'un corps du mannequin se détermine par le positionnement d'un repère local, lié à l'objet en question et défini par 6 variables (ou 6 DDL) dans l'espace 3D : trois coordonnées et trois angles. Alors, tout mouvement d'un dispositif matériel, définissant la position et/ou l'orientation courantes d'un objet virtuel, prescrit des déplacements de cet objet, ou plutôt, de son repère lié au repère global de l'environnement virtuel par une matrice de transformation composée d'une rotation et d'une translation. Deux catégories principales d'interfaces permettant de transmettre des déplacements à un objet virtuel sont présentées : des interfaces de commande en déplacement et des capteurs de mouvements.

Interfaces de commande en position :

Ce sont les interfaces les plus connues. Elles regroupent des dispositifs de commande manuelle de type joysticks (ou manette), souris 2D et 3D, stylets, etc. Ces dispositifs sont en général posés sur une table et permettent de générer les mouvements relatifs d'un curseur lié au repère local d'un objet virtuel en temps réel.

Une souris 2D réalise en général deux translations physiques dans un plan (Figure 2.8a). Ces translations peuvent être transmises à un objet virtuel comme des mouvements de translation ou de rotation en utilisant un menu virtuel lié à une métaphore d'interaction, par exemple. Une souris 3D (Figure 2.8b) et un joystick 3D (Figure 2.8c) permettent en général de définir une information géométrique d'entrée concernant les trois translations et trois rotations d'un objet virtuel dans l'espace.

Ces interfaces sont basées sur la mesure de déplacements en translation/rotation ou celle des efforts, appliqués à un dispositif matériel et transformés par la suite en mouvements d'un objet virtuel.

Certaines interfaces de type SpaceBall sont munies des capteurs permettant de mesurer les pressions (Figure 2.8d) ou les déformations d'une boule. Cette information peut donner accès aux efforts approximatifs appliqués qui peuvent être transmis à un objet virtuel à manipuler. Cependant, il faut souligner que même si certaines interfaces de commande de type souris 3D permettent de mesurer des efforts, les capteurs utilisés ne sont pas considérés comme un capteur d'effort [Fuchs & al. 2001]. Récemment, de nouveaux dispositifs ont été développés : ils comportent des systèmes haptiques afin d'introduire la notion de sensation tactile et d'améliorer le contrôle des mouvements de l'utilisateur en position et en effort [Casiez & al./1 2003].

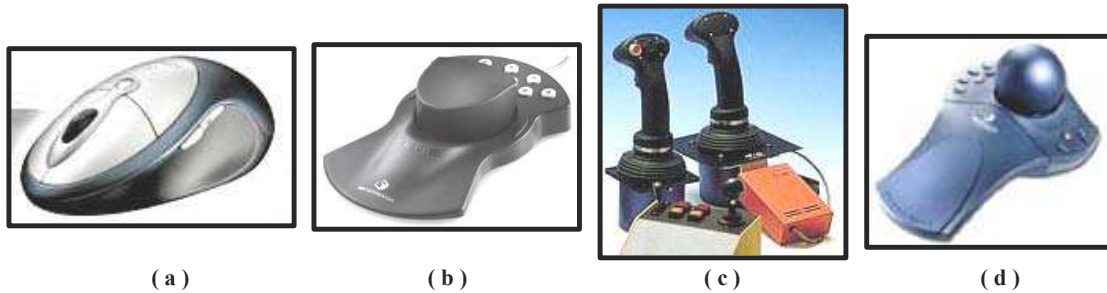


Figure 2.8. Exemples d'interfaces motrices de commande :

(a) souris 2D de Logitech [Logitech 2003],

(b) souris 3D SpaceMouse de 3Dconnexion [3Dconnexion 2003],

(c) joystick FlyBox d'Immersion [Immersion 2003], (d) SpaceBall de Logitech [Logitech 2003].

Gants de données :

Les gants de données sont utilisés pour manipuler des objets virtuels et représenter une main virtuelle au cours d'une simulation d'A/D virtuel. Ces interfaces sont basées sur plusieurs techniques de repérage temps réel de la main et des doigts dans l'espace en utilisant [Le Roy 1999], [Thalmann & al. 1999] :

- les ondes sonores,
- les systèmes optiques,
- les systèmes électriques, etc.

Les gants de données à fibres optiques (Figure 2.9a) ou à jauges de déformations permettent de mesurer la flexion des doigts (Figure 2.9b). Certains modèles de gants sont munis d'inclinomètres fournissant l'orientation de la main de l'opérateur. Afin de déterminer une représentation complète de la main dans l'espace, les gants peuvent être équipés de capteurs (traqueurs¹) mesurant 6 DDL. Certains modèles de gants sans fil peuvent transmettre des signaux par ondes radio avec une portée de 20 m.

Le gant CyberGlove d'Immersion (Figure 2.9c) fournit une information concernant la flexion des doigts de l'opérateur à partir de la flexion d'un matériau du gant en fonction de sa résistance au courant mesurée. Ce gant est muni de 18 à 22 capteurs électriques et peut être équipé d'un capteur 3D (traqueurs) afin de caractériser la position et l'orientation d'un point de référence de la main dans l'espace.

¹ Traduction du terme anglais « tracker »

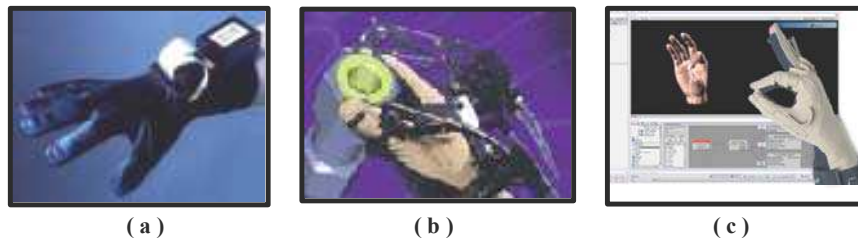


Figure 2.9. Exemples de gants de données d'Immersion [Immersion 2003] :
(a) gant DataGlove à fibres optiques, (b) gant DataGlove à jauges de déformations,
(c) gant CyberGlove à capteurs électriques.

Capteurs de mouvements :

Les capteurs de mouvements 3D (traqueurs) ont pour objectif de repérer en temps réel la position et l'orientation de la main ou d'autres parties du corps de l'utilisateur dans l'espace au cours de la manipulation d'objets virtuels ou la commande d'un mannequin virtuel. Il existe différents capteurs fournissant soit une position d'un point dans l'espace (capteurs à 3 DDL), soit une orientation d'un repère (lié à la main virtuelle ou à un objet virtuel à manipuler, par exemple) dans l'espace (capteurs à 3 DDL), soit les deux simultanément (capteurs à 6 DDL). Les capteurs les plus utilisés pour la capture de mouvements sont [Thalmann & al. 1999], [Fuchs & al. 2001] :

- capteurs électromagnétiques,
- capteurs électriques,
- systèmes optiques,
- capteurs mécaniques, etc.

Les capteurs électromagnétiques utilisent une source émettrice fixe qui crée un champ magnétique variable, définissant un domaine d'action du capteur. Un récepteur, lié à la main de l'utilisateur et donc à un objet virtuel à manipuler, mesure les variations de ce champ en temps réel en fonction de la position de la main avec une zone de travail de quelques mètres (Figure 2.10a). Les capteurs électromagnétiques permettent d'effectuer des mesures avec une bonne précision : 1 mm en translation et $0,5^\circ$ en rotation [Fuchs & al. 2001]. Cependant, la contrainte de ce type de capteur est l'impossibilité de fonctionner correctement dans l'environnement comportant des objets métalliques : le champ magnétique variable crée les courants de Foucault dans les pièces conductrices ce qui génère des champs magnétiques complémentaires perturbant le repérage de la main tenant le capteur.

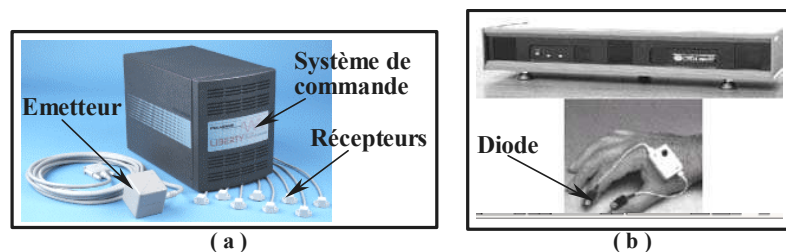


Figure 2.10. Exemples de capteurs de mouvements 3D :
(a) interface MotionTracking de Polhemus avec les capteurs électromagnétiques [Polhemus 2003],
(b) interface CodaMotion de Charnwood Dynamics pour le suivi de doigts [Fuchs & al. 2001].

Dans les systèmes optiques, la lumière est en général émise à l'aide de diodes électroluminescentes LEDs (Light Emitting Diodes) dans infrarouge pour que la lumière ambiante ne perturbe pas les mesures. Il existe principalement deux types de capteurs [Fuchs & al. 2001] :

- les capteurs mesurant les angles à partir des rayons lumineux reçus sur des récepteurs ponctuels infrarouges (phototransistors),

- les capteurs utilisant des récepteurs plans (caméras numériques).

Ces capteurs sont associés à un objet à déplacer ou à différentes parties du corps de l'opérateur (la main, la tête,...) et fournissent une position capturée avec une grande précision allant jusqu'à 0,1 mm. Une interface de Charnwood Dynamics, représentée sur la Figure 2.10b, permet de localiser en temps réel les positions de deux doigts par l'intermédiaire de diodes et de trois caméras d'un système optique. Par ailleurs, certains capteurs ne localisent que la position d'un repère manipulé sans déterminer son orientation. Ainsi, une association de plusieurs capteurs est indispensable afin de déterminer le cas échéant les orientations.

On peut remarquer que pour une commande de mannequin virtuel effectuant une opération d'A/D, plusieurs capteurs de mouvements 3D sont requis afin de repérer l'ensemble articulaire « constituant » l'opérateur. Dans ce cas, les capteurs (électromagnétiques, électriques, les LEDs,...) sont attachés à un vêtement, et l'opérateur effectue des mouvements entraînant les déplacements correspondants du mannequin dans le monde virtuel.

Une autre classe de capteurs de localisation regroupe des capteurs mécaniques et, en particulier, les capteurs mesurant des distances et les gyroscopes miniaturisés permettant de fournir l'orientation d'un repère associé un objet virtuel à manipuler [Fuchs & al. 2001].

Interfaces motrices fournissant des efforts

Dans cette partie nous donnons quelques exemples de systèmes qui peuvent fournir des efforts comme paramètres d'entrée pour la simulation d'une manipulation d'objets virtuels et notamment, dans des applications d'A/D virtuel. Néanmoins, il convient de noter qu'à travers l'étude des systèmes de simulation d'opérations d'A/D virtuel, aucune interface permettant d'appliquer des efforts développés par l'utilisateur à un objet virtuel ne fut identifiée.

A ce jour, il est difficile techniquement de proposer un outil qui soit capable de mesurer des efforts (les forces et les moments) générés par un être humain et de les transmettre au système de RV, car il existe très peu de capteurs d'efforts en RV [Fuchs & al. 2001]. De plus, les interfaces haptiques actuelles, censées être utilisables dans le contrôle en position, ont souvent un fonctionnement isotonique : le déplacement de l'objet virtuel est égal au déplacement de l'extrémité de l'interface à retour d'effort. En fait, le déplacement d'un objet virtuel, produit par le système de simulation, est un résultat dépendant directement des valeurs des efforts développés et de la manière dont ils sont appliqués (par exemple, en préservant la direction d'application des efforts), ainsi que du comportement physique des objets (flexibles, anisotropie du matériau,...). Donc, les déplacements fournis par le système de simulation au cours de la manipulation d'objets ne sont pas égaux à ceux produits par l'interface motrice correspondante, même si l'objet manipulé est « lié » virtuellement à cette interface.

Interfaces de commande :

Il existe des interfaces de type souris 3D à boule, présentées ci-dessus, qui permettent de capter des efforts de compression et de torsion de l'opérateur exercés sur une boule. Cependant, les efforts mesurés sont généralement utilisés pour la manipulation d'objets virtuels et non pour la transmission directe de ces efforts au système de simulation virtuelle qui les appliquerait à un objet virtuel.

On peut également trouver quelques manettes munies de capteurs de force piézo-électriques mesurant la pression des doigts de l'opérateur. Mais ces capteurs d'efforts (ou capteurs de pression) sont employés plutôt pour la manipulation d'une main virtuelle que pour l'application directe des efforts à un objet virtuel [Fuchs & al. 2001]. De plus, il est nécessaire de pouvoir simuler correctement l'application des efforts compte tenu des forces de flexion et de leurs directions éventuellement variables ainsi que des moments de flexion et de torsion.

Donc, il y a un intérêt fort pour continuer à travailler sur le développement de dispositifs qui permettraient d'appliquer directement les efforts de l'opérateur aux pièces virtuelles manipulées notamment dans le contexte de simulation d'opérations d'A/D virtuelles. Aujourd'hui, des capteurs d'efforts, spécifiques aux applications de la RV, commencent à paraître.

Interfaces haptiques :

Les interfaces haptiques ont, en général, pour objectif d'offrir à l'utilisateur la possibilité de percevoir des efforts, évalués et retournés par le système de simulation virtuelle au cours de manipulations d'objets. Par ailleurs, ces interfaces sont souvent des interfaces de type sensori-motrices. Donc, dans la plupart des cas d'applications virtuelles et notamment dans le domaine de l'assemblage virtuel, les interfaces haptiques sont utilisées dans le contrôle en effort (ou contrôle en impédance). Ce type de contrôle ainsi que les interfaces haptiques seront présentés par la suite. Toutefois, il est possible d'utiliser certaines interfaces dites haptiques permettant de mesurer un (des) effort(s) en entrée et d'appliquer en sortie des déplacements à un objet virtuel, produits par le système de simulation (contrôle en admittance). Les déplacements d'un objet virtuel peuvent être réalisés par la commande de moteurs [Casiez & al./2 2003]. La possibilité d'un tel contrôle en admittance pour la manipulation virtuelle est discutée dans [Yokoi & al. 1994], [Vuskovic & al. 2000], [Hoogen & al. 2002], [Newman & al. 2002], [Linde & al. 2003].

Le fonctionnement de l'interface haptique *Virtuose 6D*, conçue par le LIST/CEA et réalisée par la société Haption [Haption 2003], est basé sur la manipulation de bras maître d'un télé-manipulateur. A part son principal objectif, à savoir fournir une information de retour en effort, cette interface dispose d'une fonctionnalité de prescription d'efforts développés par l'utilisateur en utilisant un capteur d'efforts à 6 composants. Ce capteur est placé à l'extrémité de la poignée du dispositif et mesure les efforts de l'utilisateur, en les appliquant à un objet virtuel (Figure 2.11a). Dans le contrôle en admittance, les déplacements d'un objet virtuel manipulé, calculés par le système de simulation en temps réel à partir des efforts fournis par le dispositif haptique, ne sont pas en principe les mêmes que ceux de l'extrémité de la poignée du dispositif. En effet, les déplacements d'un objet virtuel prennent en compte le poids de cet objet, son inertie, sa déformation éventuelle et donc, la résistance supplémentaire due à cette déformation, etc. Donc, le système haptique doit agir sur l'opérateur de telle façon que les informations d'entrée et de sortie soient cohérentes. Par exemple, les déplacements de la poignée du dispositif avec les efforts associés à ces déplacements et mesurés par le capteur d'efforts doivent être cohérents par rapport aux déplacements de l'objet virtuel.

Le dispositif haptique linéaire *Excalibur LHD* à 3 DDL (Linear Haptic Display), réalisé par la société Haptic Technologies, est utilisé à l'Université de Washington pour deux types de contrôle : en impédance et en admittance (Figure 2.11b). Il offre des mouvements en translation et dispose d'un capteur d'efforts. Le contrôle en admittance (en position) est effectué de façon visuelle, à savoir les déplacements d'un objet virtuel sont visualisés [Adams 1999].

L'interface haptique *HapticMaster* (Figure 2.11c), réalisée par la société FCS Control Systems et employée dans le cas d'un contrôle en position, a également 3 DDL (mouvements en translation) et offre à l'opérateur la possibilité de développer un effort important : 100 N pour la force nominale et jusqu'à 250 N pour la force maximale [Linde & al. 2003]. Un capteur de force à base de jauge de déformation (strain gauge force sensor) est monté sur une extrémité du bras du dispositif et mesure les forces appliquées par l'opérateur [Linde & al. 2003] (Figure 2.11d).

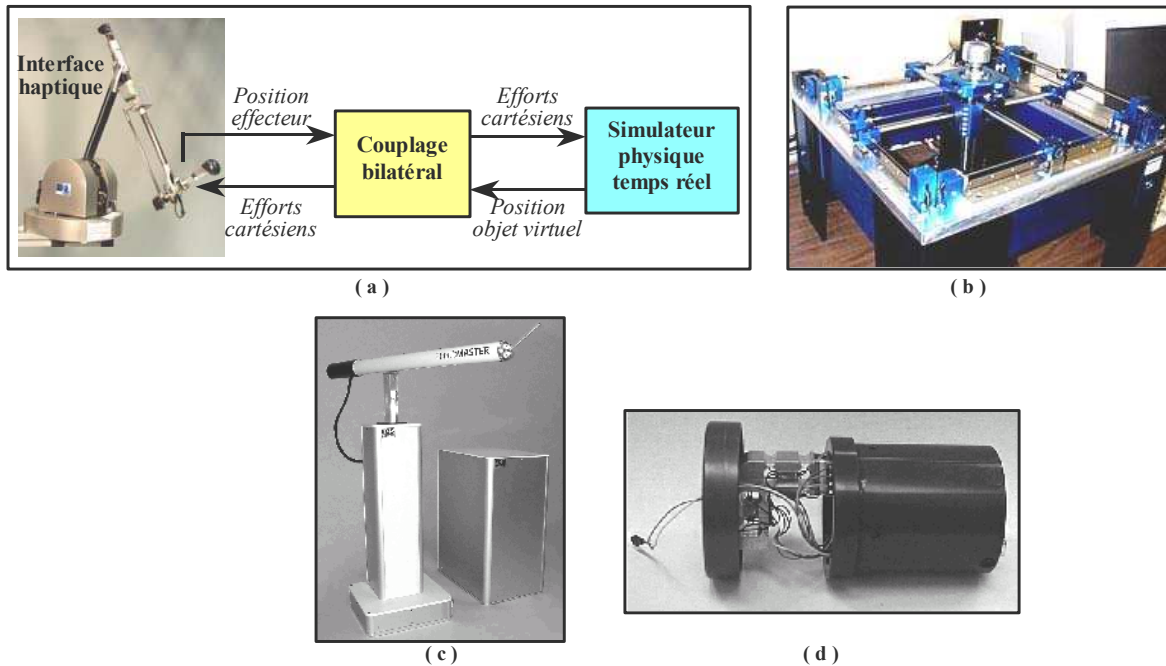


Figure 2.11. Exemples d'interfaces haptiques utilisées dans le contrôle en position :
 (a) principe de fonctionnement de l'interface Virtuose 6D [Lécuyer & al. 2003],
 (b) interface haptique Excalibur LHD d'Haptic Technologies [UW 2004],
 (c) interface HapticMaster de FCS Control Systems [Linde & al. 2003],
 (d) capteur de force utilisable sur le HapticMaster [Linde & al. 2003].

2.2.2.3. Interfaces sensorielles

Afin de pouvoir effectuer le contrôle en position d'une manipulation d'un objet virtuel donné, il est nécessaire de disposer d'un retour d'informations géométriques après la simulation temps réel. Ce retour se réalise grâce aux interfaces sensorielles de RV. En particulier, en ce qui concerne le contrôle en position durant une simulation d'opération d'assemblage virtuel, les interfaces sensorielles permettent de visualiser en temps réel le résultat de simulation, i.e. les déplacements et/ou les déformations de la forme de l'objet manipulé et ainsi d'informer l'utilisateur par des signaux sonores, par exemple, si une collision avec un obstacle est détectée. Nous ne présentons dans cette partie que des interfaces visuelles qui sont des interfaces utilisées dans le domaine de l'assemblage virtuel. Parmi les interfaces sensorielles visuelles, on trouve des systèmes de visualisation fixes ou portables : monoscopiques, stéréoscopiques, etc. [Le Roy 1999], [Fuchs & al. 2001].

Systèmes de visualisation monoscopique :

L'interface la plus connue et la plus utilisée est sans doute l'écran d'un ordinateur [Le Roy 1999], permettant d'afficher le résultat de capture de mouvements et de simulations virtuelles et donc, de suivre visuellement, d'analyser des modifications de scènes virtuelles dues à des consignes en termes de déplacements ou d'efforts de l'opérateur prescrites via les interfaces motrices de RV. Aujourd'hui, les écrans plats, peu encombrants et légers par rapport aux écrans classiques, sont de plus en plus utilisés. Malgré son coût relativement faible, l'écran ne permet pas à de nombreuses personnes de suivre simultanément les modifications affichées à cause de sa petite taille.

Afin de proposer à plusieurs utilisateurs, par exemple, aux concepteurs pour l'étude et l'analyse communes de certaines opérations ou pour la revue d'un projet, la possibilité de suivre simultanément la manipulation d'objets virtuels, d'afficher les résultats de la simulation virtuelle, de créer un dialogue encore plus constructif entre des différents acteurs, une technique de projection d'images sur un écran de grande taille a été développée (Figure 2.12d). Par exemple, un écran d'une forme cylindrique de 6 à 10 m de long et de 2 à 3 m de haut de la société Trimension avec un système de plusieurs projecteurs permet de créer un centre (ou salle) immersif (Reality Center ou Reality

Room) : visualiser d'une maquette virtuelle d'un produit et poursuivre l'élaboration commune de ce produit en tenant compte de différentes contraintes de conception, de fabrication, d'ergonomie, etc. (Figure 2.12a).

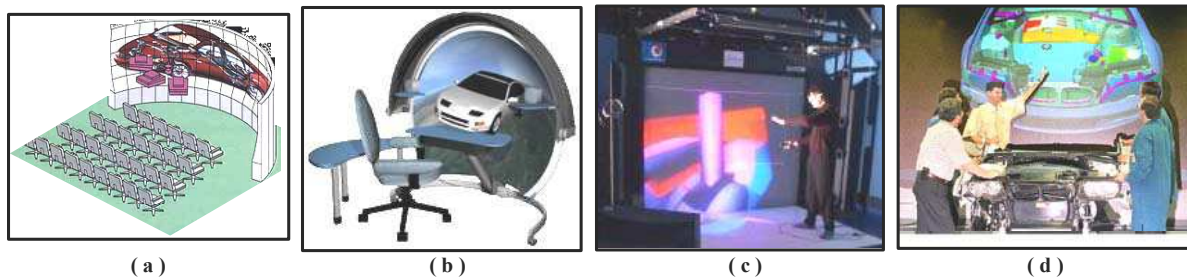


Figure 2.12. Exemples d'interfaces de visualisation immersive :
(a) Réalité Room de Trimension [Le Roy 1999], (b) VisionDome d'Elumens [Immersion 2003],
(c) plate-forme Phare du CEA [Perf-RV 2003], (d) utilisation d'une interface de visualisation de RV
dans la conception collaborative/intégrée.

Actuellement, les techniques de projection sont associées aux méthodes d'immersion d'un être humain dans un monde virtuel en utilisant la visualisation panoramique. Par exemple, l'interface VisionDome d'Elumens comporte un grand écran sous la forme d'une portion de sphère et intègre une fonctionnalité immersive (Figure 2.12b). La fonctionnalité de la RV d'être immergé dans un monde virtuel peut être intégrée dans un système de simulation virtuelle avec un écran classique de l'ordinateur (Figure 2.3). Afin d'obtenir une couverture visuelle totale, le système de type CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) peut être utilisé (Figure 2.12c). Dans ce type de système immersif, l'opérateur est placé dans un « cube » possédant jusqu'à 6 écrans sur lesquels des images stéréo d'une scène virtuelle sont projetées [Thalmann & al. 1999], [Chedmail & al. 2001], [Sutcliffe & al. 2003]. Les périphériques de visualisation immersive sont particulièrement utiles dans le contexte de conception collaborative/intégrée (Figure 2.12d).

Systèmes de visualisation stéréoscopique :

Les systèmes de vision stéréoscopique ont pour objectif de supporter une vue stéréographique – faculté d'un être humain de distinguer une distance entre des objets affichés. En effet, la distance inter-oculaire fait que les images perçues par l'œil gauche et l'œil droit sont différentes. Le cerveau humain utilise ces deux images pour recomposer une vision stéréoscopique. Alors, les systèmes de vision stéréoscopique ont été développés pour donner une profondeur de champ à des objets virtuels 3D. Il existe deux techniques de projection des images dans les systèmes stéréoscopiques avec immersion dans un monde virtuel : les systèmes avec un dispositif identique pour la projection d'images pour l'œil gauche et l'œil droit et les systèmes de projection dissociés [Le Roy 1999], [Thalmann & al. 1999].

La première technique projette rapidement des images différentes pour chaque œil en les occultant alternativement. La rétine n'ayant pas le temps d'effacer chaque image, le cerveau fusionne les deux images en une seule. Cette image résultante est empreinte d'un effet tridimensionnel réaliste. Afin d'occulter la vision des yeux, des lunettes à cristaux liquides sont proposées (les lunettes CrystalEyes de Stereographics ou les lunettes de vision stéréoscopique d'Immersion, Figure 2.13a). Les images différentes pour les deux yeux sont fournies avec la même fréquence et les lunettes peuvent être utilisées avec différents écrans monoscopiques. Une autre technologie de visualisation stéréoscopique est basée sur l'utilisation des lunettes polarisées avec un filtre polarisant placé devant un écran. Cependant, la vision est limitée par les dimensions de l'écran.

La seconde technique est utilisée dans les interfaces appelées casques immersifs de réalité virtuelle ou visiocasques HMD (Head Mounted Display) dont l'objectif est de proposer un grand champ visuel à l'aide de deux petits écrans, systèmes de projection dissociés. En plus de la vision stéréoscopique, les visiocasques sont souvent complétés par un capteur de localisation spatiale afin de détecter l'orientation de la tête et éventuellement sa position. Ce capteur (système électronique,

optique,...) permet d'afficher les images correspondant à l'orientation des yeux. Il existe principalement deux types d'écrans de visiocasques [Fuchs & al. 2001] : les écrans cathodiques (avec une grande résolution mais avec la difficulté de fabriquer des écrans couleurs légers et miniatures) et les écrans à cristaux liquides (Figures 2.13b,c).

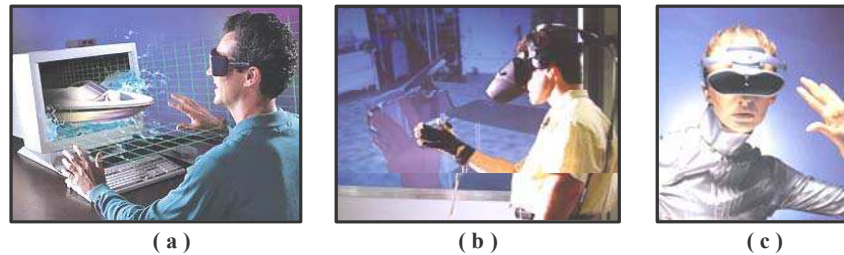


Figure 2.13. Exemples d'interfaces de visualisation stéréoscopique d'Immersion [Immersion 2003] :
 (a) lunettes de vision stéréoscopique, (b) assemblage virtuel (Fraunhofer Institut, Darmstadt),
 (c) visiocasque HMD.

2.2.3. Interfaces de contrôle en effort

Nous nous intéressons dans cette partie aux interfaces réalisant le contrôle en effort d'objets virtuels manipulés pour la simulation interactive d'une opération d'A/D virtuelle. Ce type de contrôle sous-entend la perception de données en termes d'efforts (forces et/ou moments) lors de la manipulation virtuelle. Avant la présentation des principales interfaces permettant de réaliser le contrôle en effort, nous allons expliquer un principe de ce type de contrôle en classifiant des interfaces comportementales nécessaires.

2.2.3.1. Principe d'un contrôle en effort

Lors de la simulation d'une opération d'A/D et de maintenance virtuelle, comme dans d'autres catégories de simulations virtuelles, l'opérateur définit un objectif à atteindre (une configuration de montage final pour l'assemblage, par exemple) et essaye d'y parvenir en contrôlant en permanence et éventuellement en corrigeant ses actions sur la base des données de sortie durant la manipulation d'une pièce virtuelle. On a vu que pour le contrôle en positions, la visualisation temps réel des déplacements et, le cas échéant, des déformations de la pièce manipulée ainsi que l'affichage de l'environnement extérieur sont nécessaires. Néanmoins, afin d'étudier plus finement une opération virtuelle compte tenu du poids de la pièce ou des efforts lors d'une collision avec des obstacles, de planifier la trajectoire d'A/D sans collision (voire interdire les collisions durant la manipulation) et de l'optimiser dans le but de diminuer les efforts nécessaires à appliquer (car chaque simulation virtuelle doit être « reproductible » physiquement et ceci nécessite obligatoirement le développement d'un certain effort par un être humain), etc., il est également indispensable de pouvoir générer des efforts lors de la manipulation d'un objet virtuel. Ainsi, ces efforts, associés à une manipulation et nécessairement contrôlés en temps réel, deviennent des paramètres importants mis en jeu qui sont également des données de sortie. Ceci forme un autre type de contrôle d'actions de l'utilisateur à effectuer : un contrôle en effort (Figure 2.14).

Donc, comme dans le cas de contrôle en position, le contrôle en effort s'effectue à partir des données d'entrée, définissant les actions de l'utilisateur et capturées par une interface motrice de RV puis traduites et transmises à un système de simulation de RV (Figure 2.6). A son tour, le système de simulation produit un événement virtuel et fournit un ensemble d'informations associé à cet événement en temps réel. Dans le cas d'un contrôle en effort, une information de sortie comprend (Figure 2.14) :

- les efforts associés à une manipulation donnée,
- les déplacements de l'objet virtuel manipulé,
- l'environnement extérieur de l'objet virtuel.

Cette information sera transmise à l'utilisateur manipulant un objet virtuel par l'intermédiaire d'une interface sensorielle. Le but principal d'une telle interface dans le contexte de contrôle en effort est de percevoir des efforts produits par le système de simulation. Alors, l'utilisateur peut sentir les efforts associés aux déplacements d'un objet (dus au poids de cet objet, par exemple), à la déformation de l'objet ainsi que de son environnement extérieur, aux collisions avec des obstacles, etc. La perception de ces efforts s'obtient en utilisant des interfaces particulières appelées interfaces haptiques qui seront présentées dans cette partie.

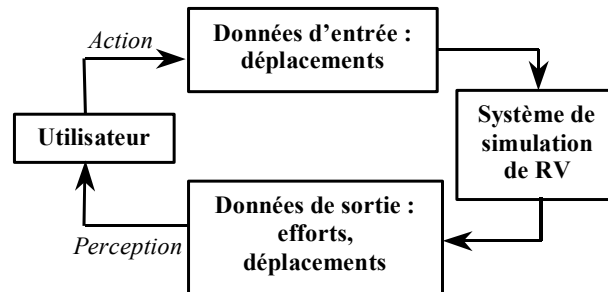


Figure 2.14. Communication entre l'utilisateur et le système de simulation de RV dans le cas d'un contrôle en effort.

Ainsi, en se basant sur cette information d'effort en sortie, l'utilisateur tâche intuitivement d'atteindre une cible donnée en corrigeant éventuellement ses actions et sa stratégie. Néanmoins, dans la plupart des cas, le seul retour en terme d'efforts ne suffit pas : du fait de la difficulté de compréhension et d'analyse d'un événement virtuel à partir de la perception uniquement des efforts générés, mais aussi du fait de sa nature multi-sensorielle, un être humain a besoin d'observer un résultat de manipulation concernant les déplacements imposés à l'objet virtuel au début d'une boucle du contrôle en effort, le positionnement de cet objet par rapport à l'environnement extérieur, la déformation éventuelle d'un objet flexible, etc. Donc, durant la manipulation virtuelle et, notamment, la simulation de l'A/D virtuel, le contrôle en effort est souvent couplé avec le contrôle en position, i.e. le retour visuel en terme de déplacements imposés par l'utilisateur mais aussi de déformation d'un objet produite par le système de simulation de RV est organisé à l'aide d'interfaces sensorielles visuelles. Par ailleurs, d'autres interfaces sensorielles d'aide à la compréhension peuvent être utilisées, par exemple, des interfaces sonores pour signaler une collision détectée avec un obstacle.

Ainsi, les interfaces comportementales, utilisées dans la simulation des opérations d'A/D virtuelles dans le cas d'un contrôle en effort avec/sans un contrôle en position, sont :

- les interfaces sensori-motrices permettant de capturer et de transmettre des données d'entrée géométriques à un système de simulation de RV. Les données d'entrée dépendent des capacités technologiques des interfaces sensori-motrices choisies, des objectifs de l'utilisateur et des moyens financiers mis en jeu, et représentent :
 - les déplacements linéaires et/ou angulaires de la main de l'utilisateur,
 - les mouvements capturés du corps entier ou d'une partie du corps de l'utilisateur, etc. ;
- les interfaces sensori-motrices et sensorielles permettant de fournir à l'utilisateur les résultats de manipulation en termes d'efforts et de géométrie associés à la simulation. Les données de sortie peuvent représenter :
 - les efforts dus au poids, la raideur, l'inertie d'un objet manipulé,
 - les efforts dus à la déformation éventuelle d'un objet à caractère flexible,
 - les efforts de réaction lors des collisions d'un objet avec son environnement,
 - les déplacements linéaires et/ou angulaires d'un objet manipulé : la trajectoire d'A/D, les formes déformées,
 - le blocage mécanique d'une action de l'utilisateur afin d'éviter la pénétration d'un objet manipulé à l'intérieur de son environnement, etc.

2.2.3.2. Interfaces sensori-motrices à retour d'effort

Pour que l'utilisateur perçoive une information mécanique en retour et, notamment, les efforts requis lors de la simulation d'une action virtuelle, des interfaces haptiques sont nécessaires. Parmi ces interfaces, les dispositifs les plus utilisés en pratique sont à :

- sensibilité cutanée,
- retour d'effort.

La première famille de dispositifs haptiques – dispositifs à retour tactile – ont pour objectif de faire sentir à l'utilisateur en temps réel les différents contacts entre la main de l'utilisateur et un objet manipulé : l'état de surface (la rugosité), la température, les glissements, etc. Les interfaces à sensibilité cutanée sont des interfaces purement sensorielles et leur utilisation dans les applications d'A/D virtuel est encore très réduite actuellement. Nous allons présenter ici les principaux dispositifs à retour d'effort couramment employés dans le domaine de la simulation des opérations d'A/D et de maintenance virtuelles.

Les interfaces à retour d'effort ont une particularité intéressante : elles mesurent une information géométrique d'entrée concernant la position/orientation d'une partie du corps d'un être humain qui dirige la manipulation (le plus souvent, ce sont les déplacements de la main de l'utilisateur) et, en même temps, elles transmettent en temps réel des données de simulation de sortie en terme d'efforts à appliquer à cette même partie (la main, par exemple). Donc, ces interfaces ont un rôle moteur mais aussi générateur des stimuli, en agissant essentiellement sur les muscles de l'utilisateur [Burdea 1999], [Fuchs & al. 2001].

Dans le domaine d'A/D virtuel, les interfaces à retour d'effort sont associées aux manipulations virtuelles faites par la main de l'utilisateur. Ainsi, un effort évalué par le système de simulation de RV pour être appliqué à la main est une fonction des déplacements de celle-ci, mesurés par un dispositif haptique. En outre, ces déplacements de la main sont en général égaux aux déplacements de l'extrémité de ce dispositif haptique : ces mesures sont faites sur le même dispositif qui est donc une interface sensori-motrice.

On peut classer l'application du retour d'effort produit par une interface haptique selon les catégories suivantes :

- efforts retournés constants, propres aux caractéristiques physiques de l'objet virtuel manipulé : sa masse, sa raideur, etc.,
- efforts constants ou variables, caractérisant la déformation d'un objet virtuel,
- efforts variables prenant en compte la dynamique des mouvements des objets manipulés [Khatib & al. 2002], [Chablat & al. 2002],
- efforts constants ou variables pour modéliser le contact entre un objet manipulé et son environnement. Par exemple, un effort constant d'une valeur importante, quelle que soit la collision, informerait l'utilisateur sur la présence d'un obstacle, en bloquant le mouvement correspondant du périphérique et donc, ceux de l'utilisateur (sensation de frontière) [Chablat & al. 2002], etc.

Afin de pouvoir exercer un retour d'effort vers l'opérateur, les dispositifs haptiques sont réalisés selon deux techniques principalement [Burdea 1996], [Burdea 1999], [Le Roy 1999], [Thalmann & al. 1999], [Chedmail & al. 2001], [Fuchs & al. 2001] :

- des dispositifs non-portables dont la base est liée au sol,
- des dispositifs portables, liés à une partie du corps d'un être humain (la main, par exemple).

Dispositifs haptiques non-portables :

Les dispositifs haptiques non-portables les plus utilisés pour l'assemblage virtuel sont des mécanismes de manipulation à bras articulé. La manière d'exploiter ces mécanismes est similaire à celle de commandes manuelles de manipulateurs pour les téléopérations : la manipulation d'un bras maître d'un télé-manipulateur. A la différence des bras maîtres, les interfaces de retour d'effort privilégient la légèreté, le confort, la sensibilité, la sécurité au détriment de la réduction d'un espace de

travail de l'utilisateur ainsi que de la difficulté de produire des efforts importants lors d'une manipulation virtuelle [Burdea 1999], [Fuchs & al. 2001].

Généralement, le dispositif à retour d'effort dispose de 2 à 6 DDL selon le modèle. Les interfaces les plus utilisées ont 3 ou 6 DDL en fonction des besoins de l'utilisateur. Ainsi, durant une manipulation virtuelle donnée, l'opérateur impose des déplacements en translation et/ou rotation (de 2 à 6 DDL) à un stylet ou à une poignée du bras articulé d'un dispositif à retour d'effort, et ces déplacements sont mesurés par ce dispositif. Alors, au cours de la manipulation, le système de simulation évalue les efforts à retourner, et le dispositif haptique agit donc sur la main de l'utilisateur en reproduisant en temps réel les efforts calculés selon le nombre de DDL autorisés. Par exemple, les interfaces à retour d'effort à 3 DDL retournent souvent soit trois forces, soit trois moments. Il existe également des interfaces à 6 DDL, produisant trois forces et trois moments, mais ces interfaces sont plus difficiles à réaliser mécaniquement [Fuchs & al. 2001]. Par conséquent, elles sont plus onéreuses.

Les interfaces à retour d'effort de type PHANToM de la société SensAble [Massie & al. 1994], [Sensable 2002] permettent l'acquisition des mouvements de la main selon 6 DDL et sont capables de produire un retour d'effort de 3 ou 6 DDL. Par exemple, le modèle PHANToM 1.5/6DOF a 6 DDL et restitue en retour d'effort à 6 DDL (trois forces et trois moments) sur une poignée (Figure 2.15a). Cette interface permet de générer une force maximum instantanée de 8,5 N et continue de 1,4 N dans l'espace de travail de $195 \times 270 \times 375 \text{ mm}^3$ en translation et jusqu'à 260° en rotation. Le modèle PHANToM Desktop est encore plus compact, disposant de 6 DDL pour l'acquisition des données d'entrées (les mouvements de la main) et restituant un retour d'effort de 3 DDL. Ce modèle permet de générer une force maximum instantanée de 6,4 N et continue de 1,7 N dans l'espace de travail de $160 \times 130 \times 130 \text{ mm}^3$ avec une résolution en position de 0,02 mm.

L'interface à retour d'effort Virtuose d'Haption [Haption 2003], déjà présentée et similaire au PHANToM, a une structure mécanique de type robot manipulateur, permet l'acquisition de 6 DDL en déplacements et en efforts et restitue un retour d'effort soit de trois, soit de six DDL. Par exemple, le modèle Virtuose 6D 35-40 (Figure 2.15b) permet de générer une force maximum instantanée de 35 N et continue de 10 N, un moment maximum instantané de 3 Nm et continu de 1 Nm dans l'espace de travail de $400 \times 400 \times 400 \text{ mm}^3$ en translation et $270^\circ \times 120^\circ \times 160^\circ$ en rotation.

Il existe également des manettes ou joysticks à retour d'effort, mais ils ont une difficulté à produire des moments et possèdent d'un espace de travail très limité (quelques centimètres cubes).

Enfin, il convient de noter que les informations concernant les efforts maximum des systèmes haptiques sont des valeurs fournies par les constructeurs et qu'elles ne sont pas constantes dans tout le volume de travail au cours de la manipulation virtuelle.

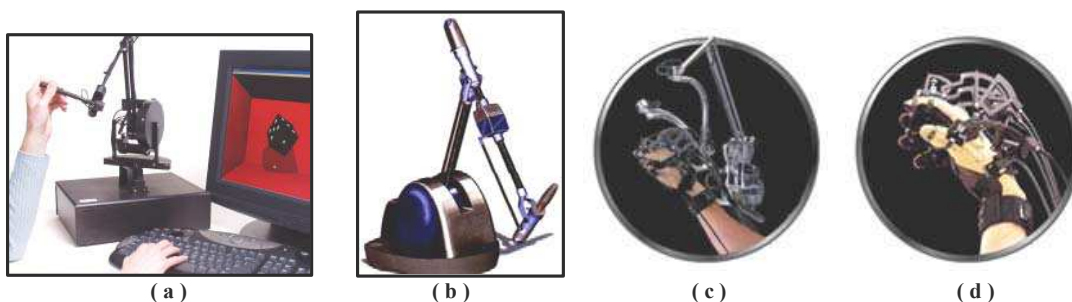


Figure 2.15. Exemples d'interfaces à retour d'effort :

(a) PHANToM à 6 DDL de SensAble [Sensable 2002], (b) Virtuose à 6 DDL d'Haption [Haption 2003], (c) CyberForce de Virtual Technologies, (d) CyberGrasp de Virtual Technologies [Immersion 2003].

Dispositifs haptiques portables :

On trouve parfois des dispositifs haptiques portables dans certaines applications d'assemblage virtuel. Un tel dispositif mécanique, attaché à la main de l'utilisateur ou même placé tout au long du bras, permet de réaliser un retour d'effort sur le poignet ou le bras en utilisant un système de tringles. L'inconvénient de tels dispositifs est leur poids important atteignant jusqu'à 5 kg selon des modèles. Afin de diminuer l'influence du poids d'un dispositif haptique portable, des modèles semi-portables,

dont la base peut être liée à un bâti, comme le mécanisme Dextrous Arm Master de la société Sarcos, sont proposés.

Les interfaces haptiques portables sont souvent réalisées sous forme d'exosquelette pour reproduire plus fidèlement le poids et l'inertie d'un objet virtuel tenu en main et contraindre une action de l'utilisateur si cet objet rentre en collision avec un obstacle [Fuchs & al. 2001]. Il est également intéressant d'utiliser ces dispositifs dans la simulation d'une tâche de préhension et de déformation d'un objet virtuel car les efforts de retour sont transmis à chaque doigt de l'utilisateur.

Le dispositif à retour d'effort CyberForce de la société Virtual Technologies [VirtTech 2002] comprend un gant de données CyberGlove, mesurant les déplacements de la main, muni d'un système à retour d'effort et relié à un bras articulé, et propose un retour d'effort à 8 DDL : trois efforts pour le bras articulé et cinq pour le gant (Figure 2.15c). Pour l'interface CyberGrasp, les forces sont fournies aux doigts par un réseau de câbles dont les tensions sont réglables à l'aide de cinq moteurs à courant continu (Figure 2.15d). La force continue maximale de retour, générée par ce dernier dispositif, est de 12 N par doigt pour un poids de 350 g sans le gant de données.

2.2.3.3. Interfaces sensorielles

Grâce à la construction originale de dispositifs haptiques, le retour d'effort est réalisé par la même interface que la capture des mouvements de l'utilisateur. Donc, ces interfaces ont une fonction de transmission sensorielle d'information au niveau des efforts, associés à une manipulation virtuelle. Toutefois, le retour visuel d'un résultat de simulation virtuelle est souvent nécessaire afin de mieux comprendre une action réalisée, de redéfinir une stratégie de recherche de trajectoire d'A/D, d'optimiser des opérations de manutention et de montage virtuelles, de contrôler la déformation de pièces à caractère flexible, etc. Donc, la fonction de visualisation de la RV est fréquemment utilisée durant la simulation d'opération d'A/D virtuelle basée sur l'exploitation des interfaces à retour d'effort pour le contrôle en effort d'une manipulation d'objet virtuel.

Les interfaces sensorielles de visualisation dans ce type de contrôle assurent le retour d'un résultat de simulation, produit par un système de RV, i.e. la visualisation des déplacements d'un objet virtuel imposés par l'utilisateur à l'aide d'un dispositif haptique, l'affichage d'une nouvelle forme déformée d'un objet flexible et de l'environnement extérieur à l'objet en question, l'indication des collisions par un changement de couleur des pièces en contact, etc. Les interfaces sensorielles de visualisation, utilisées pour le contrôle en effort, sont généralement les mêmes que dans le cas du contrôle en position, i.e. les systèmes de visualisation monoscopique et stéréoscopique, présentés ci-dessus. Donc, nous renvoyons le lecteur à la partie correspondante, illustrant les systèmes de visualisation de RV.

2.2.4. Définition des espaces des configurations et des efforts

Lors d'une manipulation de pièce dans un environnement virtuel, les performances d'un produit en assemblabilité, accessibilité, maintenabilité, etc. sont, d'une part, une fonction des paramètres géométriques de cette pièce, de son matériau et de son comportement physique ainsi que de son environnement extérieur. D'autre part, ces performances dépendent également des facteurs liés à un processus d'A/D, à savoir un état donné du produit à assembler/désassembler et une trajectoire d'A/D caractérisés par une séquence d'A/D donnée et une complexité de l'environnement extérieur, des objectifs et des actions d'un opérateur simulant une tâche d'A/D, des configurations initiale et finale pour une opération d'A/D donnée (forme initiale d'une pièce à manipuler à caractère flexible, point à atteindre correspondant à un montage final,...), un type d'opération d'A/D (manuelle, robotisée, nombre de mains/personnes,...) et même des moyens mis en œuvre pour la simulation de manipulation virtuelle (contrôle en position/effort, caractéristiques des interfaces utilisées dans la simulation virtuelle,...). Toutefois, durant la simulation virtuelle, la plupart des éléments énumérés ci-dessus sont finalement exprimées sous la forme de paramètres d'entrée/sortie pour une manipulation donnée. On a vu que ces paramètres sont souvent des paramètres :

- statiques, i.e. paramètres inchangés lors d'une manipulation donnée tels que les propriétés de l'environnement extérieur d'un objet virtuel, certaines caractéristiques de l'objet à manipuler lui-même, etc.,

- dynamiques comme les déplacements et la trajectoire A/D d'un objet virtuel imposés par l'opérateur, les efforts appliqués par l'opérateur à l'objet virtuel à manipuler, les déformations éventuelles de cet objet calculées par le système de simulation de RV, les efforts associés à la trajectoire d'A/D choisie et dus aux propriétés physiques de l'objet manipulé, aux collisions avec des obstacles, etc.

Les paramètres dynamiques, imposés par l'utilisateur au cours d'une manipulation virtuelle, forment les données d'entrée capturées, traduites et transmises par des interfaces de RV à un système de simulation de RV. Les paramètres dynamiques de sortie sont des résultats de la simulation, fournis par le système de simulation de RV en temps réel. Tout résultat de simulation représente une réponse du système mécanique, soumis aux contraintes de simulation imposées par l'utilisateur comme de multiples paramètres géométriques et physiques d'entrée (dynamiques, statiques). Il est donc intéressant du point de vue de la résolution du problème de manipulation de pièces virtuelles (rigides, flexibles), des données d'entrée/sortie pour la simulation, de la recherche de paramètres optimum pour l'analyse des opérations d'A/D, etc. d'adapter certaines notions utilisées fréquemment en robotique [Mikchevitch & al./2 2003], [Mikchevitch & al./1 2004], [Mikchevitch & al./2 2004]. Partant de quelques définitions d'espaces de manipulation d'un robot [Chedmail & al. 1998], celles-ci seront adaptées à la problématique de simulation de pièces rigides et déformables pour l'A/D virtuel.

2.2.4.1. Espace des configurations

L'espace de « travail » d'une pièce virtuelle à caractère rigide ou flexible dans son environnement extérieur est défini à partir d'un ensemble de configurations accessibles par un repère mobile (x, y, z), lié à cette pièce. En effet, ce repère est, d'une part, lié à l'utilisateur qui manipule l'objet virtuel et représente le repère d'une main virtuelle. D'autre part, les déplacements de ce repère mobile représentent soit les déplacements de toute la pièce, comme la trajectoire de désassemblage d'une vis modélisée par un cube rigide (Figure 2.16a), soit les déplacements d'une partie de la pièce, comme une section S_n représentant une extrémité manipulée d'un tube flexible, modélisé par une ligne moyenne, dont la seconde extrémité est déjà fixée (Figures 2.16b,c). Dans ce dernier cas, il faut parler d'ensemble de toutes les formes déformées de la pièce virtuelle flexible et pas uniquement de la seule extrémité manipulée, afin de pouvoir déterminer l'espace de travail de cette pièce.

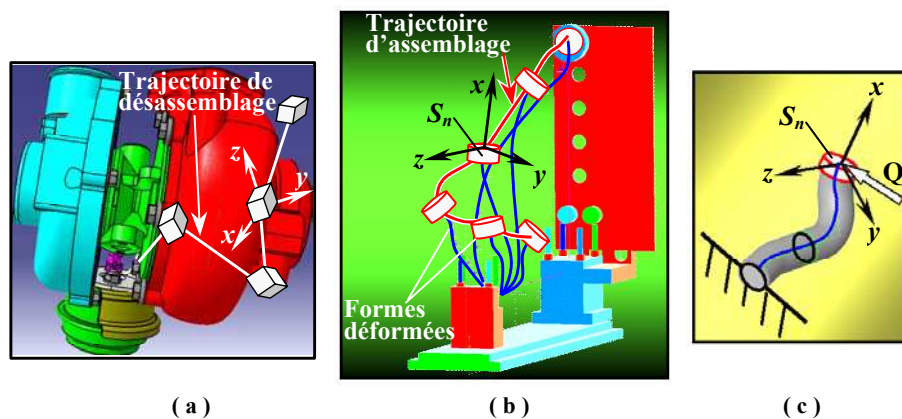


Figure 2.16. Exemples de manipulation de pièces virtuelles :

- (a) planification de trajectoire de désassemblage d'une vis d'un turbocompresseur (courtoisie BMW),
 (b) planification d'une trajectoire d'assemblage d'un tube flexible,
 (c) modélisation d'un tube flexible.

Nous appelons alors l'espace de travail de la pièce virtuelle *espace des configurations*, y compris l'ensemble de toutes les formes déformées intermédiaires de la pièce au cours de sa manipulation. L'espace des configurations peut être scindé en sous-espaces des positions accessibles et des orientations possibles. Lorsqu'il s'agit d'un environnement libre d'obstacles, l'accessibilité est définie par l'espace des configurations géométriques possibles de la pièce (rigide ou déformable). Par

contre, si des obstacles sont présents dans un environnement, nous proposons de découper l'espace des configurations en trois types d'espaces :

- l'*espace des configurations libres* est l'espace des configurations possibles (atteignables) de la pièce et libres des collisions avec tous les obstacles présents dans l'environnement,
- l'*espace des configurations contraintes* est l'espace des configurations comprenant des contacts entre la pièce flexible déformée et les obstacles dans la position finale d'assemblage. Dans ce cas, la pièce flexible assemblée est complémentaiement déformée par l'obstacle,
- l'*espace des configurations inaccessibles*, à savoir des obstacles, des zones géométriquement inaccessibles par la pièce à manipuler, des configurations géométriques où la forme déformée de la pièce flexible a atteint une valeur maximale de la courbure en un point, etc.

2.2.4.2. Espace des efforts

Considérons une manipulation d'A/D d'une pièce flexible de type poutre flexible dont une de ses deux extrémités est encastrée (Figures 2.16b,c). Alors, deux catégories de manipulations de cette pièce sont distinguées selon que la deuxième extrémité de la pièce est astreinte à suivre une trajectoire d'A/D imposée soit « physiquement », soit « géométriquement ». La trajectoire d'A/D imposée physiquement (mécaniquement) est celle qui correspond à la déformation de la pièce due à des efforts appliqués par un opérateur. Dans ce cas, la trajectoire n'est pas connue, et seuls les efforts appliqués sont des paramètres prédéterminés. La trajectoire d'A/D imposée géométriquement est celle qui correspond à la déformation de la pièce en fonction d'un ensemble de points à parcourir, définis par l'utilisateur. Ici, les efforts extérieurs à développer, associés à la trajectoire désirée, deviennent des inconnues, et seules les positions géométriques de points de passage sont des paramètres prédéterminés.

Donc, à toute trajectoire d'A/D imposée mécaniquement ou géométriquement lors de la manipulation d'un objet, les efforts à appliquer à cet objet afin de réaliser une telle trajectoire sont associés. En effet, lorsqu'un être humain déplace un objet matériel dans l'espace, il développe toujours des efforts en produisant un certain travail le long de la trajectoire associée. Ainsi, toute trajectoire sous-entend l'existence d'un chemin de chargement définissant les valeurs des efforts à développer ainsi qu'une manière de les appliquer (simultanément, proportionnellement,...). Ainsi, nous introduisons un espace supplémentaire appelé *espace des efforts* associés à tout déplacement d'un objet virtuel (rigide ou déformable).

L'espace des efforts définit les efforts nécessaires à développer et une façon dont ils sont appliqués afin de pouvoir atteindre une configuration finale, i.e. une position de montage/démontage lorsque la trajectoire d'A/D (un ensemble de points dans l'espace) est inconnue. Quand la trajectoire est imposée, cet espace indique quels efforts doivent être développés afin de satisfaire à cette trajectoire. Donc, dans ce dernier cas, le système de simulation de RV produit en quelque sorte la réponse « mécanique » d'un système mécanique (un objet virtuel manipulé possédant des propriétés mécaniques comme la masse, le matériau, etc.) dans l'espace des efforts. Il est également possible de découper l'espace des efforts en différents sous-espaces, par exemple :

- l'*espace des efforts sans contraintes* qui définit des efforts dont l'application n'entraîne pas de configurations géométriques ou mécaniques inadmissibles comme des zones inaccessibles ou difficilement atteignables dans l'espace des configurations, des efforts dont les valeurs sont très élevées du point de vue de l'ergonomie, etc.,
- l'*espace des efforts inaccessibles*, à savoir des efforts à éviter tels que des efforts importants du point de vue de l'ergonomie, des efforts entraînant l'apparition de contraintes dangereuses dans la pièce du point de vue de la conception mécanique, etc.

2.2.4.3. Parallèles entre le contrôle en position/effort et la manipulation d'un objet virtuel dans différents espaces

A toute manipulation d'un objet virtuel possédant des propriétés mécaniques, la génération de déplacements de cet objet, de déformations de la forme géométrique, d'efforts correspondants est toujours associée. En effet, la manipulation de cet objet dans son environnement virtuel est équivalente

à l'évolution de cet objet dans l'espace des configurations (la génération de la trajectoire d'A/D, des formes déformées,...) ainsi que dans l'espace des efforts associés à chaque déplacement de cet objet. Ainsi, on peut tracer quelques parallèles entre le contrôle en position/effort (ou en admittance/impédance), déjà considéré dans cette section, et la manipulation d'un objet virtuel dans les espaces des configurations/efforts introduits.

On a vu que toute simulation virtuelle est basée sur la manipulation d'un objet virtuel à partir des données d'entrée en efforts ou en déplacements ainsi que sur la perception sensorielle des résultats de la simulation qui représentent des données de sortie également en efforts et en déplacements. Chaque simulation virtuelle est équivalente à un contrôle en position ou/et effort grâce aux interfaces de contrôle de RV. Alors, il est utile de considérer une telle simulation dans les deux espaces introduits précédemment, i.e. l'espace des efforts et celui des configurations.

Effectivement, la définition temps réel de données d'entrée géométriques dans l'espace des configurations (un ensemble de points à parcourir, par exemple) est conforme à la manipulation d'un objet virtuel dans son environnement à l'aide des interfaces motrices de RV, permettant de localiser cet objet dans l'espace. Le calcul des déplacements et des déformations d'un tel objet sous-entend l'évaluation des efforts associés à cette manipulation. Donc, il s'agit de la recherche d'une réponse du système mécanique manipulé dans l'espace des efforts, ce qui est équivalent à un contrôle en effort. Des efforts évalués par le système de simulation peuvent être perçus par l'intermédiaire d'interfaces haptiques de RV. Inversement, lorsque les interfaces motrices fournissant des efforts sont utilisées, un être humain sollicite un objet virtuel en temps réel, en définissant un chemin de chargement dans l'espace des efforts, et contrôle le résultat de la simulation concernant des déplacements et des formes déformées produits par le système de simulation de RV. Ceci est une réponse du système mécanique manipulé dans l'espace des configurations. Cette réponse est visualisée en temps réel, en utilisant des interfaces sensorielles de visualisation, et contrôlée par l'utilisateur ; ainsi il s'agit d'un contrôle en position.

Donc, chaque manipulation virtuelle avec un contrôle en effort/position est équivalente à une manipulation d'un objet virtuel dans les espaces de configurations/efforts. Ainsi, la manipulation dans les espaces de configurations/efforts est mise en relation avec un contrôle en effort/position lors d'une simulation virtuelle et sera utilisée par la suite dans ce présent mémoire. Par conséquent, à chaque simulation dans les espaces de configurations/efforts, les données d'entrée/sortie appelées Conditions aux Limites (CLs) mécaniques (efforts) et géométriques (positions et orientations) sont associées. Cette notation sera également souvent utilisée par la suite dans le mémoire.

L'analogie mise en évidence entre la simulation d'un objet virtuel dans les espaces de configurations/efforts et le contrôle en effort/position n'est pas fortuite. Cette relation permet de faire apparaître certaines particularités de simulation de comportement physique des objets virtuels (rigides ou flexibles) qui sont incorporées dans la simulation virtuelle. Notamment, ceci nous permettra de montrer par la suite des relations complexes entre l'évaluation de la géométrie déformée d'une pièce flexible et les efforts associés. Néanmoins, il semble nécessaire de préciser quelques aspects importants au niveau de l'association et des relations générales entre la simulation dans l'espace des efforts et celui des configurations d'un objet virtuel. En effet, lorsqu'il s'agit d'une simulation dans l'espace des efforts, associée en robotique à une commande en effort et à un contrôle en position, une réponse temps réel doit être trouvée dans l'espace des configurations à partir des CLs mécaniques appliquées, à savoir une trajectoire d'A/D et l'ensemble de toutes les formes déformées d'une pièce à caractère flexible. Ce type de problème est appelé en robotique modèle direct permettant de calculer toutes les configurations intermédiaires de l'organe terminal d'un robot ou, dans notre cas, toutes les formes déformées de la pièce flexible en fonction des efforts appliqués. Dans ce type de manipulation, la solution (ou la réponse) dans l'espace des configurations est unique, même si l'on ne sait pas a priori si la pièce virtuelle se retrouve dans l'espace des configurations libres ou contraintes durant sa manipulation ou si les efforts appliqués vont entraîner l'apparition de contraintes importantes dans la pièce. Cependant, il convient de noter que des problèmes de stabilité existent lors de l'application des forces critiques de compression, ce qui peut conduire à un problème de multiplicité de solutions possibles dans l'espace des configurations. Ce cas n'est pas considéré dans le mémoire.

Lorsqu'il s'agit d'une simulation dans l'espace des configurations, associée en robotique à une commande en position et à un contrôle en effort, une tâche d'A/D virtuel est définie de façon suivante : trouver une réponse temps réel du système mécanique dans l'espace des efforts à partir d'un

ensemble de points de passage à parcourir par une pièce virtuelle, prescrits par l'utilisateur dans l'espace des configurations libres. L'ensemble de ces points détermine en temps réel une trajectoire d'A/D désirée et forme des CLs géométriques dans l'espace des configurations. Ainsi, la réponse du système mécanique (par exemple, une pièce flexible) correspondant à la trajectoire d'A/D doit être trouvée dans :

- l'espace des efforts, à savoir les efforts extérieurs à développer afin de réaliser une tâche d'A/D ou de maintenance,
- l'espace des configurations, i.e. des formes déformées de la pièce flexible, car les CLs géométriques ne définissent souvent que les déplacements d'une partie de la pièce flexible, par exemple, les déplacements d'une extrémité d'un tube flexible (Figures 2.16b,c). Un repère mobile de cette partie est fréquemment attaché à une main virtuelle.

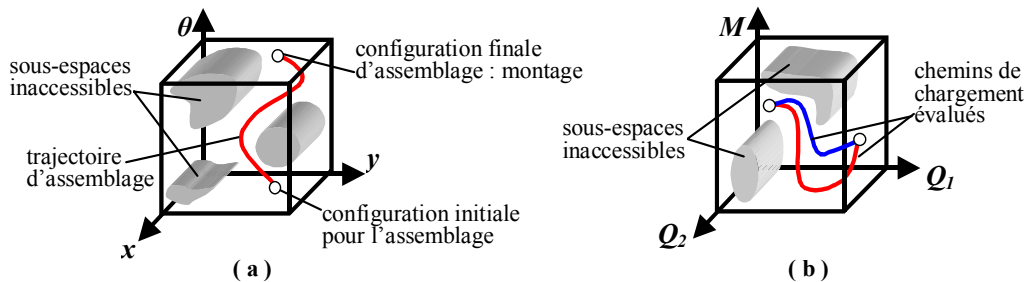


Figure 2.17. Recherche simultanée d'une réponse d'un système mécanique dans deux espaces associés :
(a) manipulation dans l'espace des configurations (x, y, θ) avec une trajectoire d'assemblage dans l'espace des configurations libres, (b) réponses multiples dans l'espace des efforts (Q_1, Q_2, M), correspondant à une seule trajectoire d'assemblage donnée.

Dans ce cas, la réponse du système mécanique dans l'espace des efforts n'est pas unique à cause des solutions multiples, car il existe différents chemins de chargement de la pièce à manipuler permettant d'atteindre une position donnée d'un point courant de la trajectoire d'A/D définie (Figure 2.17). Ce type de problème est appelé en robotique *modèle inverse* permettant de calculer les coordonnées articulaires d'un robot ou, dans notre cas, des efforts nécessaires à développer afin d'atteindre un point donné de la trajectoire d'A/D.

2.2.5. Analyse des concepts de manipulation d'objets

Un des objectifs de la RV, présentés au début de ce chapitre, est de permettre à un être humain de pouvoir non seulement créer un monde virtuel, simuler un événement irréel, mais également offrir à l'homme un outil pour étudier un processus ou un phénomène donné ainsi que ses propriétés en se basant sur l'interaction avec l'objet étudié. Cette section a présenté les principales interfaces d'interaction de RV pour la simulation et l'étude des opérations d'A/D et de maintenance virtuelles. Les interfaces présentées utilisent principalement deux des cinq sens d'un être humain : la vision et le toucher. Cependant, il faut préciser qu'il existe d'autres interfaces de RV qui regroupent différentes sensations au niveau du toucher, autres que celles présentées dans cette section. Toutefois, ces interfaces sont encore en stade de développement ou d'essai et ne sont pratiquement pas utilisées (à part quelques interfaces sensorielles sonores) dans le domaine de l'A/D virtuel.

En ce qui concerne des interfaces employées actuellement ou susceptibles d'être employées en simulation d'assemblage virtuel, elles sont assez nombreuses sur le marché et leur utilisation dépend des besoins de l'utilisateur, de l'application de RV, et surtout des caractéristiques techniques de ces interfaces et des moyens financiers mis à disposition pour la réalisation d'une telle simulation. Toutefois, les interfaces présentées sont classées en fonction de leurs capacités à contrôler un événement virtuel, notamment, la simulation d'un objet à caractère rigide ou flexible pour l'A/D virtuel, à étudier le processus et les propriétés d'un objet virtuel déformable au cours d'une manipulation pour l'A/D en se basant principalement sur deux catégories de données d'entrée/sortie et, par conséquent, deux types de contrôle : une information géométrique (trajectoire d'A/D, configurations spécifiques à atteindre, formes déformées d'une pièce à caractère flexible,...) et des

efforts associés à une manipulation donnée (solicitation d'un objet rigide ou flexible, retour d'efforts dus aux propriétés physiques de cet objet, à la déformation, aux collisions avec des obstacles,...). Les interfaces motrices, utilisées généralement pour capturer une information d'entrée (déplacements d'une main, mouvements corporels de l'opérateur, efforts appliqués à un objet virtuel, ...), sont les interfaces de type :

- localisation spatiale des mouvements : les souris 2D ou 3D, les joysticks, les gans de données, les capteurs de mouvement, etc.,
- haptiques, à savoir les dispositifs à retour d'effort munis d'un capteur d'effort.

La perception temps réel d'une information de sortie, à savoir des données de nature géométrique comme la trajectoire d'A/D, la déformation d'une pièce flexible, l'environnement extérieur, les données mécaniques comme les efforts dus à la manipulation, la déformation ou la collision, fournies par le système de simulation de RV, le contrôle et l'analyse des résultats de simulation d'une opération d'A/D virtuelle se réalisent principalement à l'aide des interfaces sensorielles de type :

- visuelles : les systèmes de visualisation monoscopiques/stéréoscopiques comme les écrans d'un ordinateur ou d'une salle immersive, les lunettes de vision stéréoscopique, les visiocasques, etc.,
- haptiques : les dispositifs à retour d'effort de type bras articulé, les exosquelettes, etc.

Bien évidemment, le choix d'une interface d'interaction dépend des objectifs de la simulation. Néanmoins, les caractéristiques technologiques et ergonomiques de telle ou telle interface influent fortement sur la qualité de la manipulation virtuelle et donc, sur les résultats de la simulation. Ceci est un facteur très important dans l'étude, l'analyse, l'optimisation d'une opération d'A/D ou de maintenance. Par exemple, le résultat de la simulation dépend beaucoup des données d'entrée, mesurées à l'aide des interfaces motrices. Ainsi, les interfaces motrices de localisation spatiale ont de très bonnes caractéristiques techniques, en ce qui concerne la précision de mesure d'une variable géométrique (jusqu'à 0,01 mm pour la position et 0,1° pour l'orientation) et un volume de travail assez considérable par rapport à celui des interfaces haptiques (jusqu'à quelques mètres cubes selon l'interface). La plupart de ces interfaces sont moins contraignantes par rapport aux actions de l'utilisateur, qui peut réaliser pratiquement toutes les configurations dans l'espace en manipulant un objet virtuel, et considérablement moins onéreux que les mécanismes haptiques. Ainsi, les interfaces de localisation spatiale possédant 6 DDL permettent de fournir une bonne information d'entrée ce qui sous-entend l'obtention de résultats cohérents durant la manipulation virtuelle. En outre, un ensemble de capteurs de mouvement, placés sur un corps de l'opérateur, permet d'animer en temps réel un mannequin virtuel dont l'utilisation est souvent indispensable pour l'étude la plus complète d'une opération d'A/D ou de maintenance, i.e. pour l'évaluation de l'ergonomie des gestes d'un monteur, le contrôle de collisions entre le corps humain et l'environnement, la vérification d'accessibilité, etc.

Néanmoins, il est aussi intéressant et parfois indispensable d'avoir une manipulation d'objet virtuel soumis à une sollicitation, mais aussi d'avoir un retour en termes d'efforts afin de simuler le plus fidèlement possible une opération virtuelle compte tenu du comportement physique d'un tel objet. Technologiquement, ce problème est actuellement résolu en utilisant les interfaces sensori-motrices haptiques à retour d'effort. Ces interfaces permettent de réaliser non seulement un retour temps réel d'efforts dus à la masse, l'inertie, la déformation d'un objet manipulé, aux collisions avec des obstacles, etc., mais aussi de fournir des données d'entrée en termes d'efforts, si elles sont munies d'un capteur d'effort. Donc, ces interfaces permettent d'effectuer un contrôle en effort en en position, contrairement à la plupart des interfaces motrices de localisation spatiale, qui ne sont utilisables que pour un contrôle en position.

Il existe certaines interfaces motrices ou sensori-motrices de type souris 3D SpaceMouse ou SpaceBall et les joysticks, dont le principe de fonctionnement peut être basé sur la mesure des efforts appliqués. Toutefois, ces dernières interfaces souffrent d'un couplage des efforts, car il est difficile d'appliquer des forces sans moments [Fuchs & al. 2001]. De plus, l'utilisation fréquente de capteurs de pression ne permet pas de mesurer ou de déduire parfaitement les efforts à appliquer à un objet virtuel par rapport à ceux qui sont réellement appliqués à un tel dispositif. Par conséquent, cela a un impact sur la manipulation cohérente d'un objet virtuel et donc sur la simulation. En effet, les efforts

appliqués à un tel dispositif et mesurés ou calculés à partir des déformations d'une SpaceBall, par exemple, et appliqués ainsi à un objet virtuel et ceux, que l'on pense appliquer réellement, peuvent être de nature tout à fait différente. Notamment, il faut pouvoir déduire les forces et les moments à appliquer à un objet virtuel à partir de la pression sur la boule et d'un changement de son orientation afin de générer des déplacements de l'objet virtuel. Alors, les efforts trop approximatifs transmis par l'interface comportementale au système de simulation vont produire une simulation incohérente d'un comportement d'un objet virtuel tant au niveau du calcul de trajectoire d'un objet rigide qu'en matière de génération d'une forme déformée d'un composant flexible.

En revenant aux dispositifs haptiques à retour d'effort souvent utilisés dans la simulation des opérations d'A/D ou de maintenance virtuelles, ces interfaces sont capables de mesurer des efforts appliqués grâce à un capteur d'effort intégré, comme l'interface Virtuose 6D d'Haption. En effet, les interfaces, dont la construction est basée sur la manipulation d'un bras articulé, sont moins contraignantes que celles à base de boule ou de joystick, car elles disposent d'un volume de travail plus important et leur construction est plus adaptée en ce qui concerne la manipulation d'un objet virtuel et notamment dans le domaine de l'A/D virtuel. Les dispositifs à base de bras articulé permettent la mesure des efforts appliqués qui vont servir à la génération des déplacements d'un objet virtuel. Cependant, le but principal des interfaces haptiques est de réaliser en temps réel un retour d'effort en se basant sur l'utilisation d'une des fonctions de perception d'un être humain – le toucher. Ainsi, ces interfaces sont très utiles pour de meilleures compréhension, étude, analyse d'une manipulation virtuelle. Ceci est particulièrement intéressant dans l'optimisation des opérations d'A/D et de maintenance, de l'architecture d'un produit développé ainsi que dans l'apprentissage du personnel.

Néanmoins, comme tout mécanisme, le dispositif haptique à retour d'effort comprend une partie motrice, une transmission d'efforts, des capteurs d'effort, etc. avec un équipement correspondant selon le modèle (moteurs électriques à courant continu ou brushless avec l'utilisation des électroaimants, transmissions hydrauliques, engrenages, câbles ou courroies de transmission, manettes ou bras métalliques,...). Par conséquent, les dispositifs haptiques ont des éléments perturbateurs, influençant la qualité de capture de mouvements et d'efforts ainsi que lors de la perception de données de sortie en termes de retour d'efforts, à savoir :

- la masse/inertie des éléments du dispositif haptique,
- les frottements dans les éléments mécaniques de transmission,
- la difficulté de production de forces ou de moments importants due aux particularités constructives des dispositifs haptiques à retour d'effort,
- etc.

En effet, le problème d'une solution constructive d'un mécanisme haptique est très important. La masse et l'inertie du dispositif haptique, les pertes par frottements, etc. modifient les données d'entrée/sortie pour la simulation/perception ce qui peut perturber considérablement une simulation de comportement mécanique d'un composant virtuel à caractère déformable, i.e. le chargement d'une structure et donc, les résultats de simulation du comportement ne seront plus cohérents par rapport à la réalité malgré l'intégration d'un modèle mécanique de déformation, par exemple. Un effort parasite dû au poids d'un dispositif haptique peut également transformer sensiblement la perception d'un résultat de la simulation virtuelle, en particulier, lorsque qu'un tel dispositif ne permet pas de développer des efforts de retour importants et ne travaille que dans une zone réduite concernant la sensation d'efforts. D'autres problèmes, liés à la conception des interfaces haptiques, souvent contradictoires et difficilement évitables, sont présents et abordés dans [Buttolo & al. 1995], [Kuehne & al. 1995], [Ellis & al. 1996], [Clover & al. 1997], [Buttolo & al. 2002]. En particulier, une mauvaise conception d'une interface haptique à retour d'effort peut conduire à :

- l'apparition de singularités mécaniques du mécanisme,
- la réduction du volume de travail en termes d'accessibilité pour l'utilisateur,
- au manque de compacité, de rigidité de l'interface, etc.

Les problèmes énumérés ci-dessus peuvent finalement conduire à l'obtention de résultats de simulation incohérents ou parfois, complètement faux par rapport à la réalité car ils sont basés sur les

données d'entrée/sortie modifiées par des éléments parasites, perturbateurs, etc. Par conséquent, la difficulté de produire des efforts réalistes mène tout simplement à l'approximation des efforts de retour, ce qui parfois est assez convenable, notamment, lorsque l'utilisateur n'a besoin que d'éviter des collisions avec des obstacles. En particulier, la technique la plus utilisée dans ce cas est basée sur la génération d'un effort très élevé et donc, le blocage complet d'un mouvement de l'opérateur conduisant à une collision. Ici, la valeur d'un tel effort peut être approximée par une relation de proportionnalité entre un effort de blocage et une distance de pénétration (avec un coefficient de proportionnalité assez important) ou par la génération d'un effort très important bloquant instantanément le mouvement (l'interdiction de passer à l'intérieur d'un obstacle avec la création d'une sensation de présence d'un mur) [Chablat & al. 2002]. Par ailleurs, la technique, basée sur la relation de proportionnalité entre un effort de réaction à évaluer et une distance de pénétration, est couramment utilisée dans le calcul approximatif temps réel des efforts de réaction lors d'une collision d'un objet virtuel avec un obstacle rigide [Salisbury & al. 1995], [Amundarain & al. 2003]. Cependant, ces techniques simplifiées restent assez restreintes vis-à-vis d'une tâche à réaliser et de composants virtuels à manipuler. Notamment, lorsqu'il s'agit d'une manipulation d'un composant à assembler à caractère flexible avec la génération temps réel d'une forme déformée réaliste due à une collision, ces techniques ne sont plus applicables car les résultats de simulation ne seront plus valables.

En conclusion, bien que s'en rapprochant, les interfaces à retour d'effort ne réalisent pas encore un retour d'efforts complet et réaliste. En conséquence, ceci soulève un problème d'exploitation et de validation des résultats d'une simulation virtuelle basée sur un retour d'informations incohérentes [Chedmail & al. 2001], [Burinage 2000]. Vis-à-vis de ces problèmes des interfaces sensori-motrices haptiques, les interfaces motrices de localisation spatiale semblent être plus répandues en termes d'adaptation et d'application dans différentes tâches de simulation virtuelle. Ces interfaces ont un volume de travail considérable par rapport aux dispositifs haptiques, ne gênent pratiquement pas les mouvements de l'opérateur et permettent de réaliser quasiment toutes les configurations possibles lors d'une action d'un être humain en l'absence de pertes de transmission des données d'entrée, d'informations parasites de différentes natures, de singularités mécaniques parce que l'homme est tout à fait libre dans le choix de ses actions. Néanmoins, certains capteurs de mouvements sont sensibles à la présence de pièces métalliques dans l'espace de travail de l'opérateur.

Malgré une certaine flexibilité des interfaces motrices de localisation spatiale par rapport aux interfaces haptiques, l'inconvénient le plus important des interfaces ne fournissant qu'une information géométrique en tant que données d'entrée est une certaine incohérence entre le comportement réel d'un être humain et la perception de l'information de retour lors des différents contrôles (en admittance, en impédance,...), basée bien évidemment sur l'information d'entrée. Malgré le fait que ces interfaces permettent de fournir une information géométrique d'entrée quasi parfaite (sans perturbations), malgré la simulation correcte d'un comportement physique à partir de cette information et la visualisation temps réel des résultats, malgré la possibilité d'être immergé dans le monde virtuel grâce aux interfaces de vision immersive, et souvent le prix beaucoup plus attractif (2500 dollars américains pour un système des capteurs Polhemus contre un dispositif haptique de type PHANTOM à 20000 dollars), l'information d'entrée en termes de géométrie ne reflète que des résultats d'une action d'un être humain. En effet, à chaque mouvement de l'homme, la génération des déplacements d'un objet réel pour une opération d'A/D s'effectue en réalité à partir d'un certain effort physique, développé par l'homme et exprimé sous la forme d'un travail musculaire. Ce travail est traduit par l'application d'efforts développés par l'homme à un tel objet réel. Le résultat est la génération de déplacements de cet objet dans l'espace, l'objet qui est dans la main de l'homme, par exemple, et donc, attaché à sa main. Alors, les déplacements de cet objet sont bien les résultats du travail de l'homme à travers les efforts appliqués. Ainsi, l'homme ne génère pas directement une information géométrique qui peut être parfaitement transmise par les interfaces de RV, mais il fournit une information physique en termes d'efforts, traduite ensuite en données d'entrée géométriques par les interfaces motrices ou sensori-motrices de RV. Donc, il convient de favoriser le développement d'interfaces permettant de mesurer des efforts et les transmettre à un système de simulation de RV. Ceci permettrait, par ailleurs, de rendre le fonctionnement du système de RV encore plus réaliste, car la réalisation physique des actions d'un être humain, leurs détection et transmission à l'aide d'interfaces motrices mesurant les efforts appliqués, ne seront plus séparées du résultat d'application de ces efforts, i.e. la génération de déplacements d'un objet virtuel contrôlés lors de sa manipulation.

2.3. Modèles de représentation d'objets virtuels déformables

2.3.1. Introduction

L'objectif des travaux de cette thèse est de contribuer au développement d'une méthodologie de simulation interactive des opérations d'A/D et de maintenance d'un produit comportant des pièces à caractère flexible dans un environnement de RV. Rappelons que dans ce contexte les principales contraintes de simulation sont :

- la modélisation cohérente d'un comportement physique d'un objet virtuel déformable,
- la simulation rapide d'un phénomène physique, i.e. la génération temps réel de la déformation d'un objet à caractère flexible,
- l'adaptation d'un modèle de déformation aux interfaces de RV et notamment, aux périphériques de RV utilisés pour la simulation d'A/D virtuel,
- etc.

En effet, la modélisation de la déformation d'un objet déformable doit être la plus cohérente possible par rapport à la réalité. Ce n'est qu'à cette condition que les résultats d'une simulation de comportement d'un objet déformable au cours d'une manipulation d'A/D virtuel peuvent être exploitables dans l'étude, l'analyse et l'optimisation d'une opération d'A/D donnée et/ou des paramètres intrinsèques d'un objet manipulé ou de tout le produit considéré. Ainsi, pour que les résultats d'une simulation de manipulation d'un objet déformable, à savoir les déplacements, les efforts, etc., soient réalistes, il convient d'effectuer une telle simulation de déformation en utilisant un modèle mécanique décrivant ce phénomène physique. Par conséquent, la simulation correcte des opérations d'A/D et de maintenance virtuelles nécessite l'intégration d'un modèle physique du comportement d'objets souples dans un environnement de RV.

Le temps de calcul est une contrainte principale pour toute simulation virtuelle. Donc, la génération de la déformation d'objet flexible doit être suffisamment rapide (de l'ordre de 0,1 s et moins) pour être considérée comme la déformation temps réel et donc, utilisée dans la simulation des opérations d'A/D virtuelles. Ceci est un facteur important pour la simulation interactive car l'étude d'une opération donnée ou d'un produit mécanique s'effectueront en direct, sans aucun pré-calcul, ce qui est intéressant pour l'analyse multi-vue et la prise de décision rapide durant différentes phases de développement du produit. De ce fait, des modèles physiques rapides doivent être utilisés dans la simulation interactive des opérations d'A/D virtuelles.

Enfin, les modèles physiques à intégrer dans un environnement de RV doivent être adaptés aux interfaces de RV utilisées dans le domaine d'A/D virtuel : les modèles de comportement de pièces flexibles, exploitables dans le cas d'un contrôle en effort/position, sont requis.

En pratique, les contraintes de simulation d'un comportement de pièces souples sont souvent contradictoires et difficiles à satisfaire. Effectivement, dès qu'il s'agit d'une simulation réaliste d'un phénomène physique complexe (par exemple, la génération des déplacements et/ou des déformations non-linéaires lors d'une manipulation d'un composant flexible), une telle modélisation sous-entend fréquemment un temps de calcul assez important par rapport au temps réel. Cependant, une simplification éventuelle d'un modèle physique ne conduit généralement pas à de bons résultats. En tout cas, il faut toujours chercher un compromis entre des besoins de l'utilisateur et les hypothèses simplificatrices utilisées afin de pouvoir atteindre l'objectif de la simulation. Par exemple, des modèles mécaniques linéaires de comportement de pièces soumises à des petits déplacements (modèles classiques de la résistance des matériaux) ne sont pas utilisables dans les cas de simulation d'un comportement mécanique de pièces flexibles dans le domaine de grands déplacements, géométriquement non-linéaires avec une déformation initiale importante. Par contre, dans certains cas, ces modèles de la résistance des matériaux peuvent être utilisés si les pièces flexibles sont soumises aux petits déplacements afin de diminuer le temps de calcul.

Il existe à ce jour un certain nombre de modèles comportementaux de pièces déformables, valables pour des petits ou grands déplacements et utilisables dans diverses simulations virtuelles, basées sur une manipulation interactive ou nécessitant des pré-calculs. Nous nous intéressons dans cette partie aux modèles mécaniques existants de représentation d'objets virtuels déformables. Ces

modèles seront présentés et analysés sous différents angles, en ce qui concerne les principales contraintes de toute simulation virtuelle ainsi que l'application possible dans la simulation des opérations d'A/D et de maintenance de pièces flexibles soumises à des grands déplacements et/ou grandes déformations.

2.3.2. Modèle basé sur une méthode d'éléments finis

Une méthode d'éléments finis (MEF) est une approche générale du calcul de structures déformables. Elle consiste en l'étude d'un comportement d'une structure déformable (par exemple, une pièce d'un multi-matériau soumise à des petits ou grands déplacements) à partir du *principe des travaux virtuels* qui relie le travail des efforts extérieurs, appliqués à une structure donnée, et l'énergie interne de déformation de la structure. Selon ce principe, le travail virtuel δW_{ext} , i.e. le travail des efforts extérieurs virtuels appliqués selon des déplacements virtuels dus à ces efforts correspond à la variation de l'énergie de déformation δW_{int} du système donné [Hughes 1987], [Trompette 1992], [Fuchs & al. 2001] :

$$\delta W_{ext} + \delta W_{int} = 0. \quad (2.1)$$

La variation de l'énergie interne d'un système mécanique peut être exprimée par le travail des efforts intérieurs en chaque point de la structure selon les déplacements de ces points dont l'ensemble forme un domaine D (structure donnée). Certaines relations concernant les efforts intérieurs et la géométrie déformée seront présentées au chapitre 4. Ces principes de base sont décrits dans [Timoshenko & al. 1959], [Timoshenko 1972], [Craig 1981].

Ainsi, un système d'équations aux dérivées partielles est obtenu à partir de l'équation (2.1) et soumis aux CLs géométriques (déplacements imposés de la structure ou du domaine D) ou physiques (efforts extérieurs appliqués) selon le problème à résoudre. Vu que le système d'équations différentielles est assez complexe, on procède à une approximation des inconnues (déplacements ou efforts à appliquer) en discrétisant le domaine D et l'on résout alors ce système d'équations. Ainsi, les principes de base de MEF sont :

- la discrétisation du domaine D en un ensemble de domaines plus simples, appelés *domaines élémentaires* ou *éléments finis* D_e , dont on connaît la solution (par exemple, un déplacement élémentaire approximé à l'aide de certaines fonctions de base),
- l'approximation de déplacements v_e du domaine D_e en certains points de D_e et, par interpolation, leur obtention en tout point de D_e ,
- l'approximation du comportement du domaine D (le calcul d'un déplacement inconnu v de la structure, par exemple) à partir de « l'assemblage » des déplacements élémentaires v_e de tous les domaines D_e , constituant la structure.

Par ailleurs, les relations de l'élasticité donnent accès à l'analyse de la structure déformable à étudier en termes de déformations ε et de contraintes normales σ et tangentielles τ dans la structure, une fois que les déplacements du domaine D sont déterminés [Timoshenko & al. 1959], [Timoshenko 1972].

Plus concrètement, la décomposition du domaine réel D en domaines élémentaires D_e , caractérisés par une forme géométrique choisie (barre, triangle, quadrangle, élément volumique,...) et un nombre de nœuds associés afin de définir cette forme, a pour résultat la génération d'un maillage du domaine réel. Par définition, le déplacement élémentaire v_e de chaque domaine D_e est une fonction dépendant des coordonnées x, y et z d'un point M de D_e [Trompette 1992], [Fuchs & al. 2001]. Par conséquent, on pose :

$$v_e = \sum_{i=1}^n v_i N_i(x, y, z), \quad (2.2)$$

avec n le nombre de nœuds de D_e , v_i les inconnues nodales, N_i les fonctions d'interpolation, exprimées selon une certaine forme mathématique (linéaire, polynomiale,...) et permettant d'approximer les déplacements nodaux de l'élément D_e .

La description des fonctions N_i se fait au travers des fonctions de base. Ces fonctions de base décrivent pour chaque nœud comment les variables qu'il contient influencent la fonction choisie. Ces fonctions de base sont généralement de la même forme pour tous les nœuds et de leur complexité dépendra de l'espace des fonctions représentables et donc, de la qualité de la solution [Debunne 2000]. La fonction d'interpolation N_i est souvent approximée par une fonction linéaire par morceaux, linéaire sur chacun des éléments : la valeur de cette fonction à chaque nœud vaut 1 si ce nœud est considéré et 0 sur tous les autres nœuds. Toute fonction linéaire par morceaux sur les éléments peut en effet être représentée comme une somme pondérée de ces fonctions de base, les poids associés à chaque nœud étant les valeurs prises par la fonction en ces nœuds. De plus, une condition de continuité sur la fonction approximant le déplacement nodal est imposée : les éléments voisins doivent avoir les mêmes déplacements aux nœuds partagés.

Une fois le vecteur \mathbf{v}_e déterminé à partir de ces déplacements nodaux, le principe des travaux virtuels peut être exprimé sous la forme matricielle :

$$\mathbf{K}_e \mathbf{v}_e = \mathbf{F}_e, \quad (2.3)$$

où \mathbf{K}_e est la matrice de raideur de l'élément D_e , \mathbf{F}_e est le vecteur des efforts nodaux appliqués à l'élément.

En fait, l'équilibre du système doit être vérifié sur chacun des éléments, ce qui se traduit par des équations en chaque nœud. La condition d'équilibre s'exprime analytiquement en chaque nœud comme une combinaison linéaire des valeurs prises par la fonction approximant les déplacements. En exprimant l'équation (2.2), linéaire pour chaque nœud du domaine D , un système d'équations linéaires de la forme de (2.3) est obtenu. Finalement, au cours de la résolution du problème, l'assemblage des D_e en D est effectué. Ainsi, le problème s'écrit sous la forme matricielle suivante :

$$\mathbf{K}\mathbf{v} = \mathbf{F}, \quad (2.4)$$

où \mathbf{K} est la matrice de raideur du système mécanique, déterminée à partir des caractéristiques géométriques (dimensions) et physiques du matériau de la structure (module d'Young, coefficient de Poisson,...), \mathbf{v} et \mathbf{F} sont les vecteurs des déplacements et des efforts externes appliqués en chaque nœud du domaine D maillé.

Afin de pouvoir résoudre le système (2.4), les CLs sont utilisées. En fonction de la nature de la manipulation d'un objet déformable virtuel, les CLs sont exprimées comme les déplacements imposés ou les efforts extérieurs appliqués en un certain nombre de nœuds de la structure maillée. Donc, le calcul de \mathbf{K}^{-1} peut être nécessaire.

En animation, on ne cherche généralement pas à trouver les positions d'équilibre d'un objet virtuel, mais plutôt sa déformation au cours du temps [Debunne 2000]. Dans ce cas, la résolution d'une expression générale de (2.4), exprimée également sous la forme matricielle et comprenant l'inertie et la viscosité du système mécanique, est nécessaire :

$$\mathbf{M} \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial t^2} + \mathbf{C} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{K}\mathbf{v} = \mathbf{F}, \quad (2.5)$$

avec \mathbf{M} et \mathbf{C} les matrices définissant la masse et l'amortissement du système mécanique, obtenues comme \mathbf{K} .

Les matrices \mathbf{M} , \mathbf{C} et \mathbf{K} dépendent des paramètres géométriques de l'objet déformable, des propriétés de son matériau ainsi que de la géométrie des éléments constituant le maillage. Elles doivent donc être recalculées à tout moment lorsque la déformation d'un tel objet se produit, ce qui est coûteux en termes de temps de calcul et d'espace mémoire. Afin de préserver la fluidité des images, une technique souvent utilisée consiste à considérer ces matrices comme constantes. Cette approximation linéarisée du comportement de l'objet déformable ne peut être intéressante que pour une

structure produisant des petits déplacements et petites déformations. Toutefois, cette méthode n'est plus utilisable lorsqu'il s'agit de simuler correctement du point de vue mécanique le comportement d'un objet soumis à des grands déplacements et grandes déformations. Ici, le comportement physique du matériau ainsi que les déplacements de la structure ne sont plus linéaires et demandent une autre approche afin d'obtenir des valeurs réalistes des paramètres caractérisant la déformation et donc, utilisables dans l'analyse d'une manipulation virtuelle.

Par ailleurs, en statique, la mise à jour de la matrice \mathbf{K} et l'approximation des déplacements nodaux par les fonctions d'interpolation linéaires de l'équation (2.2) ne permettent pas non plus de modéliser correctement un objet déformable soumis à des grands déplacements. Une autre technique pour la MEF, permettant de simuler plus correctement du point de vue mécanique le comportement d'un objet flexible, est basée sur l'utilisation de fonctions d'interpolation N_i non-linéaires. Par conséquent, ceci freine fortement le processus de calcul même pour des éléments finis simples de type poutres 1D ou triangles 2D, utilisés pour le maillage [Léon & al. 1999], [Mikchevitch & al./1 2003]. Les problèmes de modélisation du comportement non-linéaire d'éléments finis ainsi que la génération d'un maillage adapté sont discutés dans [Wu & al. 2001].

L'une des premières applications de la MEF dans le domaine de RV, à part la visualisation « statique » de résultats scientifiques de modélisation, fut une simulation d'un contact entre une main et une balle déformable avec une détection de collisions quelque peu empirique et une modélisation simplifiée des doigts [Gourret & al. 1989]. La matrice de raideur est remise à jour lorsque les articulations des doigts ont bougé de plus de dix degrés.

Afin de diminuer le temps de calcul, une approche, basée sur le principe que seuls les déplacements des nœuds de la surface sont pertinents visuellement, avait été proposée par M. Bro-Nielsen et S. Cotin. Le système (2.4) peut être alors réécrit en séparant les nœuds de surface de ceux de l'intérieur de la structure déformable [Bro-Nielsen & al. 1996]. Cette méthode aboutit à un système matriciel qui ne concerne plus que les nœuds de la surface, donc de taille bien moindre, mais qui a, en contrepartie, perdu sa structure de matrice creuse [Debunne 2000]. En matière de comportement mécanique, une telle simulation temps réel ne représente qu'une simulation rapide et simplifiée de la déformation en surface dans le domaine de petits déplacements, sans aucun lien physique entre la frontière et l'intérieur la structure elle-même, donc il ne s'agit plus de modélisation de comportement réaliste d'un objet virtuel déformable.

Une approche, proposée par D. James et D. Pai est basée sur l'approximation de l'équation (2.4) par des différences finies avec la mise à jour de la matrice inversée \mathbf{K}^{-1} . Lorsque l'utilisateur manipule un outil virtuel pour déformer l'objet, peu de nœuds passent du statut de déplacé à celui de libre, et inversement. Les auteurs ont alors fait remarquer que la matrice inverse n'était que peu modifiée dans ces cas. L'influence d'un nœud étant limitée à une colonne de la matrice, il est possible de la remettre à jour rapidement à l'aide de pré-calculs lourds, l'animation restant ainsi temps-réel [Debunne 2000]. Cette approximation concerne également un objet virtuel déformable soumis à des petits déplacements. De plus, les auteurs ont proposé une méthode d'éléments frontières (BEM Boundary Element Method), basée sur la MEF mais nécessitant la discrétisation d'une surface uniquement. Ainsi, la déformation temps-réel de la surface d'un objet flexible soumis à des petits déplacements est modélisée en représentant les efforts à l'intérieur d'un tel objet (par exemple le poids) comme des CLs supplémentaires appliquées à la surface maillée représentant la frontière de l'objet déformable (Figure 2.18a) [James & al. 1999]. Cependant, une telle simulation de déformation rapide ne permet pas non plus de modéliser correctement le comportement mécanique d'un objet flexible soumis à des grands déplacements.

G. Debunne propose de chercher à générer automatiquement les déformations linéaires d'un objet mou (un organe humain avec des caractéristiques matériau complexes et difficiles à déterminer) pour la simulation des opérations destinée à la formation des chirurgiens (Figure 2.18b). Une méthode de simulation multi-résolution, qui adapte automatiquement, en fonction de chaque zone de l'objet, la précision des calculs à l'aide de différents maillages adaptés afin d'obtenir un compromis entre une simulation grossière et très rapide ou au contraire, une animation plus précise utilisant davantage de nœuds, est proposée [Debunne 2000]. La partie de l'organe proche de l'outil manipulé par l'utilisateur est ainsi simulée avec une grande précision en temps réel. La précision diminue dans les régions éloignées de la partie manipulée, moins importantes visuellement, représentées par un maillage plus grossier. Ces travaux ont abouti à la réalisation de prototype d'un simulateur chirurgical offrant une

animation temps réel grâce à l'utilisation de la multi-résolution. Néanmoins, il s'agit aussi d'objets déformables utilisant un modèle de petits déplacements, ce qui n'est plus applicable au problème de grands déplacements. De plus, le problème de représentation correcte de déformation d'un objet mou nécessite aussi la détermination/validation et l'intégration des lois de comportement non-linéaires physiquement. Il en résulte visuellement une certaine impression de réalisme bien que les résultats obtenus ne soient pas fidèles aux phénomènes mécaniques mis en jeu.

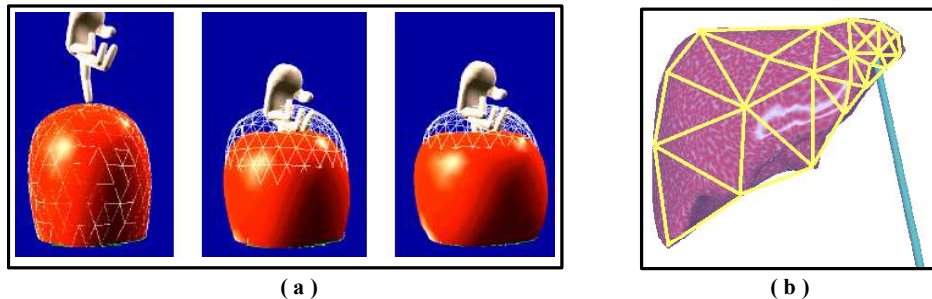


Figure 2.18. Exemples d'application de la MEF dans la simulation d'objets virtuels déformables :
 (a) BEM – une des modifications de la MEF [James & al. 1999] ;
 (b) simulation multi-résolution basée sur le principe de la MEF [Debunne 2000].

Pour conclure la présentation des approches à base d'EF et ses différentes interprétations, notons que le réalisme dans la simulation du comportement physique des objets déformables dépend, d'une part, des fonctions d'interpolation choisies selon la précision voulue en ce qui concerne les déplacements nodaux. Elles caractérisent ainsi les propriétés et le comportement de chaque élément de la structure déformable soumise aux petits ou grands déplacements. D'autre part, la qualité du maillage, qui est une fonction du type d'élément utilisé, de ses propriétés et taille, etc. joue également un rôle important dans la simulation réaliste du comportement d'un objet déformable. En effet, il existe plusieurs types d'élément selon le comportement recherché pour modéliser au mieux la déformation de la structure : les poutres, les éléments plaques ou coques, les éléments volumiques, etc. Plus le maillage est fin, plus l'approximation est bonne et donc, plus le résultat de simulation sera proche de la réalité. Cependant, plus le nombre de nœuds augmente et plus le calcul sera long et encombrant en place mémoire, ce qui est une contrainte forte pour la simulation temps réel. La qualité du maillage, les paramètres intrinsèques comme le type de fonctions d'interpolation ou la mise à jour de la matrice de raideur, l'intégration de différentes lois de comportement avec des caractéristiques matériau souvent difficilement déterminables, l'utilisation des pré-calculs, etc. sont donc un compromis entre la précision de la solution et le temps de calcul.

2.3.3. Modèle basé sur une méthode de cinématique inverse

Cette méthode est utilisée en robotique et réside dans la détermination d'un lien entre un point terminal (par exemple, la position de la section extrême manipulée) et les valeurs angulaires d'un système mécanique, représenté sous la forme d'un ensemble d'éléments rigides joints par des articulations. Ainsi, le comportement d'un objet flexible est approximé par le comportement d'un système mécanique rigide articulé. Une telle approximation peut-être appliquée aux objets flexibles de type poutres ou tubes flexibles. Quelques exemples de modélisation de tubes ou de câbles virtuels flexibles par un ensemble d'éléments rigides pour le problème de leurs manipulation et installation virtuelles dans certaines simulations d'A/D virtuel peuvent être trouvés dans [Hergenrother & al. 2000], [Hergenrother & al. 2001].

Concernant la méthode de cinématique inverse, le lien entre la position d'un organe terminal \mathbf{x} (partie manipulée d'un tube virtuel flexible, par exemple) et les déplacements articulaires θ_i de chaque élément rigide i constituant l'objet virtuel, est exprimé de la façon suivante [Fuchs & al. 2001] :

$$\mathbf{x} = f(\theta_i). \quad (2.6)$$

Le système (2.6) est appelé en robotique modèle direct : l'orientation de chaque élément du système articulé est connue. Par contre, s'il s'agit d'une manipulation d'un objet virtuel à partir des CLs géométriques imposées, par exemple, la trajectoire d'assemblage \mathbf{x} d'une section extrême d'un tube flexible, le problème est appelé *modèle cinématique inverse* : il convient de déterminer les valeurs des déplacements articulaires $\boldsymbol{\theta}_i$ pour chaque élément rigide intermédiaire i :

$$\boldsymbol{\theta}_i = f^{-1}(\mathbf{x}). \quad (2.7)$$

Généralement, le modèle basé sur l'utilisation d'une méthode de cinématique inverse est adapté aux simulations virtuelles car, d'une part, la résolution numérique de ce problème est assez rapide et, d'autre part, il est possible de considérer potentiellement des grands déplacements du système mécanique. Cependant, cette approche souffre des problèmes suivants :

- l'impossibilité de fournir des efforts associés aux déplacements approximatifs d'un objet flexible ainsi que la difficulté de traiter le comportement réaliste d'un tel objet sans la notion de raideur,
- le problème de convergence de la résolution numérique. En effet, dans le cas général, le terme f n'est pas inversible, donc, la plupart des méthodes de résolution numérique sont basées sur une résolution itérative à partir de l'équation de la cinématique directe [Watt 2000], [Fuchs & al. 2001] :

$$\frac{d\mathbf{x}}{d\boldsymbol{\theta}_i} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}_i), \quad (2.8)$$

où $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}_i)$ est le Jacobien de f . Alors, l'algorithme de cinématique inverse consiste à résoudre l'équation (2.7) linéarisée de façon itérative à partir d'un petit déplacement $d\mathbf{x}$:

$$d\boldsymbol{\theta}_i = \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}_i)(d\mathbf{x}). \quad (2.9)$$

Toutefois, les problèmes numériques restent les mêmes : le Jacobien \mathbf{J} n'est pas toujours inversible. De manière générale, le problème d'absence ou de multiplicité de solutions existe. En effet, il peut ne pas y avoir de solution (dans les systèmes surcontraints [Fuchs & al. 2001]) ou bien, physiquement, une position géométrique donnée peut être atteinte de plusieurs façons, car il existe différentes combinaisons d'efforts pour atteindre une position donnée.

Afin d'améliorer la modélisation basée sur la représentation d'un objet virtuel flexible par un ensemble d'éléments rigides, les articulations peuvent être remplacées par des ressorts. Ainsi, on peut obtenir des modèles appelés masses-ressorts, présentés ci-dessous [Loock & al. 2001].

2.3.4. Modèle masses-ressorts

Une méthode très employée, issue de la MEF, est la simulation d'un objet déformable à partir d'un modèle masses-ressorts. Il existe également beaucoup d'interprétations et de versions modifiées de ce modèle en fonction de l'objectif de la simulation [Luciani 1985], [Chadwick & al. 1989], [Debunne 2000], [Fuchs & al. 2001]. Toutefois, le principe général du modèle masses-ressorts est présenté ici.

Cette méthode est une modification de la MEF pour l'étude des phénomènes vibratoires dans les structures continues approximées par un maillage, constitué des masses ponctuelles m_i , placées aux nœuds i du maillage et reliées par des liaisons de type ressorts avec/sans amortissement. Afin d'obtenir un gain en terme de temps de calcul, l'amortissement \mathbf{C} et souvent supprimé dans l'équation (2.5). Quant à la matrice de masse \mathbf{M} , elle devient diagonale, donc son inversion est triviale. Ainsi, le temps de résolution ne dépend plus que de l'évaluation de la matrice de raideur \mathbf{K} . La matrice \mathbf{K} devient dans ce cas creuse [Fuchs & al. 2001] : les efforts internes \mathbf{f}_i sont calculés comme les forces de rappel des ressorts soumis à des déplacements linéaires [Debunne 2000] :

$$\mathbf{f}_i = \sum_{j=1}^m k_{i,j} (l_{i,j} - l_{i,j}^{init}), \quad (2.10)$$

où m est le nombre de nœuds voisins du nœud i considéré, $k_{i,j}$ est la raideur du ressort entre les nœuds i et j , $l_{i,j}$ est la longueur du ressort.

Des applications du modèle masses-ressorts sont apparues dès le début des années quatre-vingt car elles sont assez rapides dans certains cas de simulation comme l'animation de marionnettes dans [Luciani 1985] ou de la peau de personnages [Chadwick & al. 1989]. A. Looock utilise le modèle masses-ressorts dans la simulation d'A/D virtuel de câbles flexibles avec la préservation de leurs longueurs (Figure 2.19) [Looock & al. 2001]. Cependant, la modélisation d'objets déformables par un système masses-ressorts, malgré sa rapidité par rapport à la MEF, souffre d'un certain nombre de contraintes parmi lesquelles :

- la difficulté de détermination d'une valeur cohérente de la raideur du système mécanique étudié,
- l'instabilité numérique au cours de la simulation qui dépend des paramètres du système masses-ressorts comme la raideur, la direction de la force entre les nœuds (le matériau travaille soit en traction soit en compression), etc.,
- la multiplicité de solutions à cause du problème de choix des longueurs initiales des ressorts $l_{i,j}^{init}$ dans le système (2.10) qui représentent les longueurs de référence,
- etc.

Par exemple, la raideur d'un réseau de masses-ressorts comporte de nombreux paramètres (longueurs des ressorts, nombre de nœuds voisins, hypothèses de petits ou grands déplacements des ressorts,...) et est difficile à déterminer afin de pouvoir modéliser correctement le comportement d'un objet déformable, notamment lorsqu'il s'agit de grands déplacements. Il est impossible de prédire leur comportement dès lors que l'on modifie notablement la topologie ou la géométrie du maillage comme dans une simulation adaptative de tissus proposée dans [Hutchinson & al. 1996]. Le problème d'identification des paramètres caractérisant le comportement du matériau est discuté dans [Deussen & al. 1995], [Louchet & al. 1995] en utilisant différentes méthodes de recalage. Mais les solutions ne cherchent à adapter ces paramètres que sur des mouvements élémentaires, sans garantir le comportement de tout autre déplacement, même en restant dans le domaine de petits déplacements. En conséquence, le problème de détermination des paramètres caractérisant le comportement du matériau influe fortement sur la stabilité numérique du modèle masses-ressorts [Looock & al. 2001]. Notamment, le modèle est très sensible aux raideurs importantes [Debunne 2000].

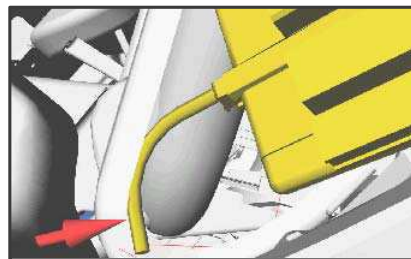


Figure 2.19. Manipulation d'un câble flexible pour l'A/D virtuel [Looock & al. 2001].

Comme extension du modèle masses-ressorts, un modèle de particules a été développé [Terzopoulos & al. 1989]. Ce modèle autorise les masses à interagir avec un ensemble de masses qui peut évoluer au cours de la simulation [Debunne 2000]. Les forces entre les particules sont souvent de nature d'attraction/répulsion, similaires aux forces de Lennard-Jones [Miller & al. 1989]. Une telle modélisation est plus intéressante que celle basée sur la méthode masses-ressorts classique : elle permet de tenir compte du problème de changement de signe des forces inter-particules.

2.3.5. Modèle basé sur une minimisation de l'énergie de déformation

Les méthodes basées sur une technique de minimisation de l'énergie de déformation d'un objet virtuel déformable considèrent la matière déformée comme un milieu continu. Ainsi, la discrétisation de l'objet n'est, dans la plupart des cas, réalisée que pour des raisons informatiques en fonction de la méthode numérique. Donc, il n'y a plus de construction de maillage de structure.

Le principe consiste à trouver une configuration d'équilibre d'un objet virtuel déformé possédant une certaine énergie de déformation. En effet, selon (2.1), le travail des efforts extérieurs appliqués à un objet déformable afin d'amener cet objet à une position souhaitée en le déformant, est égale à l'énergie fournie à l'objet lors de la déformation appelée *énergie de déformation*. Alors, afin de pouvoir trouver une configuration d'équilibre, il convient de trouver une configuration déformée qui correspond à un minimum de l'énergie potentielle. La déformation d'un objet dépend des :

- paramètres géométriques : dimensions de l'objet déformable,
- propriétés du matériau ou lois de comportement : linéaires élastiques, non-linéaires, anisotropiques, etc.,
- modes de déformation que l'objet subit lors de sa manipulation : flexion, torsion, traction/compression, l'influence du poids de l'objet, etc.

Par exemple, l'énergie potentielle de déformation U d'une poutre flexible peut être exprimée [Wakamatsu & al. 1995], [Wada & al. 2000] :

$$U = U_{flex} + U_{tors} + U_{gravit} + \dots, \quad (2.11)$$

où U_{flex} est l'énergie potentielle de flexion, U_{tors} l'énergie potentielle de torsion, U_{gravit} l'énergie potentielle due au poids de l'objet déformable.

Sous certaines hypothèses concernant la déformation d'une poutre flexible (ces aspects seront détaillés au chapitre 4), les expressions des énergies potentielles en flexion et en torsion, par exemple, sont [Wakamatsu & al. 1995] :

$$U_{flex} = \frac{1}{2} \int_0^L R_{flex} \chi^2 ds ; \quad U_{tors} = \frac{1}{2} \int_0^L R_{tors} \zeta^2 ds, \quad (2.12)$$

avec R_{flex} et R_{tors} les rigidités en flexion et en torsion de la poutre flexible, χ et ζ la courbure et la torsion de la ligne moyenne de la poutre, s l'abscisse curviligne.

L. Kavraki a utilisé la technique de minimisation de l'énergie de déformation dans la recherche probabiliste d'une trajectoire d'A/D d'objets flexibles de type poutres et surfaces planes. L'équation de l'énergie potentielle de déformation U peut être exprimée de la façon suivante [Kavraki & al. 1998], [Lamiriaux & al. 1999] :

$$U = \int_{V_0} \psi(x, u(x)) dx, \quad (2.13)$$

où V_0 est le domaine définissant la géométrie d'un objet déformable, par exemple, le volume dans le cas 3D, ψ est la densité d'énergie qui dépend d'une déformation locale $u(x)$ et d'un point $x \in V_0$.

En effet, l'énergie potentielle (ou sa densité) comporte certains paramètres géométriques de l'objet, mais aussi ceux caractérisant les propriétés du matériau, et peut être formulée pour différents objets 1D, 2D et 3D comme les poutres, les surfaces planes et gauches, les objets volumiques, etc. Ainsi, l'expression de cette énergie pour un objet donné peut devenir beaucoup plus simple que le cas général couvrant tous les types d'objets possibles. Ceci présente un certain avantage : l'utilisation de l'expression restreinte de l'énergie potentielle pour un tel ou tel objet déformable permet de simplifier la fonction à minimiser, ce qui peut diminuer fortement le temps de calcul. Certains auteurs utilisent les expressions générales de l'énergie pour un objet flexible donné, expressions qui prennent en compte toutes les sollicitations de l'objet : traction/compression, flexion, torsion. Certains auteurs ne considèrent que certaines déformations privilégiées lors d'une manipulation de l'objet flexible, en

supposant par exemple que les déformations dues à la compression, à la torsion ou au moment de flexion peuvent être négligées. Une telle simplification de l'expression de l'énergie potentielle pourrait réduire le temps de calcul. Cependant, la non-prise en compte de différentes sollicitations possibles lors de la manipulation d'une pièce flexible peut conduire à des approximations irréalistes de déformation de la pièce. Par ailleurs, la présente thèse montrera la nécessité de tenir compte différents types de charges possibles, car divers efforts (forces et moments de flexion, force de traction/compression,...) peuvent être appliqués à la pièce flexible lors de sa manipulation.

D'autres auteurs intègrent des expressions de l'énergie potentielle encore plus simplifiées, basées par exemple sur des modèles de type masses-ressorts avec un point x correspondant à une masse d'un volume constant de l'objet flexible ou des modèles géométriques de surfaces ou de courbes (Bézier, splines,...) dont les points de contrôle sont les points x définissant le domaine V_0 (Figure 2.20a,b) [Lamiriaux & al. 1999], [Anshelevich & al. 2000].

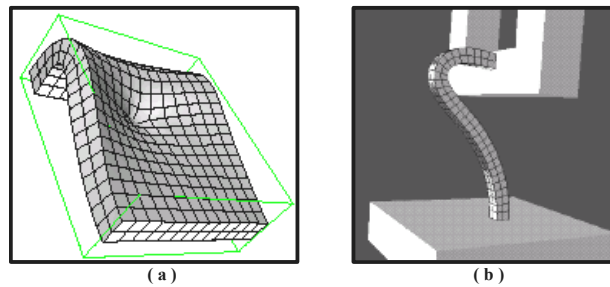


Figure 2.20. Exemples de déformation d'objets flexibles avec minimisation de l'énergie potentielle d'un objet modélisé par le système masses-ressorts [Anshelevich & al. 2000] :
(a) déformation d'une plaque flexible, (b) recherche de trajectoire d'A/D d'une poutre flexible.

Bien évidemment, la contrainte de temps pour une simulation temps réel est primordiale dans les manipulations virtuelles de pièces déformables. Cependant, il ne faut pas oublier que de telles simplifications présentées influencent non seulement le résultat de modélisation, mais aussi la stabilité numérique et la convergence de la méthode, ce qui est très important lorsqu'il s'agit d'utiliser des méthodes de minimisation. De même, il est possible de définir des termes dans l'expression de l'énergie potentielle qui décrivent la géométrie de l'objet déformable de différentes façons en fonction des objectifs de la modélisation. Par exemple, l'utilisation de termes linéaires sous-entend un modèle des petits déplacements produits par l'objet au cours de la simulation, tandis que des termes géométriquement non-linéaires supposent que l'objet peut travailler dans le domaine des grands déplacements.

Ainsi, la considération de mouvements simples (par exemple, uniquement flexion), l'approximation des termes géométriques intervenant dans l'équation de l'énergie potentielle (forme déformée, courbure,...), etc. sont donc un compromis entre la qualité de modélisation du comportement de l'objet déformable et le temps de calcul. Cependant, le temps de calcul de la déformation basée sur la méthode de minimisation de l'énergie potentielle de déformation est moins important que la modélisation EF. De plus, il est possible de considérer le comportement d'une pièce flexible soumise à des grands déplacements en intégrant des termes géométriquement non-linéaires dans l'expression de l'énergie de déformation. Néanmoins, il faut noter trois aspects pour souligner quelques inconvénients de cette méthode :

- l'imprévisibilité du comportement complexe de pièces flexibles soumises à des grands déplacements. En principe, il faut donc tenir compte de toutes les sollicitations possibles ayant un impact sur la déformation de la pièce, i.e. les efforts en flexion, en torsion, en traction/compression. Nous montrerons dans les chapitres suivants que de tels efforts existent et donc, influent sur la génération de résultats réalistes en termes de géométrie déformée de la pièce flexible et d'efforts à appliquer à la pièce. Par conséquent, l'expression de l'énergie potentielle pertinente semble être celle ayant la forme la plus générale. Donc, le temps de calcul devient plus important,
- les problèmes de minimisation. Notamment, il est possible de tomber dans des minima locaux, différents du minimum global de la fonction à minimiser, car généralement, une telle fonction

dispose de quelques minima. De plus, il est nécessaire de fournir une bonne solution initiale afin d'espérer que le minimum global soit trouvé au cours de la minimisation,

- la convergence rapide du modèle en fonction des paramètres choisis pour la simulation cohérente d'un comportement de la pièce déformable. En effet, le processus de minimisation doit être extrêmement rapide afin de pouvoir satisfaire la contrainte de temps réel de la manipulation virtuelle.

2.3.6. Modèle basé sur une approche « duale »

L'approche « duale » est basée sur la méthode des densités de forces [Schek 1974] appliquée à la déformation de surfaces gauches. La dualité du modèle consiste en la simulation d'une déformation de la surface, ayant un ensemble de propriétés mécaniques « fictives », à travers le calcul d'une séquence de positions d'équilibre d'un système mécanique représenté par un réseau de barres rigides couplé aux réseaux caractéristiques de surfaces B-Spline [Guillet 1999], [Guillet & al. 2000]. En effet, la modélisation de surfaces gauches en CAO est généralement effectuée à partir d'un réseau caractéristique [Léon 1991]. La modification de la position d'un point de contrôle d'un tel réseau entraîne une déformation de la surface associée au réseau. Afin de rendre cette déformation plus réaliste, S. Guillet a proposé de coupler ce réseau caractéristique avec un réseau de barres.

La technique de déformation se base donc sur la modification de la géométrie d'une surface initiale, qui est associée à son réseau caractéristique ou, dans le cas général de plusieurs carreaux restreints, connectés les uns aux autres par des contraintes paramétriques et soumis à des contraintes géométriques de continuité (Figure 2.21a) [Guillet 1999], [Guillet & al. 2000], [Léon & al. 2001], [Pernot & al. 2003]. Pour chacun de ces carreaux, un réseau de barres est généré à partir des points de contrôle du réseau caractéristique (Figure 2.21b,c) : la densité de force appliquée à chaque barre permettra de rendre désormais le changement de forme, qui était purement géométrique, plus réaliste.

Toute déformation commence par la spécification de CLs géométriques, comme des déplacements et/ou angles imposés, à travers une relation entre les sommets bloqués et les nœuds libres du réseau de barres rigides. Chacune des barres, associée au segment correspondant du réseau caractéristique, possède un paramètre caractéristique, plus précisément une densité de force q_i . Afin de maintenir l'équilibre statique du réseau de barres de longueurs l_i , des efforts extérieurs f_i doivent être appliqués aux extrémités des barres : $f_i = q_i l_i$ (Figure 2.21d). Ces efforts extérieurs, appliqués au réseau de barres initial, sont déterminés à partir des équations d'équilibre statique de chacun des nœuds à condition de satisfaire les contraintes et CLs géométriques (contraintes de continuité, déplacements imposés,...) (Figure 2.21e) [Guillet 1999], [Guillet & al. 2000]. Afin de représenter des modes de déformation particuliers, des fonctionnelles spécifiques remplacent la minimisation d'énergie potentielle. En utilisant le couplage géométrique, les nouvelles positions des nœuds (points de contrôle) du réseau caractéristique déformé sont obtenues directement à partir des nouvelles positions des nœuds du réseau de barres (Figure 2.21f), induisant ainsi la déformation de la surface (Figure 2.21g).

Malgré son principe de base de déformation de surface purement géométrique, l'association d'un modèle mécanique simplifié permet de considérer cette approche comme une des modifications du modèle masses-ressorts ou de la MEF, même si la base physique n'est pas tout à fait la même. Concernant les améliorations possibles du point de vue de l'utilisation de cette approche dans la simulation du comportement de pièces déformables, il serait intéressant d'introduire une notion de raideur du matériau réel, i.e. trouver une correspondance entre les propriétés du matériau et la densité de force q_i . Toutefois, en comparaison avec le modèle masses-ressorts, la modélisation de la déformation basée sur l'approche « duale » permet d'éviter le problème de solutions multiples, car la position d'équilibre du réseau de barres est obtenue à l'aide d'un système d'équations linéaires.

L'intérêt de l'utilisation de l'approche « duale » est le temps de génération de déformation qui est d'ordre 10 images/s pour un modèle non-optimisé, en garantissant une solution unique pour des CLs géométriques données [Léon & al. 2001]. De plus, la déformation de la surface peut approximer la déformation de la pièce flexible soumise à des grands déplacements en utilisant une fonctionnelle appropriée (Figure 2.22). Des points de contact lors des collisions avec des obstacles peuvent être considérés comme des CLs géométrique supplémentaires et donc, la simulation de la déformation d'un objet flexible due au contact avec les obstacles est également possible.

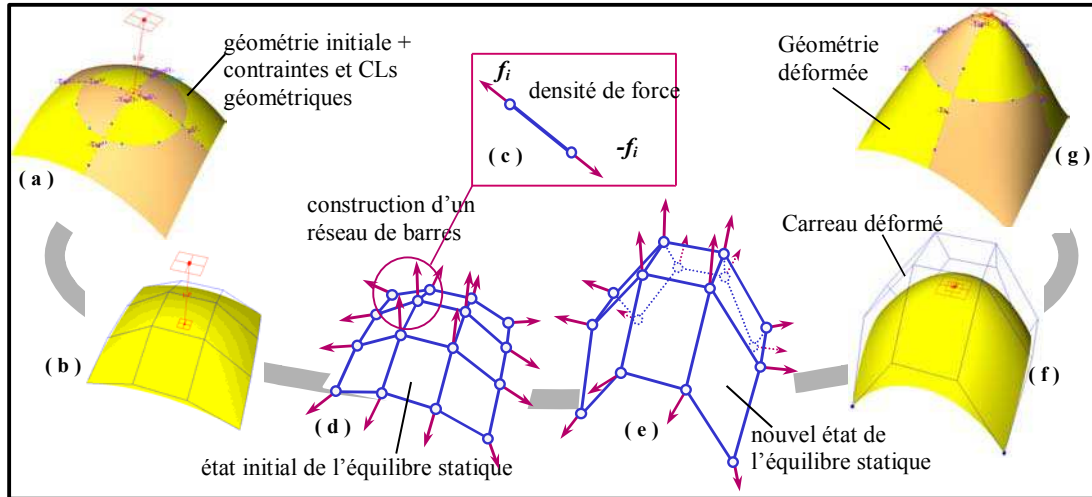


Figure 2.21. Principe de l'approche « duale » [Pernot & al. 2003].

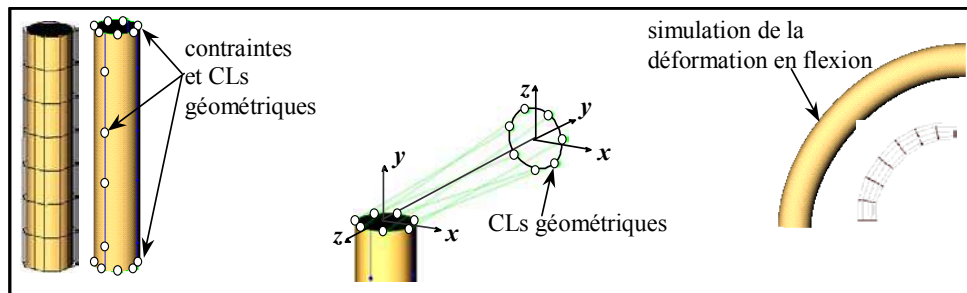


Figure 2.22. CLs géométriques utilisées pour la simulation de déformation en flexion d'un tube déformable en grands déplacements [Léon & al. 2001].

Néanmoins, plusieurs propriétés du modèle sont discutables. Par exemple, le modèle mécanique simplifié ne permet pas de simuler correctement le comportement physique d'un objet déformable sous toutes les sollicitations. Les efforts provoquant la déformation d'un objet flexible réel sont de nature différente : forces et moments de flexion, de traction/compression, de torsion. Cela signifie que des fonctionnelles appropriées pour une grande diversité de configurations devraient être proposées. Ainsi, le modèle présenté sous sa forme actuelle ne permet pas de modéliser correctement le comportement de pièces flexibles soumises à des sollicitations plus complexes.

En outre, les forces appliquées au réseau caractéristique sont fictives ; elles sont utilisées pour déterminer une nouvelle configuration d'équilibre statique. Par conséquent, le modèle n'est pas capable de produire des efforts requis au cours de la simulation d'une opération d'A/D d'une pièce flexible et donc, les forces associées au réseau de barres ne peuvent pas être exploitables dans l'analyse d'une opération d'A/D. De même, les CLs physiques, représentant les efforts développés par l'utilisateur, ne peuvent pas être appliqués au réseau caractéristique. Donc, la déformation ne peut être simulée que dans l'espace de configurations. Alors, le modèle a également besoin d'une relation entre les efforts appliqués réellement à la structure mécanique et les déplacements associés.

Le modèle de déformation basé sur l'approche « duale » ne peut donc être soumis qu'à des CLs géométriques (Figure 2.22) : déplacements et angles imposés, points de contact entre la pièce virtuelle et son environnement. La surface à déformer ne représente que la frontière de la pièce déformable et ne permet actuellement de modéliser la déformation d'objets d'épaisseur mince uniquement.

2.3.7. Analyse des modèles d'objets déformables

Cette partie a présenté les grandes classes de modèles de représentation d'objets virtuels déformables. Un certain nombre de caractéristiques de ces modèles, en ce qui concerne leur adéquation par rapport à nos besoins dans la simulation réaliste du comportement de pièces flexibles en assemblage virtuel, ont été discutées, à savoir :

- la génération de résultats physiquement réalistes lors de la manipulation d'une pièce virtuelle flexible soumise à des grands déplacements : les déplacements, la trajectoire d'A/D, les efforts représentatifs de cette manipulation,
- la simulation de déformations suffisamment rapide pour que l'affichage des images reste temps réel pour la manipulation virtuelle et l'analyse de l'opération d'A/D,
- les modèles d'objets déformables adaptés aux interfaces de contrôle de RV en position/effort.

Les modèles existants de simulation d'objets déformables peuvent être classés en deux catégories :

- les modèles *généraux* : la MEF avec ses versions modifiées comme le modèle masses-ressorts, le modèle de particules, les approches multirésolution, etc.,
- les modèles *adaptés* : le modèle basé sur la minimisation de l'énergie potentielle de déformation, la méthode de cinématique inverse, le modèle basé sur l'approche « duale », les modèles simplifiés à base de MEF de type masses-ressorts, etc.

Les méthodes générales, comme la MEF, sont capables de modéliser de façon cohérente le comportement complexe de pièces déformables soumis à des petits ou grands déplacements. Notamment, la MEF couramment utilisée dans le calcul de structures est basée sur une discrétisation de la structure (domaine) et nécessite une loi de comportement de matériau. En conséquence, cette méthode permet d'obtenir des résultats réalistes concernant les efforts requis et/ou la géométrie déformée de pièces flexibles et offre à l'utilisateur la possibilité de simuler le comportement de telles pièces dans deux espaces (efforts et configurations) introduits à la section 2.2. Donc, la modélisation d'objets déformables, basée sur la MEF, est bien adaptée aux interfaces de contrôle de RV en position/effort. Cependant, le temps de réponse de ce modèle ne permet pas son utilisation directe en RV qui suppose une simulation temps réel. Par ailleurs, la simulation de comportement réaliste de pièces flexibles soumises à des grands déplacements et modélisées par les EF s'avère encore plus lente en terme de temps de calcul. Par conséquent, l'application de la MEF sous sa forme générale n'est possible que pour des animations temps réel générées à partir de pré-calculs longs et utilisables pour une simulation donnée. Ainsi, si une nouvelle simulation avec de nouveaux paramètres (propriétés du matériau ou dimensions de la pièce flexible) est requise, de nouveaux pré-calculs sont nécessaires.

Les modèles adaptés, quant à eux, sont plus pertinents pour une simulation temps réel. Ces modèles ont été développés dans le but de répondre à une contrainte de simulation rapide du comportement de pièces virtuelles déformables. Ainsi, les méthodes comme la minimisation de l'énergie potentielle de déformation, la déformation de surfaces avec des modèles mécaniques simplifiés intégrés, les méthodes simplifiées issues de la MEF comme les modèles de type masses-ressorts ou particules, etc. sont couramment utilisées dans la simulation de déformation d'objets flexibles en RV. Toutefois, la simplification d'un modèle mécanique a des conséquences concernant la modélisation adéquate d'un comportement physique d'objets déformables. Les simulations basées sur tels modèles souffrent de différents problèmes, liés directement ou indirectement à la simplification excessive des modèles de comportement dans le but d'avoir des gains en terme de temps de réponse, à savoir :

- la difficulté de détermination des paramètres caractérisant les propriétés du matériau : la raideur, le type de loi de comportement (élastique linéaire, élasto-plastique, ...), etc.,
- l'inadéquation au comportement réel des pièces flexibles soumises à des grands déplacements et donc, la difficulté de choix des hypothèses relatives au type de sollicitation de la pièce : déformations uniquement en flexion, en traction/compression, en torsion ou des combinaisons de ces sollicitations,

- les problèmes de stabilité numérique liés aux problèmes de convergence, de minima locaux, du choix des paramètres du modèle, etc.,
- l'impossibilité de fournir des efforts réalistes associés aux déplacements produits par certains modèles de pièces déformables (modèles basés sur l'approche « duale » ou sur la méthode de cinématique inverse, modèles masses-ressorts,...),
- etc.

Ces problèmes peuvent conduire à des résultats de simulation de comportements physiquement irréels avec la génération de déplacements, de déformées, de trajectoires d'A/D et/ou efforts associés à ces déplacements partiellement réalistes ou pas réalistes du tout. Rappelons que cet objectif de simulation adéquate du comportement de pièces déformables joue un rôle important dans l'étude, l'analyse, l'optimisation des opérations d'A/D et de maintenance virtuelles. Les déplacements et les efforts fournis par le modèle sont directement liés à la vérification d'interférences, au contrôle en efforts d'un point de vue ergonomique, à l'estimation de l'état de contraintes dans la pièce virtuelle au cours de sa manipulation, etc. Ainsi, l'application des modèles simplifiés de comportement mécanique de pièces flexibles dans l'étude précise des opérations d'A/D, malgré leur rapidité en termes de temps de réponse, semble encore discutable et limitée.

Néanmoins, il semble intéressant d'utiliser les modèles adaptés, centrés sur des sollicitations particulières ou valables pour une catégorie donnée de pièces déformables, dans un environnement de simulation d'opérations d'A/D virtuelles. Certaines pièces peuvent être correctement représentées par des modèles mécaniques de type poutre, coque ou d'autres modèles. Notamment, la méthode de minimisation d'énergie potentielle permet d'obtenir des expressions relativement simples de la déformation de pièces flexibles de type poutres ou plaques déformables [Anshelevich & al. 2000]. L'utilisation de modèles adaptés pour la simulation des opérations d'A/D et de maintenance virtuelles de pièces flexibles sera discutée au chapitre 3. Par ailleurs, un exemple de modèle mécanique de comportement de pièces de type poutres flexibles soumises à des grands déplacements, qui est un modèle adapté, ainsi que différents aspects de son traitement numérique et de son application à des opérations d'A/D virtuelles seront présentés par la suite. Néanmoins, notons d'ores et déjà que l'élaboration de modèles mécaniques adaptés de comportement complexe de pièces flexibles et leur intégration dans un environnement de simulation de RV présente des intérêts forts vis-à-vis des contraintes de simulation des opérations d'A/D virtuelles :

- les modèles adaptés sont moins complexes que ceux généraux (la MEF, par exemple) ; par conséquent, le temps de simulation peut être considérablement diminué,
- la simulation quantitative du comportement de pièces flexibles est différente de celle de pièces déformables en général, car les pièces flexibles sont souvent soumises à des grands déplacements ainsi qu'à l'application de CLs non-linéaires (efforts qui suivent la trajectoire d'A/D et changent de direction à chaque instant de la manipulation,...) lors des opérations d'A/D et de maintenance,
- l'utilisation de modèles adéquats et adaptés pour la simulation de déformation de pièces flexibles dans les espaces des efforts et des configurations, équivalente au contrôle en position et en effort. Ainsi, ces modèles de comportement sont aussi adaptés aux interfaces actuelles de RV.

En conclusion, il est important de souligner que parmi les modèles de pièces déformables couramment utilisés dans le domaine de la RV et notamment, les modèles simulant le comportement de pièces flexibles soumises à des grands déplacements, très peu d'approches répondent en partie aux contraintes de simulation des opérations d'A/D virtuelles.

2.4. Conclusions

Les activités de l'entreprise liées aux métiers de l'usinage, de la production, de la maintenance, de l'ergonomie, etc. font désormais appel à de nouvelles méthodes de développement de produits dès les premières phases de conception. Parmi ces nouvelles technologies, pénétrant d'ores et déjà le processus de développement de produits dans certaines grandes sociétés comme le CEA, PSA, Renault, BMW, EADS, Dassault Aviation et bien d'autres, les simulations basées sur l'utilisation de la RV deviennent de plus en plus courantes. Notamment, l'étude, l'analyse, l'optimisation des activités liées à l'assemblage, la maintenance, l'ergonomie peuvent être efficacement réalisées en se basant sur des simulations virtuelles de ces tâches. Comme nous l'avons déjà constaté, de telles simulations permettent de diminuer considérablement le coût et le temps de développement du produit tout en améliorant sa qualité. Cependant, la réalisation de simulations virtuelles, comme l'assemblage ou la maintenance, n'est pas une tâche facile car elle requiert des connaissances de différents métiers : conception et modélisation mécaniques, modélisation géométrique et échanges de données en CAO, production, informatique, interfaces permettant d'effectuer les manipulations virtuelles, etc. Ainsi, ce chapitre a présenté certains concepts de base de la RV, la nécessité d'être compétent dans l'interfaçage avec des périphériques, dans la modélisation de phénomènes physiques, de tenir compte des problèmes de choix des dispositifs de RV dépendant des objectifs et des besoins des utilisateurs à court ou à long terme et nécessitant parfois des investissements financiers lourds.

Dans le cas de la simulation d'opérations d'A/D et de maintenance virtuelles, deux types de contrôle ont été identifiés : le contrôle en effort et celui en position, requis pour l'organisation de la simulation et des interfaces correspondantes. Dans tous les cas, l'utilisateur a besoin d'interfaces afin de pouvoir communiquer avec le système de RV et percevoir les résultats de cette simulation. Selon le type de contrôle de simulation choisi, l'utilisateur :

- spécifie une information d'entrée en termes d'efforts appliqués à un objet virtuel ou de positions géométriques à atteindre à l'aide d'une interface motrice ou sensori-motrice donnée : haptique, localisation spatiale, commande manuelle, etc.,
- perçoit une information de sortie, i.e. des résultats de calcul, au cours d'une simulation temps réel : trajectoire d'A/D calculée, déformation d'un objet à caractère flexible, efforts dus aux collisions entre l'objet manipulé et son environnement extérieur, poids, rigidité ou déformation de cet objet, etc. à l'aide d'interfaces sensorielles et sensori-motrices (haptique, visualisation ordinaire ou immersive, signaux sonores,...).

Ces interfaces sont ainsi classées selon les données d'entrée/sortie en fonction du contrôle désiré. Par conséquent, deux espaces – espaces des configurations et des efforts – sont introduits afin de :

- distinguer la nature des données d'entrée/sortie en termes d'efforts et de géométrie,
- dissocier les deux types de contrôle présentés,
- simplifier la simulation de comportement physique des objets à manipuler.

En effet, toute simulation virtuelle et notamment, la manipulation d'objets déformables pour l'A/D virtuel, suppose la spécification de données d'entrée de différentes natures qui sont exprimées par des CLs géométriques (positions et orientations) ou mécaniques (efforts) pour la modélisation de comportement de pièces flexibles. La simulation dans différents espaces facilite la bonne compréhension d'un phénomène physique comme la déformation de pièces flexibles avec l'estimation de données de sortie de différentes natures : la trajectoire d'A/D et les efforts correspondant à cette trajectoire. Par ailleurs, nous avons montré l'intérêt de développer des interfaces motrices de RV permettant de mesurer et transmettre au système de RV les efforts produits par l'utilisateur au cours de manipulations d'un objet virtuel. En particulier, de telles interfaces permettraient de représenter plus correctement du point de vue mécanique le processus de manipulation d'un objet virtuel, rigide ou flexible, car :

- c'est un être humain qui développe physiquement des efforts à partir de son travail musculaire et les applique à l'objet à déplacer,

- l'application d'efforts ou la définition de CLs en terme d'efforts pour une simulation de comportement de pièces déformables permettent d'éviter un problème de multiplicité de solutions.

Donc, ce chapitre montre les liens entre l'homme et le système de RV à l'aide d'interfaces de manipulation pour la simulation de comportement mécanique d'objets virtuels flexibles. Notamment, ces liens comprennent :

- la définition de CLs géométriques ou en efforts pour la modélisation d'un comportement mécanique de pièces flexibles. Par ailleurs, il faut souligner que la détermination des CLs requises pour la modélisation s'effectue à partir des données d'entrée et elle n'est pas directe, i.e. les données d'entrée mesurées ne sont pas forcément les CLs à appliquer. En effet, il s'agit plutôt d'une modélisation des CLs, par exemple, l'application des efforts suivant la trajectoire d'A/D,
- l'utilisation de modèles mécaniques permettant de générer une information réaliste concernant la déformation et les efforts requis durant la manipulation de pièces virtuelles flexibles,
- le développement de modèles mécaniques rapides de comportement de pièces flexibles compte tenu de la contrainte principale, i.e. la génération d'une réponse en temps réel.

Ainsi, lorsqu'il s'agit de la simulation d'opérations d'A/D ou de maintenance virtuelles de systèmes mécaniques contenant les pièces flexibles, il est important de considérer le comportement mécanique de telles pièces lors de leurs manipulations. Donc, la simulation du comportement de pièces déformables, qui sont souvent soumises à des grands déplacements caractérisés par des modifications importantes de la forme déformée lors des opérations d'A/D, suppose l'intégration de modèles rapides de comportement mécanique de ces pièces. Ce chapitre a également présenté plusieurs modèles de pièces déformables, utilisés couramment dans le domaine de la RV. Ces modèles sont divisés en deux catégories :

- modèles généraux, comme la MEF, dont la formulation est applicable à la plupart des pièces déformables : loi de conservation de l'énergie, lois de l'élasticité,
- modèles dont la formulation est adaptée à un type de pièce donné (poutres, plaques,...) : modèles de type poutres, masses-ressorts, modèles basés sur la minimisation de l'énergie potentielle de déformation, etc.

L'intérêt de l'utilisation des modèles adaptés par rapport à la MEF est leur capacité à produire une réponse mécanique temps réel du processus de déformation de pièces déformables. Cependant, la simplification excessive du modèle mécanique peut conduire à une simulation complètement irréaliste en termes d'efforts, de géométrie déformée et, par conséquent, à la génération de trajectoires d'A/D irréalistes. Ceci est un point important, car l'analyse des opérations d'A/D de pièces flexibles entraînant des modifications locales d'un produit doit s'appuyer sur des résultats réalistes, issus d'une simulation quantitative du comportement complexe de pièces flexibles. Malheureusement, certains modèles adaptés ne permettent pas de satisfaire cette contrainte, certains modèles souffrent d'instabilités numériques, certaines approches ne sont pas capables de produire les informations requises (efforts à appliquer, par exemple).

Néanmoins, le principal inconvénient des modèles adaptés de pièces déformables, utilisés actuellement dans le domaine de l'A/D virtuel, est leur difficulté de simuler de façon cohérente le comportement de pièces flexibles soumises à des grands déplacements. En effet, comme dans le cas du problème de choix des interfaces de RV, le choix des modèles de comportement de pièces flexibles est un compromis entre différentes contraintes, parfois contradictoires et difficile à satisfaire, de simulation des opérations d'A/D virtuelles, à savoir la simulation temps réel, la modélisation réaliste du phénomène physique complexe, l'adaptation des modèles aux interfaces de contrôle en effort/position. Dans tous les cas, les résultats de simulation du comportement de pièces flexibles doivent être cohérents par rapport à la réalité pour qu'ils soient utilisables dans l'étude et l'analyse des opérations d'A/D, de maintenance, etc.

Chapitre 3

Méthodologie de simulation des opérations d'A/D de pièces déformables dans un environnement de RV

Table des matières

3.1. Introduction	100
3.2. Méthodologie de simulation d'A/D virtuel de pièces déformables	101
3.3. Principes de simulation de pièces déformables pour l'A/D virtuel	110
3.3.1. Classification des modèles de composants pour l'A/D virtuel	111
3.3.2. Architecture et fonctionnement d'un module de simulation de pièces déformables	113
3.3.2.1. <i>Modèle Temps Réel</i>	114
3.3.2.2. <i>Modèle Mécanique Interactif</i>	114
3.3.2.3. <i>Interactions entre le MTR et le MMI</i>	115
3.3.2.4. <i>Aspects relatifs au choix d'un modèle mécanique</i>	118
3.3.3. Paramètres d'entrée pour la simulation de pièces déformables	119
3.4. Détermination des caractéristiques du matériau pour la simulation du comportement de pièces flexibles	120
3.4.1. Caractérisation du comportement de pièces déformables	120
3.4.1.1. <i>Lois de comportement</i>	120
3.4.1.2. <i>Loi de Hooke</i>	121
3.4.1.3. <i>Application de la loi de Hooke</i>	122
3.4.1.4. <i>Matériaux ne suivant pas la loi de Hooke</i>	123
3.4.2. Aspects expérimentaux de détermination des caractéristiques d'un matériau sollicité en flexion	124
3.4.2.1. <i>Hypothèses et application</i>	125
3.4.2.2. <i>Partie expérimentale</i>	126
3.4.2.3. <i>Partie de dépouillement des résultats expérimentaux</i>	126
3.4.3. Aspects d'intégration des lois de comportement	129
3.5. Problèmes d'intégration de modèles CAO dans un environnement de RV	130
3.5.1. Structuration de données CAO pour la simulation virtuelle	131
3.5.2. Préparation de données pour la modélisation de l'environnement extérieur	133
3.6. Conclusions	134

3.1. Introduction

Parmi de nombreux avantages de la simulation d'opérations d'A/D et de maintenance dans un environnement de RV, les principaux sont la manipulation directe de pièces virtuelles rigides ou déformables, la simulation de certains phénomènes associés et leur visualisation en temps réel, l'utilisation de la vision globale de l'homme et la possibilité d'un contrôle, d'une analyse et d'une optimisation de ses propres actions au cours de la manipulation virtuelle ou bien d'un processus d'A/D ou encore des solutions constructives d'un produit. A part ces fonctionnalités intéressantes de l'assemblage virtuel, la RV propose également à l'utilisateur différents types de manipulations d'objets virtuels selon un contrôle en admittance/impédance, la possibilité de percevoir des informations de simulation en termes d'efforts ainsi que l'immersion dans le monde virtuel grâce aux interfaces comportementales de RV. Les fonctions supplémentaires comme les tests de collisions, l'identification de directions privilégiées dans la zone proche d'un endroit de montage effectif, la simulation d'un comportement complexe de pièces flexibles, etc. complètent l'énumération précédente. Les simulations d'opérations d'A/D et de maintenance virtuelles ne constituent que des développements scientifiques ponctuels depuis l'apparition des premiers systèmes de simulation d'assemblage virtuel il y a une dizaine d'années. Afin de profiter pleinement des fonctionnalités de la RV mais aussi de tenir compte des spécificités de pièces déformables, la simulation d'opérations d'A/D et de maintenance virtuelles de telles pièces nécessite l'élaboration d'une méthodologie particulière.

Bien évidemment, chaque simulation virtuelle dépend d'une architecture particulière de tel ou tel système de simulation et des fonctionnalités du système de RV, des interfaces comportementales choisies, des objectifs de la simulation virtuelle, des moyens financiers mis en œuvre, etc. Cependant, la méthodologie générale de simulation des opérations d'A/D virtuelles comprend souvent des aspects de :

- définition du contexte et des objectifs de simulation, par exemple, l'étude d'accessibilité à d'une pièce rigide à changer, l'étude d'un comportement réaliste d'une pièce flexible lors d'un processus d'A/D, l'optimisation d'une trajectoire d'A/D en utilisant des dispositifs haptiques à retour d'effort, la revue de projet, etc. Cette étape est très importante, car elle permet d'élaborer une stratégie de simulation nécessitant la mise en place d'une architecture particulière de système de simulation de RV ainsi que le choix des interfaces comportementales spécifiques, la définition des métaphores d'interaction correspondantes, etc.,
- modélisation d'un monde virtuel en utilisant des fonctions de création d'objets virtuels intégrées dans un environnement de RV donné ou en effectuant des transferts de données à partir de modèles CAO créés dans un modèleur géométrique extérieur,
- choix des interfaces entre l'homme et le système de simulation de RV permettant de mesurer, de traduire et transmettre une information d'entrée/sortie en fonction des objectifs de simulation,
- choix d'une architecture du système de simulation d'A/D virtuel comprenant différents modules interconnectés permettant le traitement de données d'entrée/sortie, le contrôle des périphériques de RV utilisés, les tests de collisions, la simulation de phénomènes physiques, etc.,
- définition des données d'entrée/sortie pour la simulation d'une opération d'A/D virtuelle et des paramètres nécessaires à une modélisation de phénomène physique requis durant cette simulation,
- etc.

La modélisation d'un phénomène physique, tel que la simulation de la déformation d'une pièce à caractère déformable, nécessite la définition de paramètres particuliers comme les dimensions de la pièce et les propriétés du matériau, la modélisation des CLs, la spécification des conditions de fonctionnement de la pièce déformable (petits ou grands déplacements, par exemple) ainsi que des hypothèses et des contraintes de simulation. En conséquence, la simulation des opérations d'A/D et de maintenance virtuelles de pièces déformables suppose la mise en place d'une méthodologie et d'une

architecture particulières afin de prendre en compte des spécificités de la modélisation d'un comportement complexe de pièces flexibles et de produire une simulation rapide et réaliste.

Ainsi, ce chapitre s'intéresse aux spécificités de simulation des opérations d'A/D virtuelles de systèmes mécaniques comportant les pièces déformables de différente nature, à l'identification des paramètres principaux d'une modélisation réaliste du comportement de pièces déformables et aux problèmes liés à la détermination de ces paramètres ainsi qu'aux problèmes d'intégration de différents modèles dans la simulation d'opérations d'A/D virtuelles dans le contexte du processus de conception. Ce chapitre commence par la description d'une méthodologie générale de simulation des opérations d'A/D et de maintenance virtuelles proposée dans les travaux de cette thèse. En particulier, une nouvelle architecture de deux niveaux de simulation et intégrant de différents modèles de pièces flexibles est présentée. Nous nous intéressons également dans le présent chapitre aux problèmes d'intégration des modèles CAO dans un environnement de RV en les considérant sous deux angles différents : d'une part, la distinction de deux types de modèles CAO, caractérisant l'environnement extérieur statique de la pièce déformable à manipuler et la pièce elle-même et, d'autre part, la nécessité de modifier ces modèles au cours de la simulation d'opérations d'A/D virtuelles et donc, la progression dans l'architecture d'un produit. Nous présentons aussi une classification de différents modèles de composants déformables du point de vue de la simulation de leur comportement. Ces modèles sont intégrables dans le système de simulation de RV et utilisables de façon complémentaire en fonction des objectifs et des résultats de la simulation. Notamment, l'interaction et/ou le recalage de différents modèles est envisageable à différents niveaux de la simulation suivant l'architecture proposée ainsi qu'en fonction des conditions de manipulation (petits ou grands déplacements, par exemple) ou encore de différentes zones de manipulation dans l'espace de travail de la pièce (espace des configurations) comme les zones d'approche d'une cible ou de montage effectif. Un certain nombre d'étapes de la méthodologie proposée concernant la détermination des paramètres spécifiques et caractérisant la modélisation réaliste du comportement de pièces déformables soumises notamment à des grands déplacements, sera également discuté.

3.2. Méthodologie de simulation d'A/D virtuel de pièces déformables

Nous proposons dans cette partie une méthodologie générale de simulation des opérations d'A/D et de maintenance d'un produit mécanique contenant les pièces déformables à l'aide d'un environnement de RV. Nous allons présenter cette méthodologie de façon globale, en mettant en évidence des relations entre des différents éléments intervenant dans une démarche de simulation d'opérations d'A/D de pièces déformables. Les éléments les plus importants de cette démarche seront détaillés par la suite. Par conséquent, nous montrerons les liens entre la simulation d'A/D virtuel et la démarche de conception d'un produit mécanique.

Selon la méthodologie de simulation d'opérations d'A/D virtuelles de pièces déformables, les principaux éléments caractérisant une telle simulation sont (Figure 3.1) :

1. La définition d'un contexte et des objectifs de simulation.
2. La détermination des données d'entrée pour la simulation d'A/D virtuel.
3. L'interprétation de certaines données d'entrée à l'aide des métaphores d'interaction.
4. La simulation d'une action donnée dans un environnement de RV incluant la simulation d'un comportement physique de la pièce déformable.
5. La préparation d'un résultat de simulation pour la perception à l'aide des métaphores d'interaction.
6. La perception des données de sortie de simulation.
7. Le contrôle, l'analyse, la prise de décision.

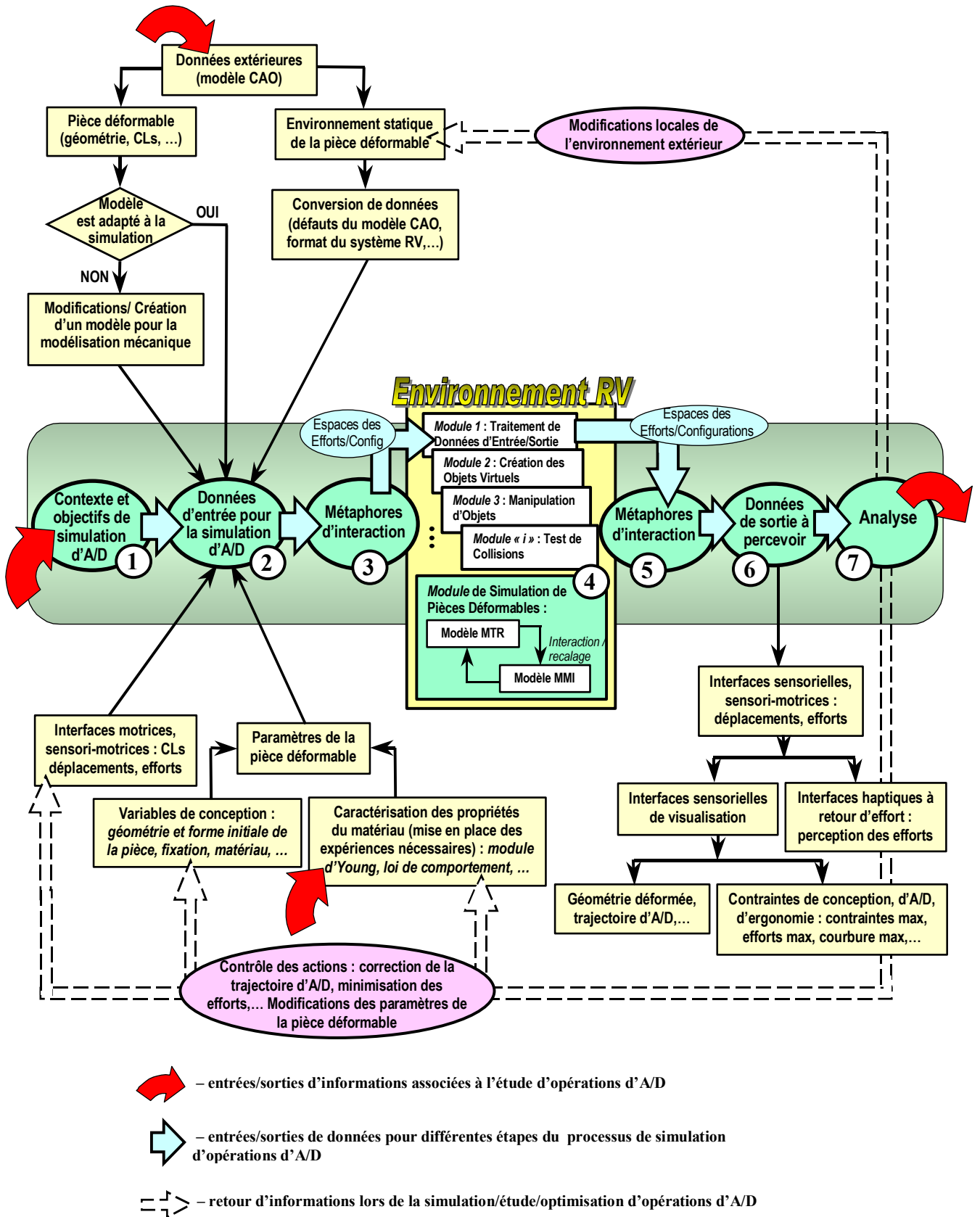


Figure 3.1. Méthodologie de simulation des opérations d'A/D à l'aide d'un environnement de RV.

Définition d'un contexte et des objectifs de simulation :

La définition d'un contexte et des objectifs de simulation des opérations d'A/D, de maintenance, etc. basée sur l'utilisation d'un environnement de RV est une étape très importante permettant notamment de :

- élaborer une stratégie de simulation des opérations d'A/D en précisant les données d'entrée/sortie nécessaires en fonction des besoins de l'utilisateur. Par exemple, dans un contexte d'étude d'accessibilité ou d'optimisation des actions d'un opérateur pour la maintenance d'une pièce flexible d'un mécanisme existant, le transfert du modèle CAO complet et très détaillé de ce produit n'est pas nécessaire : il suffit de transférer les données ne représentant que l'environnement extérieur pour la pièce virtuelle flexible à manipuler et d'étudier les trajectoires d'A/D pour cette pièce en vue d'éviter des collisions, de minimiser le temps d'A/D pour le changement d'une pièce, d'optimiser des actions de l'opérateur afin de minimiser les efforts à développer durant l'opération. Dans ce cas, il ne s'agit pas de la re-conception d'un produit déjà développé et/ou industrialisé et aucune modification concernant l'architecture du produit ou les paramètres caractérisant la forme ou les propriétés du matériau de la pièce en question n'est envisagée. Par contre, dans le contexte d'étude de l'assemblabilité et du comportement d'une pièce flexible lors d'une opération d'A/D au cours du développement d'un produit, le transfert d'un environnement extérieur plus détaillé peut être requis, notamment, en ce qui concerne des endroits de mise en place de la pièce flexible à manipuler et des types de fixation/connexion de cette pièce avec son environnement. De plus, le contrôle des variables de conception comme la géométrie, les contraintes dans la pièce manipulée, etc. est nécessaire dans ce type d'étude. En outre, les modifications de la géométrie de la pièce et/ou de son environnement sont également possibles en fonction des résultats de la simulation. Un autre exemple est une étude d'un processus d'assemblage d'un produit mécanique en vue d'optimiser les séquences d'assemblage. Dans ce cas, l'état d'assemblage du produit évolue à chaque ajout de nouvelle pièce rigide ou flexible. Donc, il ne s'agit plus d'un transfert unique de modèle CAO complet du produit mais d'un transfert de groupes de pièces représentés par un modèle géométrique ou bien par plusieurs modèles indépendants sur un stade donné du processus de montage. Alors, au cours de la progression du processus d'assemblage, la forme géométrique du produit évolue au fur et à mesure en fonction de la séquence choisie,
- choisir une architecture de système de simulation en se basant, par exemple, sur un environnement de simulation de RV déjà existant sur le marché, supportant le processus d'étude/optimisation selon la stratégie de simulation définie et comprenant le minimum de fonctions permettant de réaliser cette étude. Par ailleurs, l'intégration d'un système de simulation doit être compatible avec la planification de tâches d'A/D et simple à mettre en place. Par exemple, le système de simulation de RV doit supporter les transferts de données représentant les pièces à assembler et leur environnement extérieur. La structure modulaire de l'architecture du système de simulation est préférable. Elle permettrait notamment d'intégrer facilement des modules manquants, en complétant un système de RV donné, par exemple, par un module de simulation d'un tel ou tel phénomène physique sans la re-installation d'un nouveau système de simulation de RV, d'où une économie non-négligeable,
- déterminer les interfaces comportementales (motrices, sensorielles, sensori-motrices) permettant de mesurer/percevoir une information d'entrée/sortie. Le choix des interfaces comportementales est une étape très délicate car ces interfaces sont souvent très coûteuses, comme les dispositifs à retour d'effort ou les salles d'immersion. L'utilisation des métaphores d'interaction est également importante : elles offrent à l'utilisateur la possibilité de contourner certaines complexités des interfaces comportementales comme la substitution d'un effort par un déplacement ou bien la limitation d'une bande passante d'une interface motrice de capture de mouvements en fonction du temps de réponse de système de simulation de RV. Malgré la possibilité de contourner les difficultés technologiques de certains dispositifs de RV, l'utilisation des métaphores d'interaction est également très délicate : les métaphores mal déterminées peuvent éloigner l'utilisateur encore plus de l'interprétation souhaitée ou de la sensation recherchée,

- etc.

Détermination des données d'entrée pour la simulation d'A/D virtuel :

Le type de données d'entrée pour la simulation d'A/D virtuel est défini en fonction de l'objectif à atteindre. De façon générale, les données d'entrée peuvent être divisées en deux catégories (Figure 3.1) :

- données CAO liées à la modélisation géométrique d'un produit (maquette numérique) :
 - données représentant l'environnement extérieur pour la pièce déformable à manipuler,
 - données représentant la géométrie de la pièce déformable ainsi que la géométrie des fixations/connexions entre cette pièce et son environnement qui servent à la définition des CLs géométriques,
- données « comportementales » associées aux pièces virtuelles déformables à manipuler :
 - données représentant l'ensemble des paramètres de la pièce déformable : paramètres caractérisant les propriétés du matériau de la pièce ainsi que des variables de conception à contrôler ou à faire varier durant la simulation,
 - données produites par l'utilisateur et mesurées par les interfaces motrices ou sensori-motrices de RV pendant la simulation.

Les données CAO sont toutes les informations provenant de la maquette numérique du produit à étudier. Dans la pratique industrielle actuelle, ce modèle est créé « à l'extérieur » d'un environnement de RV, dans un modéleur géométrique utilisé par les bureaux d'études de l'entreprise (Pro-Engineer, Catia, IDEAS, etc.) et nécessite un traitement particulier (préparation de données pour la modélisation de l'environnement extérieur, par exemple) afin d'être utilisé dans un environnement de RV. Ces données sont donc divisées en deux catégories : données représentant l'environnement extérieur de la pièce déformable et la pièce déformable elle-même. L'environnement extérieur est caractérisé par son état qui est souvent de nature statique, i.e. la forme de l'environnement extérieur reste inchangé durant la simulation d'une opération d'A/D virtuelle donnée. En effet, lors des études de comportement de pièces flexibles, leur environnement est « figé » car il est créé à partir d'une transformation du modèle CAO du produit. Certains aspects de représentation géométrique d'un monde virtuel à partir des modèles CAO sont discutés au chapitre 2. Nous aborderons par la suite quelques problèmes de transformation des modèles CAO de départ pour leur intégration dans un environnement de RV. Néanmoins, notons qu'une telle conversion de données transforme souvent le modèle CAO (sans la pièce flexible en question, bien évidemment) en un monde virtuel qui reste inchangé durant la simulation d'une opération d'A/D virtuelle donnée jusqu'à ce que le changement de l'environnement extérieur et donc, une nouvelle transformation de ce modèle pour la simulation d'une nouvelle opération d'A/D soient requis. On peut cependant remarquer que dans la plupart des cas, l'environnement de RV est muni des fonctions permettant de créer son propre monde virtuel, indépendamment d'un modéleur géométrique externe. Toutefois, dans le but d'augmenter le niveau de l'automatisation du processus de développement du produit, un tel modéleur est souvent utilisé bien avant des études fines des opérations d'A/D et de maintenance virtuelles. Les modéleurs de mondes virtuels intégrés aux environnements de RV ne s'intègrent pas au cycle de développement du produit, car la phase de définition architecturale du produit ainsi que l'étape de calcul de structures mécaniques, basées sur l'utilisation des outils de CAO, nécessitent la création d'un modèle CAO du produit qui est souvent à la base d'autres études du produit, comme la simulation des opérations d'A/D, de maintenance, d'usinage, etc.

La deuxième catégorie de données CAO représente l'ensemble d'informations concernant la géométrie de la pièce déformable à manipuler ainsi que les types de connexions utilisées pour le montage de cette pièce (Figure 3.1). La représentation géométrique de la pièce déformable contient une information importante sur :

- la modélisation du comportement de la pièce déformable. En effet, un modèle mécanique à employer durant la simulation du comportement de la pièce déformable est défini à partir du modèle CAO de cette pièce : la poutre, la plaque, la coque, etc.,

- les paramètres géométriques d'entrée associés au modèle mécanique choisi. Effectivement, une fois le modèle mécanique de comportement défini, les données géométriques nécessaires peuvent être extraites du modèle de CAO. Par exemple, pour la simulation du comportement de pièces flexibles modélisées par des « poutres flexibles », les paramètres comme la longueur et la section de la poutre sont requis,
- etc.

La connexion entre la pièce déformable et son environnement donne accès à une information concernant le choix du type de fixation ou de CLs géométriques à formuler pour la modélisation du comportement mécanique de la pièce : encastrement, certains déplacements angulaires autorisés, etc.

Un autre aspect important concerne l'exploitation directe du modèle CAO de la pièce déformable. En effet, ce modèle peut être généré en utilisant différents modes de création d'objets 2D ou 3D suivant les fonctionnalités des modeleurs géométriques. Ceci peut rendre incompatible le modèle CAO de la pièce pour son utilisation directe dans le système de RV. Par exemple, un tube flexible fortement coudé peut être modélisé comme un ensemble de cylindres dont les extrémités sont « mal connectées ». En conséquence, ce modèle n'est pas directement utilisable pour la simulation du comportement physique de ce tube flexible dans un environnement de RV. Par contre, il est possible d'extraire une information sur la forme de l'axe de ce tube ainsi que sa longueur et sa section, ce qui représente une information suffisante pour la création d'un modèle particulier de la pièce flexible, adapté tant à son exportation ultérieure dans le système de RV qu'à la modélisation mécanique. Un autre exemple est la création des modèles géométriquement simplifiés dans le but de faciliter la modélisation mécanique en fonction d'un modèle de comportement choisi. Par exemple, un tube flexible multi-matériaux avec une section faiblement variable peut être représenté par une pièce avec des caractéristiques physiques et géométriques équivalentes, comme une section constante ou une autre forme simple équivalente. Donc, il est nécessaire de pouvoir modifier la topologie du modèle ou même créer une nouvelle pièce virtuelle dans le système de RV. Par conséquent, tout comme dans le cas du problème de transfert du modèle CAO du produit et de création des modèles adaptés de l'environnement extérieur statique, discuté par la suite, il convient d'introduire une notion de modèle adapté de pièces flexibles.

Les données appelées « comportementales » sont toutes les informations associées au comportement physique et/ou à la manipulation d'une pièce virtuelle déformable (Figure 3.1). Ces informations sont également divisées en deux catégories : les paramètres intrinsèques caractérisant le comportement de la pièce et les données fournies par les interfaces motrices ou sensori-motrices de RV pendant la simulation. Les paramètres internes de la pièce flexible sont :

- les caractéristiques du matériau de la pièce : le module d'Young, le coefficient de Poisson, la loi de comportement (élastique linéaire, élasto-plastique,...), etc.,
- d'autres paramètres de la pièce déformable influençant son comportement : la forme initiale de la pièce, l'état de précontrainte dans la pièce, les hypothèses mises en œuvre concernant le comportement de la pièce (grands déplacements, petites déformations,...), les CLs, etc.,
- les variables de conception à contrôler durant la manipulation virtuelle de la pièce déformable : les contraintes dans la pièce, la courbure, les efforts maximum à développer par l'opérateur, etc.,
- les paramètres à faire varier afin d'optimiser la structure déformable : la courbure initiale de la pièce correspondant à la position de l'opérateur dans l'espace, la géométrie et le matériau de la pièce en vue de diminuer son poids, réduire le coût,..., à condition de ne pas dépasser les contraintes admissibles dans la pièce, etc.

Certains de ces paramètres peuvent être déterminés à partir de la maquette numérique de la pièce déformable, comme les dimensions et les fixations. Cependant, certaines données d'entrée pour la simulation d'A/D virtuel de la pièce déformable ne peuvent être directement issues du modèle CAO. Par exemple, une maquette numérique complète du produit contenant les pièces flexibles ne comporte qu'un état de la pièce déformée dans une configuration donnée du mécanisme. Alors, il n'y a pas de référence à l'état initial de la pièce ni à sa forme au repos ou bien au début d'une opération d'assemblage. En cas de manque d'information de départ pour la simulation, certains paramètres

peuvent être assignés par défaut, comme l'absence totale de contraintes initiales dans la pièce, l'encastrement parfait, la forme initiale rectiligne de la pièce flexible, etc.

Dans la pratique industrielle, beaucoup de pièces utilisées dans un produit complexe sont souvent conçues et fabriquées à l'extérieur de l'entreprise. Couramment, certaines caractéristiques de ces pièces et, notamment, les caractéristiques du matériau, comme les modules d'élasticité ou la loi de comportement d'une pièce déformable multi-matériaux, ne sont pas connues (ce ne sont pas des paramètres fonctionnels du produit). Ce problème nécessite alors la mise en place d'une série d'expérimentations dans le but de déterminer les caractéristiques manquantes : le module d'Young pour une pièce constituée d'un seul matériau ou le module d'Young équivalent pour une pièce multi-matériaux, la loi de comportement, etc. Certains aspects de détermination des paramètres d'entrée pour la simulation du comportement de pièces flexibles seront discutés par la suite. Néanmoins, soulignons que la caractérisation adéquate des propriétés du matériau est très importante car elle détermine par la suite la qualité de la modélisation physique de la déformation, i.e. la génération de résultats réalistes de simulation de la déformation pour une opération d'A/D et de maintenance virtuelle.

Parmi les variables de conception à contrôler durant la manipulation virtuelle d'une pièce déformable, on peut citer les contraintes dans la pièce, sa courbure ou les efforts maximum à développer lors de la déformation de la pièce. Donc, les valeurs admissibles de toutes ces variables sont également des paramètres d'entrée possibles pour la simulation d'A/D virtuel. Certaines des variables de conception, comme le matériau ou la géométrie de la pièce en question, peuvent être modifiées durant la manipulation virtuelle. Ceci permet de satisfaire les contraintes de conception en contrôlant leurs valeurs admissibles définies par l'opérateur.

D'autres données « comportementales » associées à une pièce virtuelle déformable à manipuler sont les données mesurées par les interfaces motrices ou sensori-motrices de RV utilisée au cours de la manipulation virtuelle (Figure 3.1). Ces interfaces, présentées au chapitre précédent, fournissent les CLs géométriques et mécaniques : les déplacements linéaires et angulaires d'une partie de la pièce attachée à la main virtuelle, les efforts appliqués à la pièce virtuelle au cours de la manipulation. Il est nécessaire de remarquer qu'il existe un autre type de CLs dues à des contacts entre la pièce déformée et son environnement lors de la simulation virtuelle : les points de contacts représentés comme les déplacements imposés, les forces de contact, etc. Ces CLs sont aussi les données d'entrée pour la simulation de la déformation de la pièce. Cependant, ces informations sont fournies, en temps réel, par le système de RV au cours de la manipulation en utilisant, par exemple, un module de détection de collisions du système de RV. Ainsi, de telles CLs sont les conséquences des actions de l'utilisateur.

Utilisation des métaphores d'interaction :

La notion et le but de l'utilisation des métaphores d'interaction ont déjà été présentés au chapitre 2. Notons dans cette partie certains éléments liés à l'utilisation des métaphores la simulation des opérations d'A/D de pièces déformables (Figure 3.1).

Rappelons que les métaphores d'interaction sont utilisées afin d'interpréter une information d'entrée/sortie durant la manipulation virtuelle. Parmi les informations d'entrée/sortie pour la simulation d'A/D présentées ci-dessus, les données d'entrée/sortie à traduire afin de pouvoir simuler un événement et percevoir le résultat de simulation sont :

- les données géométriques définies dans l'espace des configurations : les CLs géométriques, les déplacements générés au cours de la déformation d'une pièce flexible, etc.,
- les données mécaniques définies dans l'espace des efforts : les CLs, les efforts à développer lors de la simulation du comportement de la pièce flexible, etc.,
- les informations sensorielles de type signaux sonores, changement de couleurs, etc. afin d'indiquer à l'opérateur un événement important.

Donc, les données à interpréter par le système de RV sont principalement les données fournies par l'opérateur à l'aide des interfaces comportementales motrices, sensori-motrices, etc. Ces données de nature géométrique ou mécanique sont traduites en informations définies dans les espaces d'efforts/configurations de telle façon que le système de RV puisse produire une déformation de la pièce flexible dans l'un ou l'autre des espaces conformément au modèle mécanique utilisé et aux

objectifs de manipulation virtuelle. Par exemple, les mouvements fournis à l'aide d'une souris 2D peuvent représenter les déplacements imposés en translation x et y pour définir une trajectoire d'A/D d'une extrémité d'un tube virtuel flexible ou une rotation θ afin de pouvoir introduire une extrémité de ce tube dans un trou. Donc, on voit ici un exemple de substitution d'un mouvement de la souris en translation par les déplacements angulaires à l'aide de la métaphore correspondante. Ainsi, il est possible d'élaborer différentes métaphores auxquelles certaines actions sont associées et de les intégrer directement dans l'environnement de RV par des représentations symboliques : les icônes, les images, etc.

L'utilisation des métaphores est intéressante lorsque les interfaces de contrôle de RV ne permettent pas de fournir de CLs adéquates à cause de leurs limitations technologiques ou de leur coût. Dans ce cas, il s'agit d'une simulation des CLs pour la modélisation du comportement de pièces déformables. Par exemple, il est difficile d'appliquer des forces dont la direction suit la trajectoire d'A/D d'une pièce flexible à cause de leur non-linéarité géométrique forte. Alors, il est possible de concevoir une métaphore de telle façon que les efforts mesurés par un dispositif haptique soient recalculés et appliqués à une pièce flexible comme l'utilisateur le désire. Par contre, une telle transformation des CLs au niveau des efforts peut conduire parfois à une perception inappropriée d'un résultat de simulation vis-à-vis de l'action réalisée par l'opérateur influençant l'interprétation et l'analyse de la simulation.

La conception de métaphores d'interaction est encore plus délicate dans le cas d'une substitution ou simplification d'une action de l'utilisateur ou d'une CL lorsque que l'utilisation d'une interface de contrôle de RV est n'est pas possible en raison de son coût important. Par exemple, une métaphore d'interaction représentant l'application d'efforts-suiveurs dans l'espace des efforts à l'aide des mouvements d'une souris 2D a été proposée dans la partie expérimentale des travaux de la présente thèse. Afin d'éviter des investissements importants et de contourner certains problèmes technologiques des dispositifs haptiques (difficulté d'application des efforts-suiveurs, mesure des efforts,...), une substitution d'une action de l'utilisateur en 2D a été effectuée de façon suivante :

1. L'utilisateur sélectionne deux efforts-suiveurs parmi les trois possibles en 2D (deux forces Q et N et un moment M) pour spécifier le chargement d'un tube flexible en grands déplacements (Figure 3.2a). Le choix peut s'effectuer à l'aide d'un menu virtuel.
2. Une fois que les efforts associés à la trajectoire d'A/D à calculer sont définis, par exemple, la force de flexion Q et la force de traction/compression N (Figure 3.2a), des efforts dans le plan (Q, N) sont générés par l'utilisateur à l'aide d'une souris 2D banalisée de telle façon qu'une position de la souris coïncide avec un point (Q_i, N_i) des forces à appliquer dans l'espace des efforts. Ainsi, à chaque nouveau mouvement de la souris, deux nouvelles valeurs des forces correspondantes sont définies par l'utilisateur et transmises à un système de RV pour être appliquées au tube virtuel flexible (Figure 3.2b). L'ensemble de tous les mouvements de la souris (ou l'ensemble des points (Q_i, N_i) à une échelle donnée) forme un chemin de chargement dans l'espace des efforts.
3. Une déformation est produite par le système de RV pour chaque chargement du tube virtuel flexible (ou du mouvement mesuré de la souris). Le système de simulation fournit une réponse du système mécanique dans l'espace des configurations, i.e. une forme déformée et un nouveau point (x_i, y_i) de la trajectoire d'A/D correspondant au chargement donné (Figure 3.2c).

Malgré les avantages d'une telle métaphore, les liens entre la perception d'une pièce flexible manipulée et le contrôle d'une action, i.e. la spécification des efforts à appliquer et la correction du chemin de chargement en fonction de la trajectoire d'A/D, ne sont pas évidents. En effet, les mouvements de la souris définissant le chemin de chargement sont effectués de façon intuitive : l'utilisateur contrôle la trajectoire d'A/D fournie par le système de RV et corrige ses actions en modifiant le chemin de chargement sans pouvoir estimer facilement le résultat en termes de déformation et de génération de trajectoire d'A/D en fonction d'une nouvelle position (Q_i, N_i) . Ce contrôle est difficile à cause de l'absence de retour d'efforts. Donc, un certain apprentissage est requis afin de pouvoir exploiter ce type de métaphore sans trop s'éloigner d'un comportement humain réel. Par conséquent, il convient de réaliser une étude comparative du comportement humain dans différents cas de manipulation virtuelle d'une pièce flexible :

- en conditions réelles : assemblage d'une pièce réelle, enregistrement des actions de l'opérateur au cours de la manipulation et contrôle de ses actions, mesure de la déformation de la pièce,
- dans un monde virtuel dans des conditions approchées de la réalité, par exemple, en utilisant un dispositif haptique à retour d'efforts avec la capture des mouvements de l'opérateur et l'enregistrement des mêmes actions de l'opérateur et des déformations de la pièce au cours de l'assemblage virtuel,
- lors de la substitution d'une action motrice d'un être humain, par exemple, en utilisant la métaphore d'interaction présentée ci-dessus : simulation de la même opération d'assemblage virtuel de pièce flexible, enregistrement des actions de l'opérateur et mesure des résultats de déformation de la pièce au cours de la manipulation.

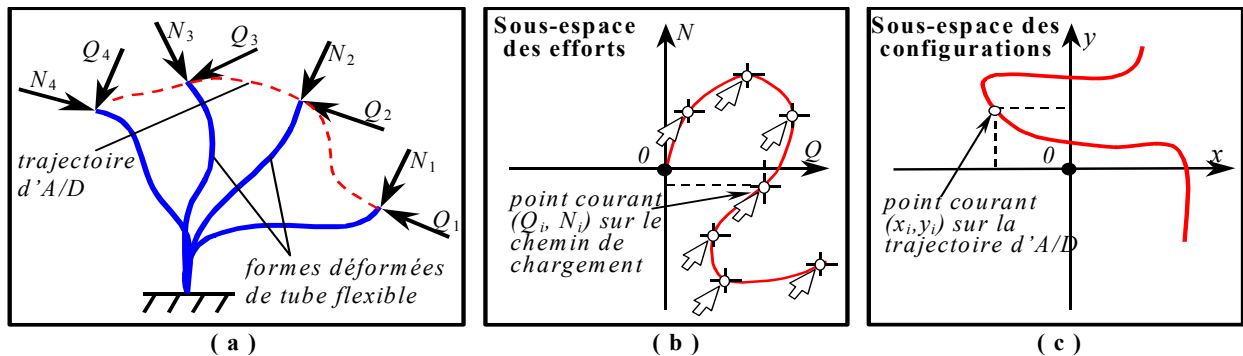


Figure 3.2. Exemple de métaphore substituant l'application simultanée de forces sur un tube flexible :
 (a) schéma du chargement d'un tube flexible par deux efforts-suiveurs Q et N ,
 (b) spécification d'un chemin de chargement dans le sous-espace des efforts (Q, N) ,
 (c) réponse temps réel du système mécanique dans le sous-espace des configurations (x, y) : trajectoire d'A/D d'une extrémité du tube flexible.

Une telle comparaison des actions d'un être humain et, en particulier, la spécification d'un chemin de chargement et sa correction à l'aide d'un contrôle en position afin d'atteindre un objectif donné, permettront d'identifier des différences dans le processus de raisonnement d'un être humain, de « mesurer » le niveau d'éloignement d'un comportement humain « virtuel » de celui « réel » et donc, de valider une métaphore en vue de son utilisation ultérieure dans la simulation d'une opération d'A/D de pièces flexibles d'un même type, i.e. modèles poutres, plaques, etc.

Simulation dans un environnement de RV :

Un certain nombre d'aspects concernant la simulation des opérations d'A/D et de maintenance dans un environnement de RV ont été déjà considérés dans deux premiers chapitres du mémoire. Dans cette partie, certains éléments de l'architecture d'un environnement de RV seront résumés compte tenu des particularités des pièces déformables.

Nous avons déjà remarqué que la structure modulaire de l'environnement de simulation des opérations d'A/D virtuelle est préférable. Une telle architecture permet d'adapter facilement les fonctionnalités du système de RV à différents besoins de l'utilisateur par :

- l'organisation plus structurée de l'environnement de simulation,
- l'ajout, la suppression, la mise à jour de différents modules responsables de différentes tâches,
- des échanges plus faciles entre ces différents modules et le dispositif de contrôle plus souples en fonction des interfaces comportementales choisies,
- des liens plus efficaces entre un modéleur géométrique utilisé au bureau d'études et l'environnement de RV pour transférer les données, d'où des gains en termes de temps, i.e. l'augmentation de l'efficacité du processus de développement d'un produit,
- etc.

Les principaux modules à utiliser lors de la conception de l'architecture de l'environnement de simulation des opérations d'A/D virtuel ou l'adaptation d'un environnement de RV existant sont (Figure 3.1) :

- le module de traitement de données d'entrée/sortie qui peut inclure des métaphores d'interaction,
- le module de contrôle des interfaces comportementales utilisées : motrices, sensorielles, sensori-motrices,
- le module de création des objets virtuels, y compris les fonctions de création de modèles adaptés pour la simulation d'un comportement physique de pièces déformables,
- le module de manipulation d'objets virtuels,
- le module de détection de collisions entre les objets virtuels manipulés et leur environnement extérieur,
- le module de simulation d'un comportement physique de pièces déformables,
- etc.

Nous nous intéressons plus particulièrement au module de simulation de pièces déformables, i.e. l'intégration et l'interaction de différents modèles décrivant le comportement de telles pièces. Comme nous l'avons vu précédemment, il existe à ce jour un certain nombre de modèles mécaniques de pièces déformables dont les contraintes principales de leur utilisation dans la simulation des opérations d'A/D virtuelles sont :

- le temps de réponse,
- le réalisme dans la simulation de comportement,
- l'adaptabilité aux interfaces de contrôle de RV, i.e. la simulation dans les espaces des efforts/configurations.

Par conséquent, la mise en place d'une structure particulière du module de simulation du comportement de pièces déformables, compte tenu des contraintes de modélisation temps-réel de telles pièces, est nécessaire. Cette structure est basée sur une modélisation à deux niveaux de pièces déformables, ce qui est particulièrement intéressant dans le cas de manipulation de pièces flexibles soumises aux grands déplacements. Les particularités d'une telle architecture seront détaillées dans la section 3.3.

Perception des données de sortie de simulation :

L'étude d'une opération d'A/D ou de maintenance est basée sur des données de sortie produites en temps réel par le système de simulation de RV. Ces données sont traduites, si nécessaire, par les métaphores d'interaction correspondantes et transmises aux interfaces sensorielles et/ou sensori-motrices pour leurs perception et analyse. Certains éléments concernant les interfaces comportementales ont déjà été présentés au chapitre 2. Dans cette partie, nous synthétisons les données nécessaires pour la perception et l'analyse d'une opération d'A/D donnée de pièces flexibles (Figure 3.1).

Selon les interfaces de contrôle couramment utilisées dans la simulation des opérations d'A/D virtuelles, les données de sortie sont principalement exprimées dans les espaces :

- des efforts : perception physique et/ou visuelle des efforts de retour,
- des configurations : perception visuelle de la géométrie déformée des pièces flexibles, de la trajectoire d'A/D réalisée, etc.

Les interfaces haptiques à retour d'efforts sont utilisées pour la perception physique et temps réel des efforts produits par le système de RV : forces et moments associés aux déplacements et à la déformation des pièces déformables. Les interfaces sensorielles de visualisation permettent d'afficher en temps réel :

- les données géométriques : géométrie déformée de la pièce, trajectoire d'A/D durant la manipulation virtuelle, etc.,

- les données en termes d'efforts si l'utilisation des dispositifs haptiques semble être onéreuse : forces et moments à appliquer afin d'atteindre un point courant de la trajectoire d'A/D imposée, etc.,
- les informations supplémentaires pour l'analyse plus fine de l'opération d'A/D donnée comme différentes contraintes de conception, d'ergonomie, ..., à contrôler en temps réel : contrainte maximale équivalente dans la pièce flexible déformée au cours de sa manipulation, efforts maximum à appliquer, l courbure maximale de la pièce déformée, etc. Toutes ces contraintes sont également comparées en temps réel avec des valeurs admissibles, fournies auparavant au système de RV en tant que données d'entrée.

Contrôle, analyse, prise de décision :

La dernière phase dans la méthodologie proposée consiste à analyser les données de sortie selon et à prendre une décision en fonction des résultats de simulation virtuelle (Figure 3.1). L'analyse s'effectue à partir d'un contrôle de données produites par le système de RV. Par conséquent, la prise de décision dépend directement du résultat de simulation qui est, à son tour, fonction :

- des hypothèses de simulation faites préalablement,
- des données d'entrée de la simulation,
- des modèles de simulation du comportement physique.

La prise de décision apporte une réponse aux objectifs de simulation d'A/D virtuel. Ceci représente résultats dans l'étude d'une opération. En effet, le retour d'information durant la manipulation virtuelle d'une pièce déformable permet soit de valider des caractéristiques de cette pièce, de son environnement extérieur, des actions de l'opérateur, soit de modifier certains paramètres comme :

- les caractéristiques de la pièce déformable : dimensions, matériau, etc.,
- la trajectoire d'A/D en vue d'éviter des collisions avec des obstacles, de minimiser les efforts à développer lors de la déformation de la pièce, de contourner des configurations dangereuses conduisant à l'apparition de contraintes ou de courbures critiques de la pièce, etc.,
- la géométrie/type des fixations entre la pièce déformable et son environnement,
- la séquence d'A/D,
- etc.

Le retour d'information en termes de contrôle/corrections des actions de l'opérateur, de modifications des paramètres de la pièce déformable manipulée, de son environnement extérieur, des séquences d'A/D, etc. a donc un impact local sur la démarche de développement d'un produit. Ainsi, les modifications/optimations éventuelles du produit, en ce qui concerne son comportement (par exemple, les pièces flexibles) durant le processus d'A/D ou de maintenance, son assemblabilité, son accessibilité, son ergonomie, etc., constituent des liens entre l'étude du processus d'A/D et la conception et l'industrialisation du produit.

3.3. Principes de simulation de pièces déformables pour l'A/D virtuel

La simulation des opérations d'A/D et de maintenance virtuelles de pièces déformables nécessite la prise en compte du comportement complexe de telles pièces. Ceci suppose la mise en place d'une méthodologie spécifique pour la simulation réaliste du comportement de pièces déformables durant leur manipulation virtuelle. La méthodologie proposée précédemment est basée sur l'intégration de modèles mécaniques de pièces déformables, la spécification de paramètres particuliers, requis pour la simulation réaliste, et permet de produire, d'analyser et d'optimiser une opération d'A/D donnée d'un système mécanique contenant des pièces déformables.

On a vu antérieurement que la simulation du comportement de pièces déformables durant la modélisation d'une opération d'A/D est soumise à différentes contraintes concernant une telle

modélisation dans un environnement de RV. Les principales contraintes sont la réponse temps réel du système et la génération de résultats réalistes en termes de déformation et d'évaluation des efforts requis durant la manipulation d'une pièce déformable. Ainsi, une architecture spécifique d'environnement de simulation des opérations d'A/D et, en particulier, une structure de module responsable de la simulation réaliste et rapide du comportement de pièces déformables sont requises.

Dans cette section, nous nous intéressons à certaines spécificités d'un module qui permet de traiter le comportement complexe de pièces déformables de natures différentes compte tenu des contraintes de simulation des opérations d'A/D virtuelles évoquées ci-dessus. Les principes de simulation de pièces déformables, basés sur une structure proposée d'un tel module, seront également discutés.

3.3.1. Classification des modèles de composants pour l'A/D virtuel

Il existe à ce jour différentes approches permettant de simuler les opérations d'A/D et de maintenance virtuelles (voir chapitre 1). Parmi ces approches, certaines n'offrent que la manipulation de composants à caractère rigide, d'autres prennent en compte un comportement physique des objets virtuels durant leur manipulation. Cependant, « prendre en compte » un phénomène physique durant toute simulation virtuelle signifie le modéliser sous un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui sont souvent masquées ou même ne sont pas utilisées/exprimées correctement. Par exemple, en ce qui concerne la simulation virtuelle de pièces déformables, la notion de déformation est souvent confondue avec la génération des déplacements exprimant une nouvelle forme déformée d'une telle pièce. De plus, pour certains informaticiens il n'existe aucune différence entre différents types de pièces souples et donc, entre plusieurs modèles mécaniques possibles : l'important est que leurs prototypes virtuels puissent se déformer rapidement !

Il convient alors de préciser qu'il existe différentes classes de composants dont le comportement physique peut être modélisé différemment en fonction des objectifs de simulation. Par exemple, un composant à caractère déformable peut être modélisé comme un objet rigide avec l'hypothèse que ses déplacements (forme géométrique) et déformations sont négligeables. Lorsqu'il est nécessaire de considérer le comportement d'un composant soumis à des grands déplacements, caractérisés par des changements importants de forme géométrique, différents modèles mécaniques peuvent être alors employés afin de simplifier les équations décrivant le comportement physique de ce composant en fonction de sa forme ou de son matériau : poutre ou plaque, comportement élastique linéaire ou quasi linéaire avec une bonne approximation des caractéristiques du matériau, etc. Donc, du point de vue mécanique, une simulation du comportement physique suppose l'utilisation de certaines hypothèses simplificatrices. Ainsi, avant de parler de la structure d'un système de simulation de pièces virtuelles déformables, il semble important de distinguer différents composants et leurs modèles associés pour la simulation d'opérations d'A/D virtuelles du point de vue mécanique.

En ce qui concerne les composants eux-mêmes, ils peuvent être classés selon leur *nature* ou leur *état* :

- rigides,
- déformables,
- flexibles.

Un composant rigide est indéformable par sa nature ou bien une déformation est négligeable au cours de sa manipulation. Un tel composant peut alors être considéré comme ayant un seul état pour sa forme géométrique durant la simulation d'une opération d'A/D virtuelle (Figure 3.3a). Il faut souligner que dans la plupart des systèmes actuelles de simulation d'A/D virtuel les pièces à manipuler sont souvent représentées comme des composants rigides uniquement durant la simulation d'une opération.

Un composant déformable peut se déformer durant sa manipulation, mais possède un nombre réduit d'états déformés. Couramment, les composants de ce type sont les pièces normalisées dont les états déformés peuvent être déterminés à partir des normes correspondantes ou facilement calculés, comme les anneaux élastiques, les ressorts, etc. Ces composants peuvent donc être représentés par un nombre fini de configurations. Par exemple, lors du montage d'un anneau élastique soumis à des petits déplacements (Figure 3.3b) ou la phase de manutention d'un manchon caoutchouté soumis

potentiellement aux grandes déformations dans la structure (Figure 3.3c). Notamment, l'anneau élastique (Figure 3.3b) peut être représenté par un objet rigide n'ayant que trois configurations géométriques en fonction des différentes phases d'une opération d'A/D : une forme au repos sans aucune déformation durant la manutention ou la recherche d'une trajectoire d'A/D, une forme extrême avec une déformation maximale de l'anneau durant la phase de montage effectif (mise en place) et une configuration déformée lorsque l'anneau est effectivement mis en place.

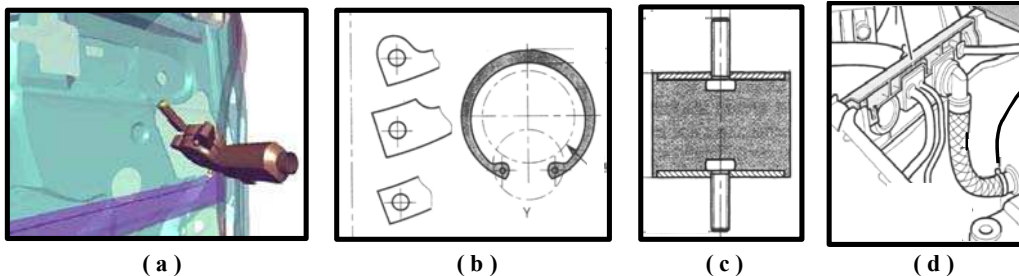


Figure 3.3. Exemples de composants pour la simulation des opérations d'A/D virtuelles :
 (a) extraction d'un moteur de lève-vitre d'une portière de voiture Renault [I3D 2002] – pièce rigide,
 (b) anneau élastique – pièce déformable soumise à des petits déplacements et petites déformations,
 (c) manchon caoutchouté – pièce déformable soumise à des grandes déformations,
 (d) durit – pièce flexible soumise à des grands déplacements et des petites/grandes déformations.

Les composants flexibles sont ceux ayant un nombre d'états infini avec la prise en compte obligatoire de leur comportement physique durant la manipulation virtuelle. Ces composants peuvent être soumis à tout type de déformation ; alors l'utilisation de modèles de comportement physique est nécessaire. Notamment, dans le cas de simulation d'une opération d'A/D virtuelle, des modèles permettant de générer en temps réel les déplacements et les déformations dans la structure sont requis. La manipulation de composants flexibles de type tubes (Figure 3.3d), soumis à des grands déplacements et caractérisés par des changements importants de leur forme géométrique tout au long de l'opération d'A/D virtuelle, requièrent également l'utilisation de modèles mécaniques particuliers, représentant le comportement complexe de ces composants. Cependant, la contrainte essentielle de tels modèles mécaniques dans le domaine de l'A/D virtuel est leur temps de réponse, i.e. le temps de génération d'une solution du modèle mécanique. Donc, durant certaines phases d'un assemblage comme la manutention ou les déplacements d'une pièce flexible maintenue par les deux mains d'un opérateur avec une déformation négligeable, l'utilisation de tels modèles mécaniques n'est plus pertinente. Dans ce cas, une pièce flexible peut être modélisée par un composant rigide de forme invariante durant une phase précise.

Lorsque la simulation d'une opération d'A/D nécessite l'utilisation de modèles de comportement mécanique d'une pièce à caractère flexible, de tels modèles peuvent être classés selon :

- *la nature du modèle mécanique associé à la pièce :*
 - poutres,
 - plaques, coques,...
 - modèles volumiques,
 - etc.,
- *le « domaine de travail » de la pièce :*
 - petits déplacements,
 - petites déformations,
 - grands déplacements,
 - grandes déformations,
- *la nature des sollicitations appliquées à la pièce :*
 - torsion,
 - flexion,

- traction/compression,
- flambement,
- etc.,
- *le domaine d'application* relatif au temps de calcul :
 - A/D (semi-) automatiques, i.e. les calculs lents sont acceptés : modèles généraux de type MEF, modèles continus non-linéaires, etc.,
 - A/D virtuels, i.e. des calculs rapides sont nécessaires : modèles adaptés de type masses-ressorts, minimisation de l'énergie potentielle pour une catégorie donnée de composants (poutres, plaques,...), etc.

Cette classification reflète certaines propriétés des modèles à employer dans la simulation des opérations d'A/D. En effet, l'utilisation de différents modèles suppose la validation d'un certain nombre d'hypothèses ainsi que la spécification d'un contexte et d'un but de simulation. Par exemple, le comportement d'une pièce flexible de type tube ou une durite souple peut être simulé en utilisant un modèle *poutre* si une dimension caractéristique (longueur du tube) est beaucoup plus importante que les autres ou un modèle *coque* si deux dimensions caractéristiques (longueur du tube et rayon du cercle représentant la section du tube) sont beaucoup plus importantes que la troisième dimension [Léon & al. 1999]. Le même modèle peut aussi bien être utilisé dans le domaine des petits déplacements [Chipperfield & al. 2002] que produire des grands déplacements [Wakamatsu & al. 1995], [Léon & al. 1999], [Lamiroux & al. 1999] ou des grandes déformations en fonction du matériau utilisé, de la structure de la pièce,... et surtout, de l'objectif de simulation d'une opération d'A/D.

Ainsi, le choix d'un modèle adéquat et pertinent pour une simulation donnée de pièce déformable est un problème délicat, supposant une analyse précise de l'objectif de simulation afin de lui associer le ou les modèles mécaniques appropriés.

3.3.2. Architecture et fonctionnement d'un module de simulation de pièces déformables

Cette partie présente de manière générale une nouvelle architecture d'un module pour la simulation de pièces déformables durant d'une opération d'A/D virtuelle. Pour l'étude et l'optimisation des opérations d'A/D et de maintenance de systèmes mécaniques contenant des pièces déformables à l'aide d'un environnement de RV, l'utilisateur a besoin d'accéder rapidement à des résultats réalistes de déformation de pièces flexibles. En fonction des objectifs de la simulation, une telle modélisation de comportement de pièces déformables prend en compte :

- la loi de comportement du matériau utilisé : déformations linéaires ou quasi linéaires, i.e. dans le domaine des petites déformations, ou bien non-linéaires,
- les déplacements d'un composant par rapport à son environnement extérieur : petits déplacements, i.e. ceux géométriquement linéaires, ou bien grands déplacements non-linéaires,
- la nature des sollicitations : flexion, torsion, compression, etc.

Durant une telle modélisation, en fonction des besoins de l'utilisateur, une évaluation des efforts réalistes, associés à la déformation des pièces flexibles peut être demandée avec/sans une estimation de l'état de contraintes dans la pièce ou d'autres paramètres à contrôler lors d'une étude/optimisation d'une opération d'A/D ou de maintenance. Dans tous les cas, la modélisation réaliste d'un comportement de la pièce déformable doit être effectuée en temps réel afin de préserver l'efficacité de l'interprétation réalisée par l'utilisateur en temps réel.

Ainsi, la stratégie générale proposée pour une simulation efficace de pièces déformables durant l'A/D virtuel est basée sur les modèles à différentes échelles de temps. Ceci suppose l'utilisation de divers modèles mécaniques, simplifiés ou complexes, en fonction des besoins de l'utilisateur. L'architecture proposée pour le module de simulation de pièces déformables est ainsi focalisée sur deux types de modèles pour la simulation virtuelle, donc deux échelles de temps [Mikchevitch & al. 2002], [Mikchevitch & al./2 2003], [Mikchevitch & al./1 2004], [Mikchevitch & al./2 2004] :

- le Modèle Temps Réel (MTR) représentant un modèle simplifié de haute fréquence, dédié à la génération de déformations en temps réel,
- le Modèle Mécanique Interactif (MMI) représentant un modèle mécanique complexe de plus basse fréquence, dédié à une évaluation réaliste des paramètres mécaniques (efforts, déformations,...).

3.3.2.1. Modèle Temps Réel

Le MTR est une désignation générale couvrant tous les modèles permettant de simuler le comportement de pièces déformables en temps réel. Ainsi, le MTR inclue les modèles adaptés temps réel, présentés à la section 2.3 : modèles masses-ressorts, modèles basés sur la méthode de cinématique inverse ou l'approche duale, modèles classiques de la résistance des matériaux, modèles adaptés, basés sur la minimisation de l'énergie potentielle de déformation ou d'autres variantes de ces modèles.

Malheureusement, la plupart de ces modèles ne permettent pas de produire des résultats satisfaisants concernant la déformation réaliste d'une pièce flexible sollicitée, les efforts à développer afin de produire une telle déformation, l'estimation de l'état de contraintes dans la pièce, etc. Donc, tous ces modèles mécaniques ou, plus généralement, le MTR est destiné aux études relativement simples et rapides d'opérations d'A/D dans un environnement de RV comme l'étude qualitative et temps réel (par exemple, l'illustration d'assemblabilité globalement d'une pièce déformable) basée sur l'animation et la modélisation d'un comportement de pièces déformables soumises à des petits ou grands déplacements pour une variation limitée des CLs, etc.

Afin de pouvoir mesurer/générer des efforts lors de l'utilisation du MTR, les interfaces haptiques sont couramment utilisées. Cependant, certains problèmes de ces dispositifs s'ajoutent également aux imprécisions des modèles mécaniques : valeurs limitées des efforts applicables à de tels dispositifs, incapacité à développer des moments pour certains dispositifs, pertes lors de la transmission de données mesurées et donc, l'application de CLs différant de la réalité, coût important des interfaces haptiques, etc. Donc, le MTR peut bien évidemment être utilisé avec les interfaces haptiques afin de générer des efforts, ce qui se pratique actuellement, mais cette démarche est discutable et, surtout ce n'est pas l'unique solution pour pouvoir s'affranchir du problème de génération d'efforts réalistes.

En résumé, le MTR est caractérisé par (voir la section 2.3) :

- sa capacité de génération rapide de la déformation de pièces et donc, de la mise en jour temps réel de la géométrie déformée,
- la géométrie déformée produite est souvent partiellement réaliste dans le cas des pièces flexibles car des modèles mécaniques simplifiés sont utilisés,
- sa difficulté d'estimation des efforts à développer avec/sans l'utilisation des dispositifs haptiques à retour d'effort : certains modèles mécaniques simplifiés génèrent des efforts approximatifs, certaines approches produisent des efforts irréalistes dans le cas de pièces flexibles soumises à des grands déplacements, d'autres approches ne peuvent fournir une telle information.

3.3.2.2. Modèle Mécanique Interactif

Le MMI est également une désignation générale relative à tout modèle mécanique produisant une information plus réaliste que le MTR, en particulier, en ce qui concerne une déformation physiquement correcte de pièces flexibles, mais avec un temps de réponse plus long que dans le cas de l'utilisation du MTR. Donc, le but de l'utilisation de tels modèles mécaniques ou, plus généralement, du MMI est de générer :

- la géométrie déformée réaliste ainsi que la trajectoire d'A/D de pièces déformables ou flexibles,
- des efforts réalistes en termes de forces et de moments associés à la déformation d'une pièce déformable ou flexible avec/sans l'utilisation d'interfaces haptiques,

- des informations supplémentaires relatives à la déformation de la pièce flexible ou le contrôle des variables de conception : contrainte maximale dans la pièce, courbure maximale/minimale de la pièce déformée, efforts maximum nécessaires à développer du point de vue ergonomique, etc.

Ainsi, le MMI doit être capable de simuler de façon adéquate le comportement de pièces flexibles, notamment en ce qui concerne les grands déplacements et les efforts à appliquer, i.e. les efforts à calculer correspondant aux déplacements imposés par l'utilisateur, par exemple. Malheureusement, les modèles mécaniques pouvant faire partie du MMI sont souvent de nature complexe, comme la MEF, les méthodes continues décrivant le comportement de pièces flexibles soumises à des grands déplacements, etc. Par conséquent, ces modèles sont plus lents et souvent ne sont plus considérés comme des modèles produisant les données nécessaires en temps réel. Donc, l'utilisation directe du MMI dans une évaluation d'un comportement réaliste d'une pièce flexible durant la simulation d'une opération d'A/D virtuelle est difficilement envisageable.

Cependant, l'intégration d'un tel modèle dans un système de RV est importante pour l'analyse correcte d'une opération virtuelle. De plus, le MMI fournissant des efforts réalistes peut permettre de contourner certaines difficultés des interfaces haptiques à retour d'effort et même éviter l'utilisation de ces dernières. Alors, deux solutions sont proposées en ce qui concerne l'utilisation du MMI durant la simulation d'A/D virtuel de pièces flexibles :

- le développement de modèles mécaniques rapides adaptés compte tenu de la contrainte de simulation temps réel,
- l'interaction entre le MTR et le MMI.

Le recours à des modèles mécaniques adaptés a été déjà discuté au chapitre 2. Nous présenterons un tel modèle et développerons quelques éléments de sa mise en place du point de vue numérique et de son utilité dans l'analyse adéquate d'une opération d'A/D d'une pièce flexible au cours des chapitres suivants du présent mémoire. Cependant, il convient de noter que si le temps de réponse du MMI reste élevé, par exemple, plus de 0,3...0,5 s pour la génération d'une forme déformée et des efforts associés réalistes, l'interaction possible entre le MTR et MMI représente une solution intéressante. Les aspects d'une telle interaction ainsi que les particularités d'une démarche générale de simulation de pièces flexibles à partir d'un module de simulation de comportement de pièces déformables sont discutés ci-après.

3.3.2.3. Interactions entre le MTR et le MMI

Selon l'architecture proposée pour le module traitant le problème de simulation de pièces déformables, le fonctionnement du MTR et du MMI inclue des modèles mécaniques différents par leurs niveaux de réalisme et leur rapidité dans la simulation du comportement de pièces déformables. Le choix de tel ou tel modèle dépend des objectifs de la simulation et des contraintes à prendre en compte. Le fonctionnement des modèles mécaniques dépend principalement des conditions de la simulation représentées par les données d'entrée fournies par l'utilisateur et les interfaces motrices ou sensori-motrices utilisées (Figure 3.4a) : paramètres requis par tel ou tel modèle, caractéristiques du matériau, CLs, environnement extérieur, etc. Cependant, l'activation d'un modèle jugé plus pertinent est une question délicate, fonction de la stratégie choisie par l'utilisateur, concerne de différents niveaux d'étude/analyse d'une opération virtuelle et nécessite des explications plus détaillées.

Selon la stratégie proposée pour l'analyse d'une opération d'A/D virtuelle de pièces déformables, le comportement de telles pièces est modélisé en se basant à la fois sur le MTR et sur le MMI en fonction des objectifs de simulation. Ainsi, l'architecture proposée pour le module de simulation de pièces flexibles dans un environnement de RV est basée sur le couple « MTR – MMI » équivalent à deux niveaux d'étude/analyse de l'opération d'A/D :

- le premier niveau correspond à une évaluation temps réel mais peu précise en terme de réponse fournie par le MTR,
- le deuxième niveau, qui est le niveau supérieur, correspond à une évaluation plus précise, car elle est réalisée en utilisant un des modèles complexes mais adéquats du MMI. Ce second

niveau permet de recalculer les résultats du premier afin d'éviter les dérives et de permettre une analyse correcte.

Donc, le sens de l'utilisation de MMI est plus fondamental : ce modèle a pour objectif de conduire à une analyse adéquate de la simulation de pièces déformables et d'assurer le fonctionnement cohérent du MTR du point de vue de la qualité des résultats produits par celui-ci lorsqu'il interagit avec le MMI.

Pour être utilisables dans la simulation virtuelle, les modèles intégrés dans le MMI et le MTR doivent être adaptés aux interfaces courantes de RV. Ceci se traduit notamment par :

- la simulation de pièces déformables basée sur le MTR/MMI dans l'espace des efforts/configurations introduit,
- le lien entre les données d'entrée fournies par l'interface motrice et celles requises par le MTR/MMI, en ce qui concerne les CLs.

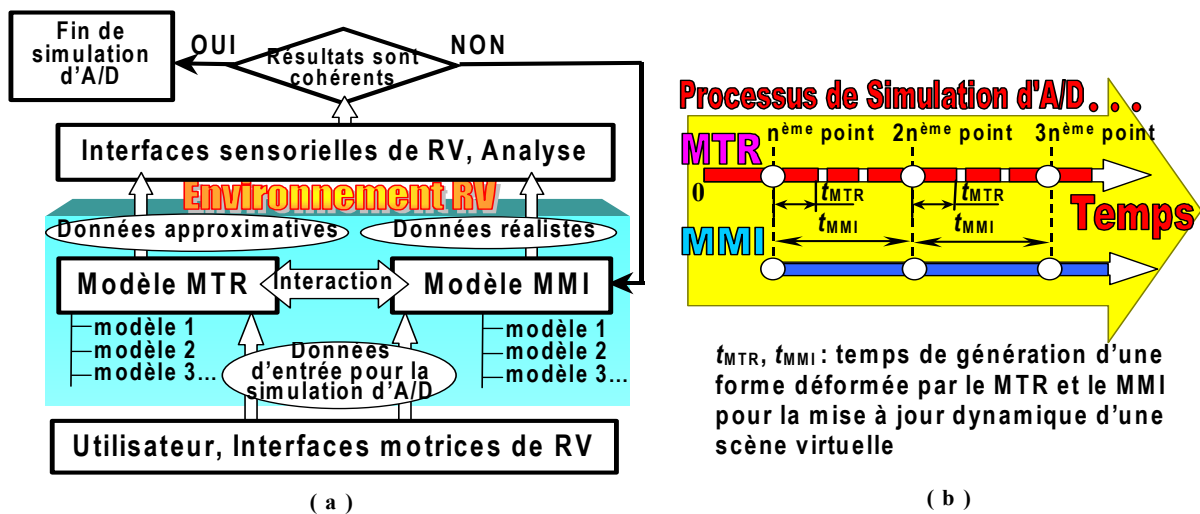


Figure 3.4. Interaction entre le MTR et le MMI durant l'A/D virtuel de pièces déformables :
 (a) architecture générale du module de simulation de pièces déformables ;
 (b) interaction entre le MTR et le MMI pour la mise en jour automatique et temps réel de données réalistes durant la simulation de l'A/D virtuel de pièces flexibles.

Selon l'approche proposée, les données d'entrée nécessaires pour la simulation d'A/D virtuel de pièces déformables doivent donc être de même nature tant pour les interfaces comportementales de RV que pour le MTR/MMI. Ainsi, à partir des conditions de la simulation d'A/D virtuel, définies en partie par les CLs géométriques/mécaniques, le MTR/MMI choisi produit une réponse du système mécanique dans les espaces des efforts et des configurations associés, i.e. une information géométrique/physique concernant la déformation de la pièce flexible déformée.

D'après l'architecture à deux niveaux de simulation proposée, la simulation virtuelle d'une pièce déformable s'effectue selon la stratégie suivante. Premièrement, la simulation d'A/D débute par la visualisation d'un environnement virtuel extérieur de la pièce déformable à manipuler. Cet environnement est de caractère statique, i.e. il est constitué des composants rigides déjà assemblés qui ne changent pas de position. De plus, avant de réaliser toute simulation de pièce déformable, un certain travail préparatif est nécessaire. L'utilisateur doit identifier un modèle mécanique MTR/MMI correspondant d'une base de données reliant des modèles à un objectif choisi de la simulation d'A/D (Figure 3.4a). Le choix d'un modèle de déformation, effectué à partir d'un contexte de simulation virtuelle, définit la nature du comportement de la pièce déformable à étudier, par exemple, les petits ou grands déplacements. Selon le choix du modèle de déformation, une information d'entrée correspondante pour la pièce déformable sera par la suite requise par le système de RV : la représentation géométrique conforme au modèle mécanique choisi (poutre, coque, élément volumique,...), la géométrie initiale de la pièce déformable, les caractéristiques du matériau, la

définition de certaines CLs comme le type de fixation ou de prise en main, la nature des efforts appliqués ou à évaluer, etc.

Une fois cette étape préliminaire effectuée, l'utilisateur démarre le processus de simulation du comportement de la pièce déformable. Dans le cas d'une étude simplifiée de l'opération d'A/D virtuel ou d'une analyse plus détaillée, nécessitant une interaction entre différents modèles, le MTR est chargé dans un premier temps. Alors, la simulation correspondant est effectuée à partir d'une manipulation virtuelle de la pièce déformable compte tenu des CLs en fonction des déplacements ou efforts imposés, fournis par l'utilisateur à l'aide des interfaces motrices ou sensori-motrices de RV. Par conséquent, en se basant sur les résultats d'une telle simulation, l'utilisateur étudie le comportement de la pièce en question, analyse l'opération d'A/D compte tenu de différents critères, effectue des optimisations, si nécessaire.

Cependant, si l'utilisateur n'est pas capable, par exemple, de déduire si le résultat de la simulation temps réel est exploitable ou complètement faux, l'activation manuelle du MMI est indispensable. Ceci suppose donc une interaction entre le MMI et le MTR, qui s'effectue à travers des CLs de la même nature, définies dans les espaces des efforts ou des configurations. En effet, de manière générale, il faut prévoir la nécessité d'une telle vérification de résultats de simulation et donc, l'activation du MMI à n'importe quel stade de simulation de l'A/D virtuel si l'utilisateur estime que les résultats de simulation sont trop différents d'un comportement réel de la pièce déformable. Dans le cas de l'activation manuelle du MMI, la simulation basée sur un nouveau modèle mécanique plus complexe est équivalente à celle effectuée par le MTR : le choix d'un modèle correspondant, la définition des paramètres spécifiques, etc. Dans ce cas, la simulation précédente, effectuée à l'aide du MTR, est stoppée. Dans le cas de l'interaction entre le MMI et le MTR, nécessitant l'activation automatique du MMI lors de la simulation basée sur le MTR, l'utilisateur doit aussi spécifier les paramètres requis par le MMI avant de démarrer le processus de manipulation virtuelle. Ceci est important car les données d'entrée nécessaires pour le fonctionnement du MMI peuvent être différentes de celles requises par le MTR. Dans tous les cas, les CLs géométriques/mécaniques prescrites pour le MTR et pour le MMI sont les mêmes.

Voici un certain nombre de critères pour une activation du MMI lors de la simulation virtuelle basée sur le MTR :

- le MTR ne produit pas des résultats acceptables : les déplacements/efforts évalués semblent être trop différents par rapport à la réalité, le problème de convergence du modèle simplifié, etc.,
- le domaine de travail est trop large pour le MTR : les efforts produits sont limités, l'utilisateur se rend compte au cours de la manipulation que les déplacements de la pièce flexible sont très importants tandis que le MTR choisi n'est valable que pour le domaine des petits déplacements, etc.,
- certains paramètres, nécessaires pour l'analyse de l'opération d'A/D ou de maintenance ne peuvent pas être évalués par le MTR : les forces ou les moments ne sont pas fournis, l'état de contrainte ne peut pas être évalué, etc.
- etc.

En effet, la possibilité de vérification des résultats de simulation par le MMI est intéressante dans le contexte de l'étude d'A/D, de maintenance et même de la conception mécanique, car les critères changent, évoluent au cours du développement du produit. Par exemple, lors d'une étude simplifiée de l'assemblabilité un tube flexible soumis à des grands déplacements, les critères peuvent être la vérification de la longueur du tube du point de vue d'un opérateur d'assemblage, d'un agent de maintenance et d'un concepteur ainsi que la vérification d'état de contrainte dans ce tube de longueur donnée durant sa manipulation selon le point de vue d'un concepteur. En revanche, lors qu'il s'agit d'une étude plus approfondie, comme l'optimisation de la trajectoire d'A/D, les critères peuvent être différents : recherche d'une trajectoire nécessitant les efforts minimum à développer par un opérateur d'assemblage ou correspondant au temps minimal d'assemblage, etc. Alors, les critères pour l'activation du MMI évoluent également.

Afin de déterminer quand le MTR ne répond plus aux objectifs de la simulation (par exemple, les données fournies par le MTR sont irréalistes) ou bien de vérifier si les résultats de simulation sont encore exploitables pour l'analyse d'une opération d'A/D donnée d'une pièce déformable, l'utilisateur

compare interactivement les résultats fournis par le MTR et le MMI dans des conditions de simulation équivalentes, i.e. mêmes CLs, mêmes caractéristiques matériau et paramètres dimensionnels, etc. Par exemple, dans le cas de la simulation d'un tube virtuel flexible soumis à des grands déplacements dans l'espace des efforts, il suffit d'appliquer les mêmes efforts à une structure ayant la même forme initiale et de comparer les déplacements de l'axe déformé du tube générés par le MTR et le MMI choisis.

Lorsqu'il s'agit de l'interaction entre le MTR et le MMI durant la manipulation temps réel du tube flexible, la même comparaison peut être faite automatiquement, par exemple, en tous les $n^{\text{ièmes}}$ points de la trajectoire d'A/D (Figure 3.4a, b). Une telle vérification peut être faite afin de :

- s'assurer du comportement cohérent du MTR. Alors, l'affichage des résultats du MTR peut suffire,
- recalculer le MTR si les résultats de la simulation diffèrent trop par rapport à ceux fournis par le MMI choisi.

Toutefois, comme on le voit sur la Figure 3.4b, ce recalage n'est pas toujours simple si le temps de réponse du MMI, t_{MMI} , est trop important par rapport à celui du MTR, t_{MTR} . Par exemple, si $t_{\text{MMI}} \gg t_{\text{MTR}}$, le recalage peut être très visible pour l'opérateur manipulant la pièce flexible à cause d'une différence importante entre les formes déformées générées par les différents modèles utilisés (condition de stabilité du processus de recalage). Dans le cas contraire, une nouvelle forme déformée, produite parallèlement par le MMI, sert d'interpolation pour la visualisation. La mise à jour de la scène virtuelle est ainsi effectuée, et le MTR repart donc de cette forme réaliste fournie par le MMI. Cette forme devient une nouvelle forme intermédiaire d'équilibre, « initiale » pour l'itération suivante, caractérisant un nouveau mouvement de l'opérateur.

Lorsque l'utilisateur estime que le MTR ne correspond pas aux attentes, par exemple, dans le cas d'une étude d'une pièce flexible soumise à des grands déplacements, le modèle MMI est directement activé (Figure 3.4a). Malgré des avantages en terme de simulation réaliste du comportement physique de pièces flexibles, le problème de temps de calcul devient une contrainte essentielle lorsqu'il s'agit de l'utilisation du MMI uniquement. En effet, si le MMI choisi est suffisamment rapide, i.e. le temps de réponse du modèle mécanique est de type temps réel, l'appel au MTR, générant les résultats incorrects et inexploitable, semble être inutile. Cependant, si t_{MMI} est trop important, par exemple, $t_{\text{MMI}} > 0,5 \text{ s}$, l'interaction entre le MMI et le MTR peut être une solution intéressante. En effet, l'objectif de cette interaction est de « masquer » ce possible handicap du MMI en effectuant des calculs intermédiaires et parallèles, basés sur le MTR, durant une itération courante du MMI. En effet, lors du calcul basé sur le MMI, l'utilisateur peut continuer à fournir des données d'entrée, caractérisant ses mouvements ininterrompus sans se rendre compte que le MMI est encore en train de traiter le comportement d'une pièce flexible correspondant, par exemple, à un mouvement précédent de la main virtuelle tenant cette pièce. En fait, ces calculs parallèles supplémentaires visent à « cacher » le processus de calcul basé sur le MMI en approximant la déformation de la pièce flexible durant les mouvements continus de l'utilisateur. De plus, comme dans le cas du recalage du MTR présenté ci-dessus, les conditions de simulation pour les calculs parallèles réalisés par le MMI et le MTR doivent être tout à fait équivalents du point de vue des CLs définies dans l'espace des efforts ou des configurations.

Finalement, après chaque itération correspondant à une réponse du système mécanique, notamment, dans le cas de la modélisation basée sur le MTR, la visualisation temps réel d'une nouvelle forme déformée est réalisée à l'aide des interfaces sensorielles de RV. Lorsqu'il s'agit de l'utilisation du MMI, chaque mise à jour d'une forme déformée plus réaliste peut s'accompagner de la transmission à l'utilisateur d'informations supplémentaires, comme les efforts requis, l'état de contrainte dans la pièce au cours de la déformation, etc., ce qui peut être très utile pour l'analyse détaillée d'une opération d'A/D. Par ailleurs, la forme déformée produite peut également être utilisée dans un test de collision entre la pièce déformée et son environnement extérieur.

3.3.2.4. Aspects relatifs au choix d'un modèle mécanique

Il semble important de discuter également quelques aspects du choix des modèles MTR et MMI afin de réaliser une tâche de simulation par un opérateur sans compétences en mécanique. Ceci est un facteur important notamment pour l'utilisation de l'architecture proposée dans le contexte

industriel, lorsqu'un agent de maintenance opère des opérations d'A/D et de maintenance virtuelles de pièces déformables. En effet, il est nécessaire de rappeler qu'il n'existe pas de modèle général pour la simulation temps réel de pièces flexibles. Par conséquent, le premier pas vers l'adéquation d'un modèle mécanique parmi les modèles inclus dans le MTR/MMI est l'association d'un modèle à une catégorie de composants à l'aide d'un menu virtuel comportant un symbole correspondant. Par exemple, le comportement complexe d'une classe de composants flexibles comme les tubes, les tiges, les durits, etc., couramment utilisés dans l'industrie, peut être simulé à l'aide d'un menu comportant un symbole d'une « poutre ». Cependant, la modélisation du comportement d'une telle poutre peut être effectuée en utilisant différentes méthodes : méthodes continues basées sur l'établissement d'une équation particulière d'équilibre de la poutre, minimisation de l'énergie potentielle de déformation, ..., méthodes discrètes comme la MEF ou le modèle masses-ressorts appliqués au modèle « poutre », etc. Dans ce cas, le choix d'un modèle approprié peut se faire à partir de la spécification d'un objectif de simulation, par exemple, une étude rapide et simplifiée supposant l'utilisation d'un des modèles de MTR ou une analyse approfondie basée sur un MMI.

La définition interactive du matériau utilisé dans la structure déformable, dont la loi de comportement est connue, est également une piste permettant de guider l'utilisateur dans le choix préliminaire d'un modèle mécanique.

Une autre possibilité de guider et même automatiser le processus de choix d'un modèle mécanique est l'utilisation de la désignation normalisée d'une pièce. Par exemple, malgré sa structure métallique, un ressort peut produire de petits ou grands déplacements. Néanmoins, la désignation précise éliminera automatiquement des modèles mécaniques inutiles.

3.3.3. Paramètres d'entrée pour la simulation de pièces déformables

Nous avons déjà abordé de manière générale différents aspects concernant la définition des données d'entrée pour la simulation, le contrôle, l'analyse et l'optimisation des opérations d'A/D virtuelles de pièces déformables. Ces données ont été divisées en données externes et internes. Dans cette partie, nous allons énumérer les données principales, nécessaires pour la simulation du comportement de pièces déformables, i.e. les paramètres minimum permettant de modéliser la déformation de telles pièces.

Les paramètres indispensables pour la simulation du comportement de pièces déformables sont :

- les paramètres dimensionnels,
- les données caractérisant les propriétés du matériau,
- les données définissant les liens entre la pièce déformable et son environnement extérieur.

Tous les paramètres dimensionnels peuvent être déterminés à partir d'un modèle CAO du produit. Les paramètres dimensionnels indispensables pour la simulation sont identifiés en fonction du modèle mécanique choisi pour cette simulation.

Les données définissant les liens entre la pièce déformable et son environnement extérieur peuvent être déterminées à partir d'un modèle CAO et d'informations technologiques (par exemple, le type de fixation) ou bien spécifiées au cours de la manipulation virtuelle, en ce qui concerne des CLs comme le type et les valeurs des efforts appliqués par l'opérateur et/ou dus aux collisions avec des obstacles, les déplacements imposés décrivant une trajectoire d'A/D souhaitée, le nombre de mains utilisées pour une opération donnée, etc.

Enfin, les paramètres influençant également la qualité de la modélisation du comportement d'une pièce déformable et, notamment, d'une pièce flexible soumise à des grands déplacements, sont ceux caractérisant les propriétés de son matériau constitutif. Ces paramètres peuvent être facilement déterminés à partir d'une nomenclature pour des matériaux connus. Dans le cas contraire, il est indispensable d'effectuer une étude expérimentale afin de déterminer les caractéristiques manquantes : module d'Young pour une pièce constituée d'un seul matériau ou module d'Young équivalent pour une pièce composée d'un multi-matériau si la pièce flexible travaille dans le domaine de petites déformations, loi de comportement, etc. La section suivante présente certains aspects de la détermination expérimentale des paramètres caractérisant les propriétés du matériau de pièces flexibles.

3.4. Détermination des caractéristiques du matériau pour la simulation du comportement de pièces flexibles

Cette section présente quelques aspects de la détermination expérimentale des caractéristiques du matériau pour la simulation du comportement de pièces déformables et, en particulier, de pièces flexibles modélisées par des poutres flexibles et soumises à des grands déplacements lors de la simulation des opérations d'A/D. Cependant, il est utile tout d'abord de rappeler quelques généralités de la résistance des matériaux classique en ce qui concerne la loi comportement caractérisant les propriétés du matériau et définissant ainsi certains paramètres d'entrée pour la simulation du comportement de pièces déformables. Nous nous intéressons également dans cette section au problème d'intégration de lois de comportement linéaires et non-linéaires dans le processus de simulation de pièces flexibles.

3.4.1. Caractérisation du comportement de pièces déformables

3.4.1.1. Lois de comportement

La loi de comportement permet de décrire de façon qualitative et quantitative le phénomène de déformation d'une structure constituée d'un matériau donné. Cette loi est basée sur une relation établie expérimentalement entre les déformations de la structure soumise à un changement donné et les contraintes internes que cette structure subit. Généralement, cette loi est déterminée à partir des essais sur une éprouvette sollicitée, par exemple, par des efforts de traction exercés par une machine d'essai, en mesurant l'allongement de cette éprouvette en fonction des efforts qui lui sont appliqués.

Les sollicitations appliquées peuvent être de nature tout à fait différente (traction/compression, flexion, torsion,...), ce qui permet d'étudier le comportement d'une structure déformable soumise à des chargements variables et donc, d'établir des lois de comportement caractérisant les propriétés du matériau travaillant en traction/compression, flexion, torsion. La Figure 3.5a représente un exemple de loi de comportement en traction $\sigma = f_l(\varepsilon)$ d'un acier dit « doux », caractérisé par des déformations considérables ε lors d'un chargement important. Cette loi est caractérisée globalement par deux zones principales, en ce qui concerne le comportement du matériau :

- le comportement dit *élastique linéaire* : tant que l'on reste dans la zone quasiment linéaire OA , i.e. en dessous d'un point A appelé *limite de la proportionnalité*, qui est très proche d'un autre point B appelé *limite élastique*, le comportement reste élastique. Cela signifie que la courbe de charge est confondue avec la courbe de décharge et donc, l'éprouvette retrouve sa forme initiale avant déformation (point O). La limite élastique est un point frontière entre le comportement élastique et non-élastique du matériau,
- le comportement dit *non-linéaire* ou *plastique* : si l'on dépasse la limite élastique (point B) durant un chargement important, d'une part, les déformations dans l'éprouvette donnée deviennent importantes (zone CF) et, d'autre part, l'éprouvette ne retrouve plus sa forme initiale lors de la décharge (ligne PP'). En effet, l'éprouvette revient à un autre état (point P'), différent de celui de départ (point O) ; cela signifie que le matériau a perdu la mémoire concernant son état initial et se comporte comme si l'état initial avait changé.

Différentes lois de comportement $\sigma = f_l(\varepsilon)$ peuvent être établies pour diverses sollicitations (Figures 3.5a, b) et différents matériaux (Figure 3.5c). Cependant, deux domaines sont souvent distingués en ce qui concerne le comportement du matériau : le domaine élastique, quasiment linéaire (zone OA sur les Figures 3.5a, b, c) et celui caractérisé par la non-linéarité physique.

Du point de vue de la construction mécanique, c'est la zone élastique qui représente un intérêt particulier. Premièrement, cette zone est caractérisée par des déformations assez faibles, ce qui est important pour la conception d'une structure mécanique. En effet, les composants des mécanismes sont généralement conçus pour travailler dans le domaine élastique, ce qui permet d'assurer un bon fonctionnement du mécanisme en évitant la destruction des composants. De plus, une approximation linéaire de la zone élastique de la loi de comportement d'un matériau permet d'élaborer des relations

plus simples, en ce qui concerne la modélisation d'un comportement d'une structure sous une charge donnée.

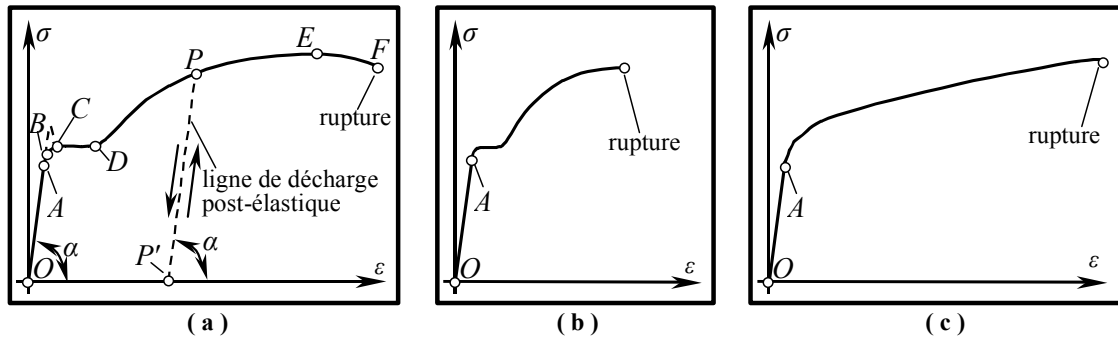


Figure 3.5. Exemples de lois de comportement de différents métaux [Filonenko-Boroditch & al. 1955], [Fanchon 2001] : (a) loi de comportement de l'acier « doux » en traction ; (b) loi de comportement de l'acier « doux » en compression ; (c) loi de comportement du bronze en traction.

De plus, il est nécessaire de souligner que dans tous les cas le matériau est considéré comme *isotrope*, i.e. il a le même comportement dans toutes les directions. Pour une présentation plus complète, le lecteur pourra se référer à [Filonenko-Boroditch & al. 1955], [Filonenko-Boroditch & al. 1956], [Landau & al. 1959], [Timoshenko & al. 1970], [Ciarlet 1985], [Dartus 1995].

3.4.1.2. Loi de Hooke

Lors que le matériau travaille dans le domaine élastique linéaire, on dit que le matériau suit *la loi de Hooke*, i.e. la relation entre les contraintes dans la structure et les déformations peut être approximée par une droite avec une assez bonne précision. Evidemment, ce domaine est variable en fonction du matériau et des sollicitations. Il est nécessaire de souligner le fait que la structure produise les déformations de valeur très faible, inférieure à une certaine limite δ fixée, par exemple à 0,2% d'allongement relatif longitudinal. Ces déformations sont appelées *petites*. Dans ce cas, la loi de comportement ou la loi de Hooke pour une structure déformable, modélisée par exemple par une poutre soumise à une extension unidirectionnelle et ayant une déformation linéaire longitudinale ε_x et des contractions linéaires transversales ε_y et ε_z , est exprimée de la façon suivante (Figure 3.6a) [Filonenko-Boroditch & al. 1955], [Timoshenko & al. 1970] :

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}; \quad \varepsilon_y = -\mu \frac{\sigma_x}{E}; \quad \varepsilon_z = -\mu \frac{\sigma_x}{E}, \quad (3.1)$$

où σ_x [MPa] est la contrainte normale dans la poutre, E [MPa] est le module d'Young (ou le module d'élasticité longitudinal) caractérisant le comportement d'un matériau donné en traction/compression et en flexion, μ est le coefficient de Poisson prenant en compte la déformation transversale.

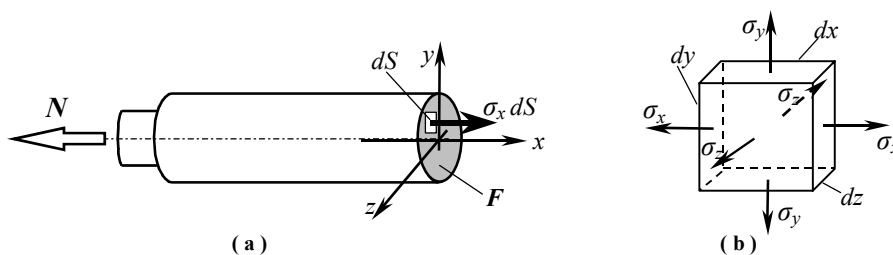


Figure 3.6. Exemples de sollicitations : (a) traction unidirectionnelle pure d'une poutre ; (b) contraintes dans un élément $dxdydz$ d'une structure en traction tridirectionnelle pure.

Plus généralement, lorsqu'une structure subit une sollicitation tridirectionnelle en produisant des déformations linéaires $\vec{\varepsilon} = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z]^T$ et angulaires $\vec{\gamma} = [\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}]^T$ (ou glissements), des contraintes normales $\vec{\sigma} = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z]^T$ et de cisaillement $\vec{\tau} = [\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}]^T$ se développent. Alors, le comportement de la structure est décrit par la loi de Hooke généralisée [Filonenko-Boroditch & al. 1956] :

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)]; & \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}; \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E}[\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)]; & \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}; \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E}[\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)]; & \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}, \end{cases} \quad (3.2)$$

où G [MPa] est le module de torsion (ou module d'élasticité transversal) caractérisant le comportement d'un matériau donné en torsion.

Ainsi, on a trois constantes E , G et μ , définies expérimentalement et caractérisant les propriétés d'un matériau donné. Ces constantes sont donc utilisées afin de pouvoir décrire la déformation d'une structure déformable ou flexible soumise à des petits/grands déplacements dans le domaine linéaire élastique. De plus, il existe une relation entre ces trois coefficients :

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}. \quad (3.3)$$

Donc, à partir de deux constantes connues ou déterminées expérimentalement, il est possible de déduire la troisième en utilisant (3.3).

3.4.1.3. Application de la loi de Hooke

L'intérêt de la loi de Hooke, pour un matériau conforme à cette loi, est l'établissement de relations simples décrivant la déformation d'une structure de façon réaliste en fonction d'un matériau utilisé. En particulier, ceci permet de calculer les déplacements d'une pièce déformable, i.e. de trouver sa forme déformée durant la simulation d'une opération virtuelle donnée. Donnons ici un exemple de quelques relations de base décrivant la déformation d'une pièce déformable de façon réaliste. Par ailleurs, ceci permettra de montrer un lien entre trois parties importantes dans ces relations afin de pouvoir exprimer correctement la déformation d'une structure :

- une partie mécanique : les efforts internes à la structure dus aux efforts externes appliqués à la structure,
- une partie géométrique : les dimensions caractéristiques de la structure ainsi que sa géométrie déformée exprimée à l'aide des déplacements et des déformations,
- une partie physique : les propriétés du matériau.

Soit une pièce modélisée par une poutre déformable soumise à une sollicitation de traction pure et travaillant dans le domaine élastique linéaire (Figure 3.6a). Alors, selon la loi de Hooke, la déformation longitudinale ε selon l'axe x de cette poutre peut être exprimée de la façon suivante :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{N}{ES}, \quad (3.4)$$

où σ est la contrainte normale dans la poutre, N est la force de traction appliquée à la poutre, S est la section de la poutre.

Ainsi, l'allongement de la poutre due à l'application de la force N uniquement est :

$$\Delta l = \frac{Nl}{ES}, \quad (3.5)$$

où l est la longueur de la poutre.

Soit maintenant une sollicitation de flexion pure, obtenue par un moment de flexion M appliqué à la poutre. Alors, la déformation longitudinale ε selon l'axe x d'un élément de la poutre (Figure 3.7a) est exprimée de la façon suivante (compte tenu de certaines hypothèses qui seront évoquées au chapitre 4) :

$$\varepsilon = \frac{\Delta(ds)}{ds} = \frac{y d\varphi}{\rho d\varphi} = \frac{y}{\rho}, \quad (3.6)$$

où $\Delta(ds)$ est l'extension d'un élément de longueur ds de la poutre, y est la distance entre un point donné de la section S et l'axe de la poutre, ρ est le rayon de courbure de la poutre déformée.

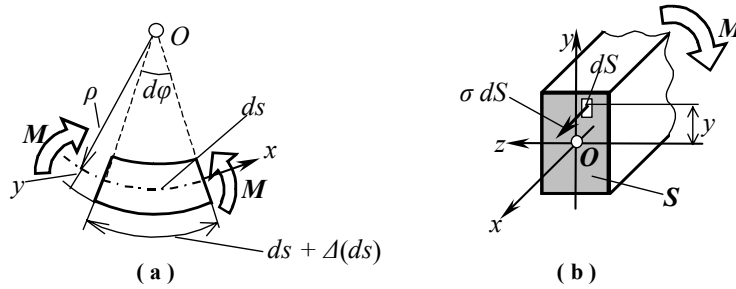


Figure 3.7. Déformation d'une poutre soumise à une flexion pure :
(a) caractérisation de la déformation de l'élément ds due au moment de flexion M ;
(b) contrainte dans la poutre déformée.

D'autre part, l'équation d'équilibre statique de la poutre, soumise au même moment de flexion M dans le plan Oxy , écrite comme la somme des moments appliqués à la poutre coupée perpendiculairement à l'axe z est (Figure 3.7b) :

$$M = \int_S (\sigma dS) y. \quad (3.7)$$

Alors, compte tenu de (3.6) et de la loi de Hooke, la relation (3.7) s'exprime :

$$M = \int_S \sigma dS y = \int_S E \varepsilon y dS = \int_S \frac{E}{\rho} y^2 dS = \frac{E}{\rho} \int_S y^2 dS = \frac{EI_z}{\rho}, \quad (3.8)$$

où I_z est le moment quadratique de la section S par rapport à l'axe z .

Finalement, la forme déformée de la poutre est caractérisée par sa courbure κ :

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI_z}. \quad (3.9)$$

Les termes ES et EI_z dans les équations (3.5) et (3.9) sont respectivement les raideurs en traction/compression et en flexion plane et caractérisent le comportement d'une structure de matériau et de section donnés.

3.4.1.4. Matériaux ne suivant pas la loi de Hooke

Les généralités exposées dans les parties précédentes concernent plutôt les matériaux générant des petites déformations sous un chargement donné, qui ne dépasse par la limite élastique à partir de laquelle le matériau ne suit plus la loi de Hooke. Par contre, les déplacements produits par une structure peuvent être autant petits que grands, i.e. approximativement linéaires ou fortement non-linéaires géométriquement. Par exemple, les matériaux ayant une rigidité assez importante, comme les métaux, produisent des déplacements plutôt petits en restant dans la zone linéaire de sa loi de

comportement. D'autres matériaux, comme les plastiques ayant une rigidité beaucoup moins importante, peuvent produire des petits ou des grands déplacements en fonction de la charge, tout en restant dans la zone élastique. De plus, pour les matériaux plastiques comme certains métaux (Figure 3.5c) ou plastiques, il n'existe pas de transition franche correspondant au moment où le matériau « plastifie » (la ligne CD sur la Figure 3.5a). Dans ce cas, on fixe une limite élastique appelée « technique » lorsque le matériau a des allongements résiduels dits *plastiques* correspondant, par exemple à 0,2% de la longueur initiale de la poutre [Filonenko-Boroditch & al. 1955]. Là réside la difficulté de distinguer des petites ou des grandes déformations d'une structure. De plus, pour les plastiques ayant un tel allongement, le comportement peut être déjà non-linéaire physiquement. En outre, beaucoup de matériaux n'ont pas la même loi de comportement en traction et en compression. Les informations sur des différentes lois de comportement peuvent être trouvées dans [Ogden 1984], [Florez 1989], [Rubin 1990], [LNP 1992], [Ladeveze 1996], [Gilchrist & al. 1999], [Fanchon 2001].

Ainsi, pour les matériaux qui ne suivent pas la loi de Hooke, différentes approximations ont été proposées [Filonenko-Boroditch & al. 1955]. Par exemple, on peut utiliser une approximation linéaire (Figure 3.8a), exponentielle (Figure 3.8b), linéaire par morceaux (Figure 3.8c).

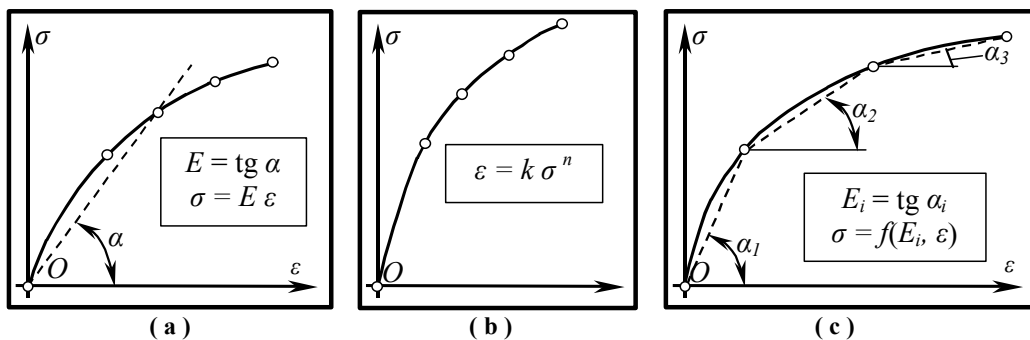


Figure 3.8. Exemples d'approximation des lois de comportement de matériaux qui ne suivent pas la loi de Hooke [Filonenko-Boroditch & al. 1955] : (a) approximation linéaire ; (b) approximation exponentielle ; (c) approximation linéaire par morceaux.

Pour des pièces composées de plusieurs matériaux (multi-matériaux), il est également possible d'établir une loi équivalente linéaire, en modélisant une pièce donnée par une poutre homogène et en déterminant un module d'Young équivalent, mais cette démarche n'est pas si simple. Les matériaux composites ont besoin de modèles plus complexes, décrivant des propriétés particulières de ces matériaux anisotropes. Cependant, même pour des matériaux courants avec une structure plus ou moins simple, les modèles linéarisés ne sont pas parfaits. En effet, il faudrait tenir compte d'autres contraintes, difficilement formulables :

- les particularités des matériaux : plastiques soumis à des petits ou à des grands déplacements, matériaux composites,...
- le phénomène d'hystérésis : les matériaux réels ne sont pas parfaitement élastiques,
- la fatigue des matériaux : charges cycliques,...
- le mécanisme de déformation : différents chemins de chargement, décharges complètes/incomplètes, déformations résiduelles,...
- l'influence de la température : déformations supplémentaires, la relaxation du matériau,...
- la vitesse de déformation,
- etc.

3.4.2. Aspects expérimentaux de détermination des caractéristiques d'un matériau sollicité en flexion

Dans cette partie nous nous intéressons au problème de détermination rapide et peu coûteuse des caractéristiques matériau de pièces flexibles soumises à des grands déplacements. Ce problème est particulièrement important, car dans la plupart des cas durant le processus de développement et d'industrialisation d'un produit, certaines pièces flexibles sont achetées auprès de partenaires

industriels et souvent les caractéristiques de leur matériau sont inconnues (souvent ces caractéristiques ne sont pas les paramètres fonctionnels du produit).

Dans la plupart des cas, la détermination des caractéristiques d'un matériau travaillant en flexion, en traction/compression ou en torsion nécessite l'utilisation de machines d'essais souvent onéreuses. Cela pourrait donc conduire à des investissements importants pour la réalisation d'essais expérimentaux en vue d'une simulation virtuelle réaliste, basée sur les résultats expérimentaux. Afin d'éviter un tel investissement, deux solutions sont envisagées :

- faire appel à des organismes spécialisés extérieurs, par exemples des laboratoires ou des centres de recherche publics ou privés,
- réaliser un certain nombre d'essais à l'intérieur de l'entreprise en utilisant des méthodes plus simples que les mesures classiques, nécessitant un équipement spécial, mais permettant de déterminer des caractéristiques d'un matériau avec une bonne approximation.

Dans cette partie nous allons présenter une méthode de détermination rapide des caractéristiques d'un matériau, assez simple et tout à fait réalisable dans des conditions industrielles habituelles. En effet, ceci fait une partie de la méthodologie générale de simulation réaliste de pièces flexibles dans un environnement de RV, ce qui nécessite souvent des essais rapides et peu coûteux. En fin de compte, la détermination des caractéristiques d'un matériau mène à l'établissement d'une loi de comportement approximative.

3.4.2.1. Hypothèses et application

L'objectif est donc proposer une méthode expérimentale, permettant de déterminer le module d'Young d'un matériau soumis à des grands déplacements. La méthode proposée est constituée de deux parties : une partie expérimentale comprenant des mesures et une partie de traitement informatique fournissant un module d'Young. La partie logicielle est conçue pour une caractérisation comportementale de pièces flexibles modélisées par une poutre soumise à des grands déplacements. Les aspects théoriques et applicatifs de ce modèle seront présentés dans les chapitres suivants. Cependant, notons quelques particularités de ce modèle liées aux applications éventuelles de la méthode expérimentale proposée :

- le matériau est homogène et isotrope,
- le matériau travaille dans le domaine des petites déformations,
- la loi de comportement peut être approximée linéairement dans le domaine des petites déformations.

Ainsi, le comportement de pièces modélisées par une poutre flexible soumise à des grands déplacements sous les hypothèses évoquées ci-dessus, peut être caractérisé par un module d'Young constant ou localement constant si la loi de comportement est représentée par une courbe approximée par morceaux (Figure 3.8c), tout en restant dans le domaine des petites déformations. S'il s'agit de déterminer des caractéristiques d'une pièce constituée d'un multi-matériaux, comme les durits, la loi de comportement de telles structures est alors approximée également de façon linéaire globalement ou localement (Figure 3.8a, c). Dans ce dernier cas, il faut alors parler de caractéristique équivalente ou de module d'Young constant équivalent d'un matériau d'une structure idéalisée, constituée d'un multi-matériaux complexe. La détermination d'une telle caractéristique du matériau représente alors une approximation intégrale du module d'Young moyen au niveau macroscopique, i.e. en prenant en compte à la fois du comportement de plusieurs matériaux constituant une pièce flexible donnée, du travail simultané de ces matériaux lors du chargement sans effectuer séparément une approximation de leurs modules de Young, de différentes pertes liées à des contacts particuliers, aux frottements (fils métalliques, par exemple), etc. Ainsi, il est possible de réduire certaines erreurs d'approximation, en ce qui concerne la caractérisation des propriétés d'un multi-matériaux, ce qui représente un avantage particulier de la méthode proposée par rapport à la détermination classique du module d'Young basée sur des essais d'un seul matériau en traction-compression.

La détermination du module d'Young est basée sur la mesure de grands déplacements de la poutre flexible sous une charge de flexion. En effet, les manipulations réelles de pièces de ce type

durant leur assemblage sont souvent basées sur une grande flexion. Donc, il semble nécessaire de prendre en compte un tel type de comportement d'une poutre lors de la détermination du module d'Young. Ainsi, ceci constitue une autre particularité de la méthode proposée.

3.4.2.2. Partie expérimentale

Afin de pouvoir estimer le module d'Young, la mise en place d'une série des mesures des formes déformées d'une poutre flexible est nécessaire. Pour produire les déformées, la pièce flexible encastrée est sollicitée en flexion en appliquant, par exemple, une force dont la valeur varie progressivement entre $P_0=0$ et P_k (Figure 3.9a). La valeur de la force P_j est réglable en utilisant des masses $m_j, j \in [0, k]$. Le chargement plan réalisé permet de simplifier la démarche expérimentale (banc d'essai relativement simple à fabriquer) et de contrôler facilement la valeur de la force conservative appliquée.

La mesure des déplacements plans de la pièce flexible est équivalente à la mesure des coordonnées (x_i^{def}, y_i^{def}) d'un certain nombre de points distribués sur la pièce. Ces points sont repérés dans un repère Oxy , ont des coordonnées (x_i^{init}, y_i^{init}) à l'état initial de la pièce et sont définis avant le chargement. Les coordonnées des points de la pièce flexible déformée peuvent être mesurées en utilisant, par exemple, des comparateurs mécaniques dont les indications sont définies dans le repère Oxy (Figure 3.9b).

Toutes les mesures sont réalisées en statique, i.e. l'application graduelle, quasi-statique de la force P_j . De plus, il est important de souligner que les mesures concernent des formes déformées d'équilibre sans aucune agitation, c'est à dire un certain temps est requis pour que la pièce flexible puisse trouver sa forme nouvelle d'équilibre qui sera par la suite mesurée.

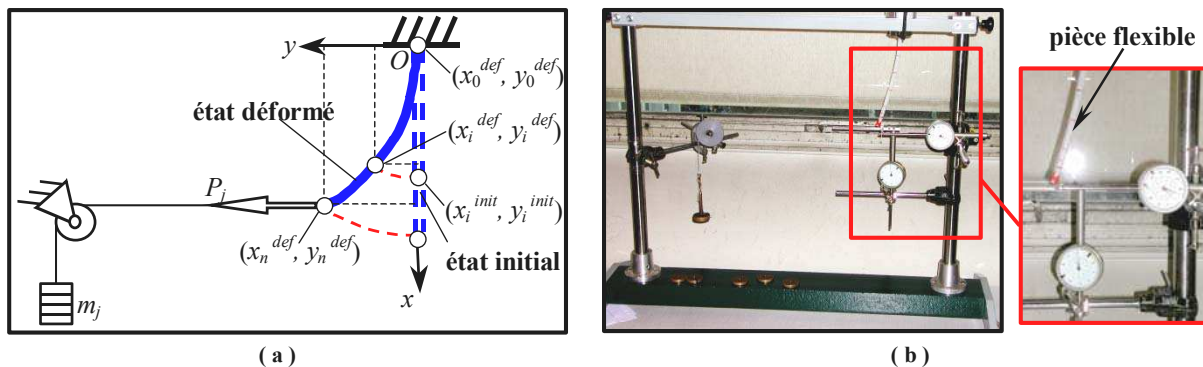


Figure 3.9. Réalisation des essais expérimentaux sur un banc d'essai :
(a) schéma de chargement plan ; (b) mesure de déplacements à l'aide des comparateurs.

3.4.2.3. Partie de dépouillement des résultats expérimentaux

La partie de traitement numérique a pour le but de trouver une valeur approximative du module d'Young. Ainsi, le traitement des résultats des mesures consiste à :

- modéliser numériquement le comportement de la pièce flexible dans les mêmes conditions de déformation : chargements identiques, CLs similaires en ce qui concerne la fixation de la pièce et l'application des efforts, etc.,
- recalcr la forme produite par la modélisation numérique sur les données réelles mesurées,
- déterminer le module d'Young à partir du recalage des formes déformées.

La modélisation numérique est basée sur un des modèles mécaniques de pièces flexibles capables de fournir une déformation réaliste d'une pièce flexible soumise à des grands déplacements compte tenu des caractéristiques du matériau. Le modèle utilisé dans ce travail est un modèle continu de poutre flexible. Ce modèle sera présenté et discuté dans les chapitres suivants. Cependant, notons que ce modèle est tout à fait applicable à la méthodologie de détermination des caractéristiques du matériau de pièces modélisées par une poutre flexible. Notamment, ce modèle requiert :

- la description de la géométrie de la poutre flexible : longueur, section,
- les CLs géométriques et mécaniques,
- la spécification des constantes du matériau.

Le recalage des formes déformées mesurées avec celles calculées par le modèle mécanique utilisé consiste en la comparaison de ces formes. Le meilleur recalage de la forme déformée produite par le modèle, compte tenu des données mesurées, correspond alors à la valeur du module d'Young recherchée. Ce problème est formulé de la façon suivante :

« Trouver la valeur d'un module d'Young correspondant au meilleur recalage de la forme déformée issue de la modélisation numérique par rapport à la forme réelle mesurée ».

Ce problème peut être résolu en minimisant une fonction coût, par exemple, une fonction exprimant un écart global entre deux formes déformées : la forme calculée par le modèle à partir d'un module d'Young donné et celle mesurée. Chaque forme déformée j , produite par le modèle mécanique, est une forme d'équilibre de la pièce flexible sollicitée par la force P_j . Cette forme est produite à partir d'une valeur du module d'Young E_j donnée, constante pour la forme déformée courante. Ce paramètre est donc une variable à déterminer lors de la minimisation de la fonction coût exprimée de la manière suivante dans le cas d'un chargement dans plan (Oxy) :

$$\Delta_j = \sum_{i=0}^n \delta_i^j = \sum_{i=0}^n \sqrt{(x_i^{cal} - x_i^{mes})^2 + (y_i^{cal} - y_i^{mes})^2}, \quad j \in [1, k], \quad (3.10)$$

où δ_i^j est la distance euclidienne entre deux points i correspondant aux positions de l'axe de la $j^{\text{ème}}$ forme mesurée et de celle calculée sous une force P_j , x_i^{cal} et y_i^{cal} sont les coordonnées d'un point i sur l'axe de la forme courante calculée de la poutre flexible et correspondant au module d'Young E_j , $x_i^{mes}=x_i^{def}$ et $y_i^{mes}=y_i^{def}$ sont les coordonnées d'un point i sur l'axe de la forme déformée mesurée j (Figure 3.9), k est le nombre de formes mesurées correspondant aux charges P_j .

Ainsi, la recherche du module d'Young E_j inconnu est équivalente au problème de minimisation suivant (Figure 3.10) :

$$\Delta_j(x_i^{cal}(P_j, E_j), y_i^{cal}(P_j, E_j)) \rightarrow \min_{E_j}, \quad j \in [1, k]. \quad (3.11)$$

Comme dans tout problème de minimisation, une certaine solution initiale est requise afin de pouvoir démarrer le processus de minimisation. Dans le cas présent, la solution initiale E_1^0 pour le module d'Young recherché peut être, par exemple, une valeur du module d'Young calculé en utilisant (3.12) connue dans le cours de résistance des matériaux. En effet, ce module sera très approximatif, car l'équation (3.12) n'est valable que pour le cas de petits déplacements.

$$E_1^0 = \frac{P_1 l^3}{3 d_1 I_z}, \quad (3.12)$$

où l est la longueur de la poutre, d_1 est le déplacement mesuré de l'extrémité de la poutre sollicitée par la force P_1 correspondant à une charge assez faible.

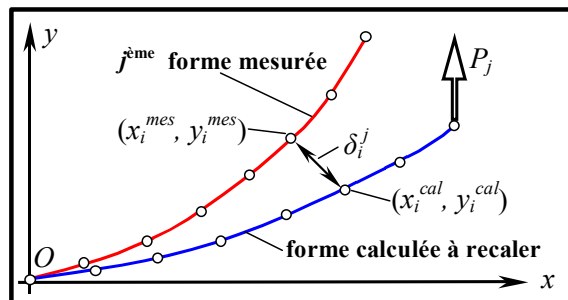


Figure 3.10. Recalage d'une forme déformée calculée en vue de l'estimation du module d'Young.

Lorsque la pièce flexible à étudier est constituée d'un multi-matériaux, alors, selon la méthodologie proposée, il s'agit de déterminer le module d'Young constant équivalent. La Figure 3.12 présente un exemple de détermination d'un tel module pour une gaine qui est une pièce flexible utilisée dans un véhicule. En effet, cette pièce sert à déverrouiller un capot de voiture avant de l'ouvrir (Figure 3.11). Cette gaine est composée de deux parties distinctes, à savoir un ressort en acier à spires jointives très rigide de type tube flexible, entouré d'une enveloppe en polymère moins rigide, qui est nécessaire pour la protection de la partie métallique contre la corrosion et l'infiltration d'impuretés. Les caractéristiques géométriques de la gaine à étudier sont représentées dans le Tableau 3.1.

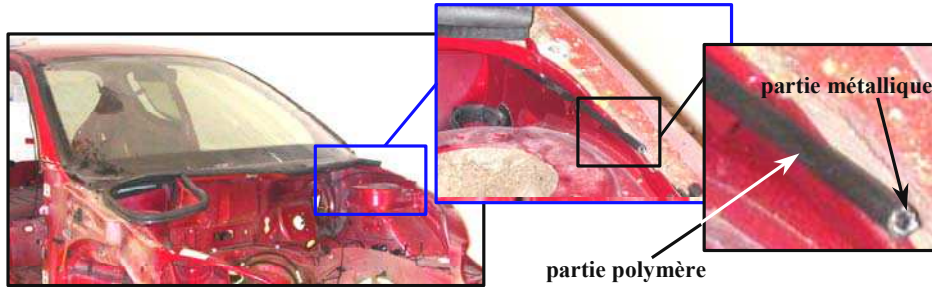


Figure 3.11. Gaine flexible de Peugeot 206.

Longueur l , mm	Diamètre extérieur d_{ext} , mm	Diamètre intérieur d_{int} , mm	Moment quadratique de la section I_z , mm ⁴
225	5,15	2,9	31,06

Tableau 3.1. Caractéristiques géométriques de la gaine flexible.

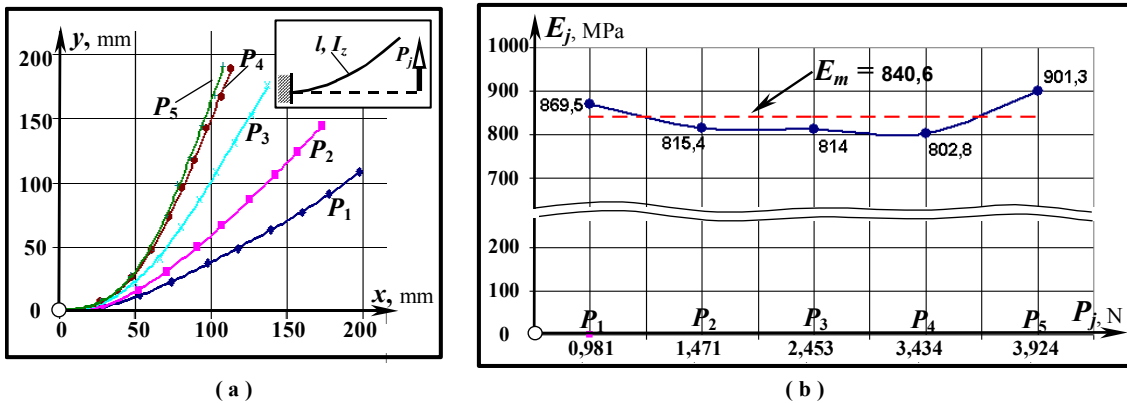


Figure 3.12. Estimation d'un module d'Young de la gaine flexible (Figure 3.11) :

(a) formes déformées de la gaine mesurées sous différentes charges P_j ;

(b) module d'Young déterminé par la méthode de minimisation (équation (3.11)) : $E_j = f(P_j)$.

La Figure 3.12b montre que le module d'Young équivalent, déterminé pour une pièce donnée dans les conditions données, i.e. CLs, seuil de charge plane fixé, banc d'essai et dispositifs de mesure (Figure 3.9b), est quasi constant : sa variation par rapport à la valeur moyenne du module d'Young $E_m = 840,6$ MPa est assez faible, avec une variation relative maximale $\zeta_{max} = 7,2\%$ selon (3.13) :

$$\zeta_{max} = \frac{\max\{\|E_m - E_j\|\}}{E_m} \cdot 100\% . \quad (3.13)$$

Donc, dans le cas présent, l'hypothèse de module d'Young constant de la gaine flexible soumise à des grands déplacements est acceptable. Ainsi, la caractéristique du matériau, i.e. module

d'Young équivalent constant E_m , évalué par la méthode proposée, peut être utilisée dans la simulation des opérations d'A/D virtuelles de cette gaine. Par ailleurs, si la variation du module d'Young s'avère importante pour différentes charges P_j , l'hypothèse relative à un module d'Young constant n'est plus applicable. Cela signifie qu'il est nécessaire d'utiliser une autre approximation pour la loi de comportement, par exemple, une fonction linéaire par morceaux (Figure 3.8c).

3.4.3. Aspects d'intégration des lois de comportement

Un autre aspect important dans la simulation du comportement de pièces déformables est l'intégration des lois de comportement et, notamment, le problème de leur exploitation lors de la simulation virtuelle. D'une part, le choix de telle ou telle loi de comportement dépend d'un modèle mécanique sélectionné. Ceci revient en effet à la question de compatibilité entre le modèle physique à exploiter ou, autrement dit, des hypothèses mises en œuvre dans ce modèle, et la loi de comportement du matériau de la pièce déformable. Par exemple, dans le cas de simulation du comportement de pièces flexibles soumises à des grands déplacements, il est important de savoir si le modèle mécanique choisi, admet affectivement la simulation de comportement dans le domaine des grandes déformations. Ce type d'information permet d'éviter des simulations inadéquates pour l'analyse de la déformation de la pièce au cours de sa manipulation virtuelle. D'autre part, il serait indispensable de contrôler un certain nombre de paramètres supplémentaires lors de la simulation virtuelle s'il s'avère que le modèle mécanique n'est pas compatible avec la loi de comportement du matériau donné ou pourrait être éventuellement adapté à la loi exigée.

En effet, la plupart des modèles mécaniques utilisés actuellement pour la simulation de comportement de pièces déformables considère un comportement élastique linéaire, i.e. le matériau suit la loi de Hooke (équation (3.2), Figure 3.5). Cependant, le comportement physique réel de mono- ou multi-matériaux à caractère flexible, travaillant dans le domaine de petites ou grandes déformations, peuvent être considérablement différent de celui suivant la loi de Hooke. Dans ce cas, une question importante est l'adaptabilité du modèle mécanique, valable pour une loi de comportement donnée, vis-à-vis de différents modèles de comportement. Par exemple, dans le cas de simulation de comportement de pièces flexibles modélisées à l'aide d'une poutre flexible, soumise à des grands déplacements, le modèle de comportement mis en œuvre est celui d'un matériau élastique linéaire travaillant dans la zone des petites déformations. Cependant, si le matériau d'une pièce flexible donnée reste dans le domaine des petites déformations au cours d'une manipulation virtuelle, mais que sa loi de comportement ne peut être approximée linéairement, le modèle mécanique d'une telle poutre flexible pourrait être utilisé sous réserve d'absence de décharge au cours de la manipulation et de variation faible du chargement afin d'éviter le problème de prise en compte des déformations résiduelles. Dans ce cas, le modèle mécanique de poutre flexible ne peut être utilisé que « localement » pour une zone restreinte de la loi de comportement, approximée linéairement par morceaux (Figure 3.8c).

L'utilisation « locale » du modèle mécanique considéré de poutre flexible consiste en effet à considérer un comportement localement linéaire du matériau compte tenu d'une loi de comportement $\sigma = f(\epsilon)$, établie expérimentalement. Par exemple, chaque segment i d'une loi de comportement approximée par morceaux (Figure 3.13a) peut être considéré comme une loi localement linéaire avec son module d'Young correspondant E_i . Chaque module E_i définit une zone particulière de travail du matériau en ce qui concerne les déformations dans la pièce flexible. Chacune de ces zones est limitée par une valeur de la déformation $\epsilon_{tr,i}$ caractérisant la transition d'une zone localement linéaire l'autre. Ainsi, toute transition à une autre zone voisine est déterminée par le changement d'un module d'Young, constant dans cette nouvelle zone et requis par le modèle mécanique continu de poutre flexible, déjà considéré en partie dans ce chapitre. Selon le diagramme $\sigma = f(\epsilon)$ représenté à la Figure 3.13a, une contrainte de transition $\sigma_{tr,i}$ est associée à sa déformation respective $\epsilon_{tr,i}$, définissant le point de transition d'une zone de petite déformation à une autre. Ainsi, en connaissant la déformation ou la contrainte correspondant à cette déformation lors de la manipulation d'une pièce flexible, il est possible de déterminer un module d'Young en fonction d'une zone de déformation. Cela signifie qu'il est nécessaire de contrôler les déformations ou les contraintes équivalentes dans la pièce flexible lors de sa manipulation virtuelle.

La Figure 3.13b représente un exemple de deux types d'identification d'un module d'Young constant, correspondant à deux types de contrôle : le contrôle des déformations et celui des contraintes dans la pièce manipulée. Ceci est important lorsque le modèle mécanique utilisé n'est valable que pour un matériau physiquement linéaire, caractérisé par un module d'Young constant. Alors, durant la simulation de comportement d'une pièce flexible dont la loi de comportement peut être approximée par un ensemble des segments (Figure 3.13), il est indispensable de savoir quelle est la valeur adéquate du module d'Young et à quel moment le choix d'un nouveau module est nécessaire afin d'assurer la simulation rapide et physiquement correcte de la pièce flexible. Une solution possible est donc le contrôle des déformations ou des contraintes dans la pièce au cours de sa manipulation virtuelle, afin de déterminer la limite d'utilisation d'une loi de comportement linéaire. La mise en place d'un tel contrôle est réalisée en fonction des capacités du modèle mécanique utilisé, i.e. si le modèle est capable de fournir une information relative à l'estimation des déformations ou/et à l'état de contrainte dans la pièce déformée. Par conséquent, en connaissant la contrainte dans la pièce flexible σ_l ou la déformation ε_k , il est possible :

- d'identifier une zone de travail du matériau, par exemple, une zone localement linéaire, comprise entre de points $(\varepsilon_{tr1}, \sigma_{tr1})$ et $(\varepsilon_{tr2}, \sigma_{tr2})$, correspondant à un segment d'une loi de comportement donnée (Figure 3.13b),
- de déterminer le module d'Young tangent, constant E_i en fonction de la zone de travail identifiée. Par exemple, dans le domaine défini par les points $(\varepsilon_{tr1}, \sigma_{tr1})$ et $(\varepsilon_{tr2}, \sigma_{tr2})$, le module d'Young recherché est E_2 , trouvé grâce à l'évaluation d'une contrainte maximale équivalente σ_l (Figure 3.13b). Ce module sera ainsi utilisé par le modèle mécanique, par exemple, le modèle de poutre flexible, dans cette zone du diagramme $\sigma = f(\varepsilon)$ lors de l'itération suivante durant la manipulation virtuelle, i.e. lors de la génération d'une nouvelle forme déformée de la poutre flexible.

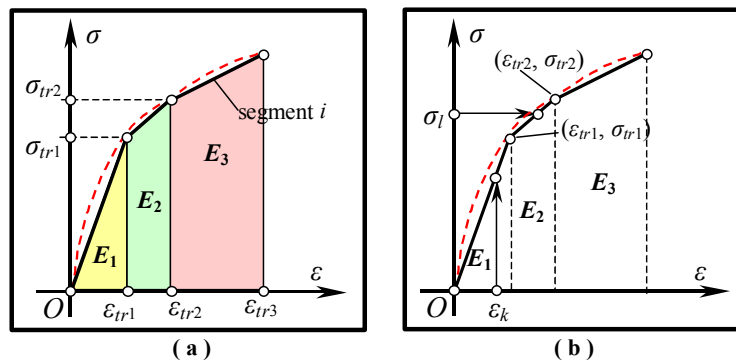


Figure 3.13. Intégration d'une loi de comportement dans le cas de l'utilisation du modèle mécanique de poutres flexibles : (a) choix d'un module d'Young en fonction des déformations ; (b) identification d'un module d'Young par contrôle des contraintes et des déformations.

On peut également remarquer qu'un tel contrôle permet d'affecter rapidement le module d'Young lors d'une simulation virtuelle, ce qui est important pour toute manipulation virtuelle.

3.5. Problèmes d'intégration de modèles CAO dans un environnement de RV

Afin de pouvoir étudier le comportement d'une pièce flexible durant une opération d'A/D ou de maintenance virtuelle, la présence d'un environnement extérieur, où la pièce flexible évolue réellement (par exemple, un mécanisme, un ensemble de pièces, etc.), est nécessaire. Cet environnement est souvent représenté par une maquette virtuelle à caractère statique, i.e. sans aucun changement de ses propriétés durant une manipulation virtuelle donnée (par exemple, sa forme géométrique reste « figée »). Ceci forme donc un certain nombre de contraintes pour la simulation efficace d'objets virtuels :

- les environnements virtuels 3D sont modélisés par un ensemble de facettes planes,
- les modèles pour l'environnement extérieur sont spécifiquement préparés afin d'éviter des problèmes de capacité mémoire, de temps de calcul, etc.

En effet, dans la pratique industrielle, les modèles initiaux servant à la modélisation virtuelle, i.e. la création d'un environnement extérieur, sont souvent des modèles CAO représentatifs d'une base de conception ou bien une *maquette numérique* d'un produit. L'utilisation de tels modèles est particulièrement intéressante dans le contexte de l'ingénierie concurrente, car ceci permet de réduire considérablement le temps de préparation de données pour la simulation virtuelle en se basant sur des données existantes et finalement, de diminuer le temps global de développement du produit. Cependant, comme nous l'avons vu précédemment dans le cas de la modélisation adaptée de pièces flexibles pour la simulation virtuelle, la création d'un environnement extérieur et notamment, d'un environnement dans lequel le comportement d'une pièce flexible donnée sera modélisé et analysé, est également liée à des besoins spécifiques. Il existe à ce jour un certain nombre de travaux consacrés à cette problématique [Gu & al. 2001], [Véron & al. 2001], [Armstrong & al. 2002], [Baxter & al. 2002], [Paillot & al. 2002], [Drieux & al./1 2003], [Père & al. 2003]. Nous allons discuter ici un certain nombre de problèmes d'intégration des modèles CAO dans un environnement de RV et évoquer brièvement des solutions possibles en ce qui concerne la création d'un environnement virtuel extérieur à partir des données CAO existantes. Ces aspects forment également une partie de la méthodologie de simulation des opérations d'A/D virtuelles.

3.5.1. Structuration de données CAO pour la simulation virtuelle

Comme indiqué précédemment, il existe différents types de données d'entrée pour la simulation virtuelle et notamment, pour la simulation des opérations d'A/D de pièces déformables. Dans cette section, nous nous intéressons aux données externes provenant de la modélisation géométrique d'un produit. Ces données représentent généralement un modèle CAO du produit (ou une maquette numérique) issu d'étapes antérieures de conception. Toute simulation virtuelle commence par la définition d'un contexte et des objectifs de simulation, par exemple, la recherche de trajectoire optimale d'A/D d'une pièce rigide, la modélisation d'un comportement de pièce flexible, l'étude de l'accessibilité à une pièce donnée, etc. Ainsi, toute stratégie nécessite une adéquation des données initiales pour la simulation virtuelle en fonction des objectifs de la simulation (Figure 3.14).

Dans le cas de la simulation des opérations d'A/D de pièces flexibles, une telle adéquation suppose une identification des données d'entrée caractérisant une pièce flexible donnée (sa géométrie, le modèle pour la modélisation mécanique, etc.) ainsi que son environnement extérieur. Ces données sont principalement issues des données CAO. Pour la simulation d'un autre phénomène physique, une autre représentation sera nécessaire [MGIT 1998]. Ainsi, cette action forme le premier niveau d'intégration de données CAO dans un environnement de RV. Ce niveau comporte donc toute action permettant de distinguer les données d'entrée externes : identification, séparation des modèles ou des éléments des modèles CAO initiaux, représentant un produit complet (Figure 3.14).

Chaque modèle identifié pour un besoin donné (par exemple, la représentation de l'environnement extérieur, la manipulation d'une pièce virtuelle rigide, la modélisation d'un phénomène physique, etc.) a besoin d'une analyse concernant sa capacité à être intégré dans un environnement de RV. En réalité, il est souvent difficile voire impossible d'intégrer directement des modèles correctement structurés dans un environnement de RV, car il est nécessaire tenir compte :

- des contraintes de la simulation virtuelle comme la taille mémoire de l'ordinateur, le temps de calcul de la scène virtuelle, etc.,
- des particularités de simulation d'une tâche, d'un phénomène physique, etc.

Ces difficultés conduisent alors à une préparation spécifique de chaque catégorie de données CAO. Par exemple, la simulation réaliste du comportement de pièces flexibles nécessite l'adéquation entre le modèle CAO d'une pièce flexible donnée et son modèle mécanique. L'incohérence entre ces modèles ainsi que la contrainte de visualisation sous forme facettisée durant la simulation virtuelle mènent à l'adaptation du modèle CAO transféré ou à l'élaboration d'un autre modèle pour la

simulation virtuelle. D'autres exemples de création de modèles adaptés pour la simulation ou/et la visualisation des résultats sont donnés dans [Véron & al. 2001], [Lovinfosse & al. 2002], [Drieux & al./2 2003]. En ce qui concerne la préparation de données en vue de la modélisation d'un environnement extérieur pour l'A/D, un certain nombre d'aspects liés à ce problème sont discutés dans la partie suivante. Ainsi, un autre niveau de la différenciation de modèles spécifiques pour leur intégration dans un environnement de RV est celui du pré-traitement ou de préparation de données (Figure 3.14).

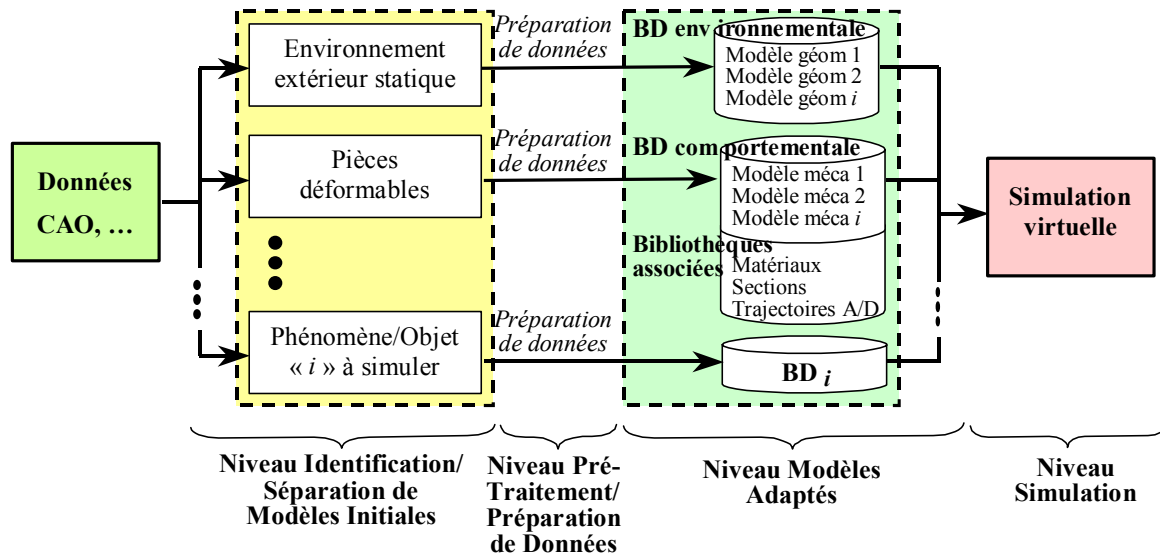


Figure 3.14. Structuration de modèles CAO pour leur intégration dans un environnement de RV.

A l'issue de cette étape, des modèles adaptés pour une simulation virtuelle donnée sont générés. Ces modèles peuvent être ensuite stockés dans différentes bases de données. Par exemple, des modèles géométriques adaptés, comme des modèles géométriques simplifiés pour la simulation d'un comportement d'une structure complexe [Lovinfosse & al. 2002], [Père & al. 2003], les revues de projet [Paillot & al. 2002], etc. sont sauvegardés dans des bases de données particulières. En ce qui concerne les modèles pour la simulation d'un environnement extérieur d'opérations d'A/D virtuelles, ils peuvent être en effet nombreux et très différents. Par exemple, une opération d'assemblage et de maintenance pour une séquence d'A/D définie nécessite la création de différents environnements extérieurs, qui évoluent en fonction de la progression d'un processus d'assemblage. Pour une autre séquence d'A/D, les environnements extérieurs sont distincts pour chaque pièce à manipuler, ce qui entraîne la génération d'autres modèles géométriques. Par ailleurs, leur description géométrique peut être considérable et simplifiée en raison de contraintes de temps de calcul. Cependant, la simulation et l'analyse fines d'un comportement de pièce flexible nécessitent une description localement plus détaillée de son environnement extérieur. De plus, en fonction de l'opération à étudier, la simulation peut nécessiter la présentation du produit complet ou bien seulement d'une partie du produit concerné. Ceci signifie que pour la simulation d'opérations d'A/D de nature différente, divers modèles d'environnement extérieur sont également requis. Les modèles géométriques adaptés sont stockés dans une base de données *environnementale* (Figure 3.14).

Concernant les modèles pour la simulation de comportement physique de pièces flexibles, les modèles adaptés à la modélisation mécanique peuvent être aussi stockés dans une base de données appelée *comportementale*. De plus, à chaque modèle mécanique il est possible d'associer des bibliothèques particulières, comprenant une information liée à ce modèle mécanique et à sa description géométrique sauvegardée dans la base de données. Par exemple, de telles bibliothèques peuvent inclure une information comme le matériau, la section d'une pièce flexible, la loi de comportement, les trajectoires d'A/D déjà validées, etc. Globalement, la création et le stockage de données adaptées à la simulation virtuelle forment ainsi le niveau des modèles adaptés (Figure 3.14).

Le dernier niveau est la simulation virtuelle elle-même, basée donc sur les modèles adaptés. Comme nous l'avons vu précédemment, la simulation d'un comportement de pièces déformables

commence, par exemple, par la représentation d'un environnement extérieur chargé d'une base de donnée environnementale et la définition des paramètres internes de la pièce à manipuler ainsi que de son modèle mécanique, choisi parmi les modèles disponibles dans la base de données comportementale ou créé lors de la préparation de données pour cette simulation virtuelle.

3.5.2. Préparation de données pour la modélisation de l'environnement extérieur

L'environnement extérieur d'une pièce à manipuler est modélisé à partir d'un modèle CAO d'un produit auquel on a soustrait le modèle de la pièce en question. En fonction d'un objectif de simulation, l'environnement extérieur peut représenter le produit complet avec/sans des simplifications ou bien un domaine particulier bien détaillé du produit. Dans tous les cas, le modèle CAO initial (maquette numérique) sera converti en *maquette virtuelle* ou DMU (Digital Mock-Up) avec certaines modifications au cours de la préparation de données.

La première cause de ces modifications est sans doute la conversion de la maquette numérique en modèle facettisé, i.e. adapté à la simulation dans un environnement de RV. Cette conversion est essentiellement liée aux contraintes des cartes graphiques [Fuchs & al. 2001]. Dans la plupart des cas, c'est le langage VRML (Virtual Reality Modeling Language), standard aujourd'hui, qui est couramment utilisé afin de pouvoir représenter n'importe quel modèle géométrique 3D sous la forme d'un ensemble de facettes planes (en général des triangles). Ce type de modèle permet de visualiser des scènes virtuelles 3D en temps réel, de détecter des collisions avec des obstacles tout en étant intéressant pour les calculs de structures lorsqu'il est adapté à la MEF. En effet, le niveau de facettisation (ou discrétisation) est souvent variable en fonction d'une précision souhaitée pour la visualisation. Ainsi, en fixant un certain facteur de discrétisation, la géométrie initiale d'un objet 3D est représentée sous la forme appropriée, compatible avec celle requise pour la simulation temps réel dans un environnement de RV.

Par ailleurs, une telle représentation facettisée peut être aussi une source d'« allègement » de la maquette virtuelle en terme de taille de modèle et donc, d'exploitation encore plus efficace au niveau du temps de calcul. Cependant, l'allègement de maquette virtuelle ne signifie pas forcément la simplification de modèle. En effet, la simplification suppose souvent la suppression de certains détails géométriques du modèle assez « lourds » en terme de taille du modèle et inutiles pour des manipulations virtuelles. Toutefois, la simplification excessive de modèles peut conduire à des erreurs de simulation, par exemple, la non-identification d'une collision réellement existante, mais impossible à détecter à cause d'une géométrie trop simplifiée. En revanche, l'allègement conduit surtout à un modèle ayant une géométrie généralement quasiment identique au modèle initial, mais avec une triangulation différente, due à un remaillage du modèle en vue de diminuer le nombre de triangles, par exemple. Toutefois, on combine souvent le remaillage du modèle avec la suppression d'un certain nombre d'éléments « encombrant » en terme de taille du modèle. En particulier, la suppression de petits trous mène fréquemment à un allègement considérable de maquette virtuelle [Fine 2001], [Fine & al. 2002], [Lovinfosse & al. 2002].

Néanmoins, il est souvent difficile de transformer directement la maquette numérique initiale en maquette virtuelle facettisée. En réalité, de nombreux défauts sont présents dans le modèle CAO initial : problème de connexion des carreaux pour des modèles surfaciques générant des discontinuités dans des modèles polyédriques, problème dans la structure de données après transformation en modèle polyédrique (nœuds non-reliés, existence de nœuds ou arêtes doubles, etc. [Fine 2001]). De plus, les maquettes numériques d'un produit industriel complet sont couramment très volumineuses, ce qui est un facteur très important pour la simulation virtuelle temps réel. Donc, la création et le pré-traitement spécifique d'un modèle numérique intermédiaire, représenté sous une forme polyédrique, visent à contourner certaines difficultés rencontrées durant le processus de génération de maquette virtuelle : défauts du modèle CAO initial, allègement et simplification de la maquette numérique, etc. Ces opérations constituent ainsi d'autres types de modifications du modèle numérique initial au cours du processus de préparation de données.

En ce qui concerne les méthodes de simplification de modèles, elles sont couramment basées sur un processus piloté par un facteur fixé préalablement : taux de réduction du nombre de facettes ou enveloppe bornant les variations de forme. Par ailleurs, il est également possible d'introduire une notion de niveau de détails [Eck & al. 1995], [Hoppe 1996], [Ronfard & al. 1996]. Une approche

intéressante permettant de réaliser une simplification non-uniforme de tout le modèle est développée au sein du laboratoire 3S de Grenoble [Véron & al. 2001], [Fine 2001]. Cette approche est basée sur un critère d'un écart géométrique et permet de simplifier le modèle en terme de triangulation adaptée, allégeant considérablement le modèle tout en préservant une bonne qualité (précision géométrique) globale de ce modèle.

Un autre type de simplification possible au cours de la préparation de données est la suppression de différents éléments jugés inutiles pour la simulation virtuelle. Cette procédure comprend la suppression tant des petits éléments, comme les trous, les nervures, etc., que des éléments cachés ou se trouvant à l'intérieur d'un objet virtuel, constituant par exemple l'environnement extérieur pour une pièce à manipuler. De plus, il est également possible d'extraire une partie détaillée du modèle CAO initial, qui n'est utile que pour une étude fine d'une manipulation virtuelle dans une zone définie localement qui représente par exemple un environnement extérieur pour une pièce flexible. Dans ce cas, il n'est pas raisonnable d'utiliser le modèle complet du produit, mais uniquement un sous-ensemble représentant cette zone locale.

Ainsi, la préparation de données d'entrée pour la modélisation de l'environnement extérieur d'une pièce dans un environnement de RV et, en particulier, dans un système de simulation d'opérations d'A/D ou de maintenance virtuelles comprend généralement les étapes suivantes, adaptées en fonction de l'objectif de la simulation :

1. L'identification/séparation d'un modèle CAO (maquette numérique) qui va servir de base pour la modélisation d'un environnement virtuel extérieur (maquette virtuelle adaptée).
2. La transformation de la maquette numérique en modèle polyédrique, permettant d'identifier et de corriger des défauts de construction de la maquette numérique initiale.
3. La correction, l'allégement, la simplification du modèle intermédiaire polyédrique. A l'issue de cette étape, la maquette numérique adaptée aux simulations virtuelles en temps réel est générée.
4. La génération d'une maquette virtuelle à partir de la maquette numérique adaptée par l'intermédiaire d'un convertisseur de RV donné (par exemple, le langage VRML).
5. L'enregistrement de la maquette virtuelle dans la base de données environnementale. Cette maquette adaptée représente désormais un environnement virtuel extérieur pour une pièce donnée à manipuler, valable pour la séquence d'A/D correspondante.

3.6. Conclusions

Ce chapitre a présenté une méthodologie de simulation des opérations d'A/D et de maintenance virtuelles compte tenu de différents modes d'analyse des opérations ainsi que des spécificités d'une modélisation réaliste de comportement de pièces déformables. Les particularités principales de la méthodologie proposée sont :

- l'adaptation de cette méthodologie aux simulations virtuelles grâce à différents éléments parmi lesquels les principaux sont :
 - l'utilisation d'interfaces comportementales de RV,
 - l'intégration/préparation de modèles issus de la CAO,
 - l'utilisation de métaphores d'interactions adaptées, décrivant certaines données d'entrée/sortie dans les espaces des efforts et des configurations,
 - l'intégration et l'interaction de différents modèles mécaniques de pièces déformables,
- différents niveaux d'analyse des manipulations virtuelles de pièces déformables basés sur une architecture particulière de module de simulation de ces pièces avec :
 - la simulation d'un comportement de pièces déformables à deux niveaux à partir de l'interaction et/ou le recalage de deux types de modèles généraux : le MTR (Modèle Temps Réel) et le MMI (Modèle Mécanique Interactif),

- le contrôle de paramètres complémentaires, liés au comportement de pièces déformables, en fonction du niveau d'analyse d'une simulation donnée,
- la définition de paramètres de pièces flexibles afin de pouvoir générer une déformation plus réaliste, i.e. des paramètres :
 - liés au modèle mécanique choisi : CLs géométriques et mécaniques, géométrie et l'état initial de la pièce flexible, etc.,
 - caractérisant le comportement physique d'un matériau utilisé,
- l'intégration de cette méthodologie dans la démarche globale de développement d'un produit :
 - l'interaction forte avec la CAO : utilisation de modèles CAO issus des phases antérieures de conception, modification des modèles durant la manipulation virtuelle, etc.,
 - l'étude, l'analyse, l'évolution d'un produit en fonction des résultats de simulation : évolution locale de l'environnement d'une pièce manipulée, modification des paramètres géométriques/matériau de cette pièce, etc.,
 - l'optimisation du processus d'assemblage, de maintenance, etc. compte tenu des critères d'accessibilité, d'assemblabilité, d'ergonomie, des critères mécaniques et technologiques vis-à-vis du comportement mécanique de pièces déformables ; la recherche de trajectoires d'A/D, etc.

La première question concernant la méthodologie proposée est la nécessité de développer des liens entre la CAO et la simulation virtuelle, en particulier, l'étude des opérations d'A/D virtuelles d'un produit donné. En effet, cette étude peut être rattachée à des données de conception du produit déjà disponibles, notamment, au modèle numérique de ce produit. Ceci simplifie fortement le processus de préparation de différentes données, par exemple, la modélisation de l'environnement extérieur de la pièce à manipuler. Cependant, ce processus n'est pas un transfert direct de données à cause de différents problèmes, comme les défauts de construction du modèle CAO du produit ou les contraintes de simulation temps réel nécessitant la représentation de tout objet virtuel sous la forme d'un modèle facettisé ou encore l'objectif de simulation qui nécessite une forme adaptée du produit. Dans ce chapitre, nous avons donc discuté un certain nombre de ces problèmes faisant partie de la méthodologie de simulation des opérations d'A/D virtuelles.

Il est important de souligner que des liens entre la conception du produit, la CAO et les simulations virtuelles ne se réduisent pas à ces échanges de données unidirectionnels, i.e. l'utilisation d'une maquette numérique d'un produit pour une phase de développement donnée. En effet, nous avons également signalé un retour d'information durant l'étude, l'analyse des opérations d'A/D. Notamment, il est possible d'avoir un retour d'information lié à des modifications locales de l'environnement extérieur de la pièce manipulée à partir des actions de l'opérateur (trajectoires d'A/D libres de collisions, minimisation des efforts à développer, divers problèmes d'assemblabilité, etc.), du contrôle des paramètres ou des variables de conception (géométrie déformée de la pièce flexible, état de contrainte, etc.), des modifications dans la séquence d'A/D, etc. Ce retour d'information forme ainsi une boucle de conception, ce qui peut donc entraîner des modifications du produit. Par conséquent, il est nécessaire de pouvoir effectuer ces modifications sur la maquette numérique ou mieux, sur la maquette virtuelle sans passer par la régénération d'un modèle CAO et d'un modèle intermédiaire polyédrique, la simplification de ce dernier et la régénération d'une nouvelle maquette virtuelle adaptée. Il est donc souhaitable de réaliser toutes les modifications nécessaires de l'environnement virtuel extérieur, de la géométrie de la pièce manipulée, etc. directement sur les modèles virtuels avec la mise en jour automatique des modèles CAO initiaux à la fin de l'étude/optimisation du produit faite dans un environnement de RV.

Il convient également de noter que la méthodologie proposée est facilement utilisable dans la simulation du comportement de pièces déformables à l'aide des environnements actuels de RV. En effet, la structure modulaire de ces systèmes permet d'intégrer un module de simulation de pièces déformables dont une architecture a été également discutée dans le présent chapitre. Cette architecture est basée sur l'interaction/recalage des modèles MTR/MMI, exploitables selon un niveau requis de modélisation (rapide et peu précis, détaillé, réaliste mais moins rapide), et tient compte de la contrainte

de temps de réponse pour la génération de déformation de pièces ainsi que l'évolution des paramètres supplémentaires, comme les efforts réalistes requis, la courbure de la pièce déformée, l'état de contrainte dans la pièce, etc. Dans le cas de simulation détaillée et réaliste, ce qui est particulièrement important pour l'analyse des opérations d'A/D, de maintenance, pour la justification des modifications possibles d'un produit, etc., l'interaction de modèles MMI et MTR est nécessaire afin de pouvoir produire une simulation en temps réel.

L'intégration des modèles mécaniques adaptés de pièces déformables, i.e. suffisamment rapides pour être utilisables dans le contexte de simulation virtuelle, suppose la définition minutieuse des données d'entrée dont le nombre et le caractère sont variables selon le modèle mécanique sélectionné. Ceci est un facteur important : les données d'entrée influent directement sur la qualité de simulation du comportement de la pièce déformable ! En particulier, il est nécessaire de faire un bon choix pour :

- les interfaces motrices/sensori-motrices de RV, i.e. la simulation dans les espaces des efforts ou des configurations, compte tenu des avantages et des inconvénients de réalisation ces dispositifs fournissant les CLs géométriques/mécaniques,
- les hypothèses liées à la définition des caractéristiques du matériau de la pièce virtuelle déformable à manipuler.

Les impacts d'un choix des interfaces de RV sur la qualité de simulation du comportement de pièces flexibles sont discutés au chapitre 2. En ce qui concerne la définition des caractéristiques du matériau, cet aspect est lié, d'une part, à la modélisation mécanique du comportement de pièces, ce qui doit être pris en considération lors du choix du modèle mécanique (par exemple, le matériau homogène et isotrope, soumis à des petites ou des grandes déformations,...), et d'autre part, à la détermination de ses caractéristiques. Les paramètres de la pièce déformable, caractérisant les propriétés du matériau, sont :

- fixés à partir des abaques ou des bases de données si les propriétés du matériau sont connues,
- déterminés expérimentalement à partir de l'établissement et de l'approximation d'une loi de comportement du matériau si ces propriétés sont inconnues.

La caractérisation des propriétés d'un matériau inconnu nécessite donc la mise en place d'une série des tests expérimentaux afin d'établir une loi de comportement de ce matériau. Nous avons également proposé dans ce chapitre une méthode de détermination rapide et peu onéreuse des caractéristiques d'un matériau de pièces flexibles de type poutres flexibles soumises à des grands déplacements en flexion, ce qui est souvent le cas durant les opérations d'A/D de pièces de type poutres. Le modèle mécanique utilisé ainsi que des aspects numériques de mise en place de ce modèle seront discutés dans les chapitres 4 et 5. Cependant, il convient de souligner que la détermination expérimentale des caractéristiques du matériau et, en particulier, d'un module d'Young constant pour un mono-matériau et de module constant équivalent pour un multi-matériaux, comprend un traitement numérique basé sur un modèle continu de poutres flexibles soumises à des grands déplacements dans le domaine des petites déformations.

En effet, l'approximation de la loi de comportement est un facteur important définissant les hypothèses à mettre œuvre pour le comportement du matériau et influençant directement la qualité, le réalisme de la simulation rapide de pièces déformables. Les aspects d'intégration de lois de comportement linéaires et non-linéaires, mais approximées linéairement dans le domaine des petites déformations, sont discutés dans ce chapitre, car il semble important d'utiliser l'approximation linéaire de la loi de comportement d'un matériau, qui en réalité ne suit pas la loi de Hooke, dans le cas des simulations virtuelles de pièces flexibles soumises à des grands déplacements. Toute simulation virtuelle doit être extrêmement rapide, alors l'approximation linéaire globalement ou localement de la loi de comportement est particulièrement adaptée aux simulations en temps réel. Toutefois, l'hypothèse de petites déformations est conservée, et le choix d'un modèle mécanique doit donc tenir compte de cet aspect.

Chapitre 4
Modèle mécanique de pièces flexibles
de type « poutres flexibles »

Table des matières

4.1. Introduction	138
4.2. Poutres flexibles : définitions et hypothèses	139
4.2.1. Principales définitions	139
4.2.2. Comportement du matériau	140
4.2.3. Cas de manipulation	140
4.2.4. Modélisation des conditions aux limites	142
4.3. Partie géométrique du modèle : non-linéarité géométrique	144
4.3.1. Généralités	144
4.3.2. Transformation de coordonnées	145
4.3.2.1. Matrices de rotation	145
4.3.2.2. Angles d'Euler	146
4.3.3. Coordonnées de la ligne moyenne de la poutre	147
4.3.4. Orientation de la ligne moyenne de la poutre	148
4.3.4.1. Dérivée des vecteurs du repère local par rapport au paramètre s	148
4.3.4.2. Lien entre le repère local et celui de Frenet	149
4.3.4.3. Détermination des angles de rotation	150
4.4. Partie physique du modèle : équations d'équilibre	151
4.4.1. Equations d'équilibre	152
4.4.2. Vecteur des forces internes dans le repère local	153
4.4.3. Vecteur des moments internes dans le repère local	154
4.5. Vecteur d'état de la pièce flexible	154
4.5.1. Lien entre les moments internes et la courbure/torsion	154
4.5.2. Vecteur d'état d'une poutre flexible	155
4.5.3. Adimensionnement des équations	155
4.5.4. Adaptation du modèle mécanique à la manipulation virtuelle	158
4.6. Conclusions	160

4.1. Introduction

Dans la construction mécanique (l'industrie automobile, aéronautique,...), les dispositifs de mesure, etc. on trouve fréquemment divers composants flexibles, se déformant fortement au cours de leur exploitation. Parmi ces éléments flexibles, les plus couramment utilisés sont ceux ayant une forme de poutre (ou tige) avec une géométrie déformée en 2D ou 3D souvent complexe : tubes, durits et faisceaux de câbles dans les véhicules ou les avions, axes flexibles dans les mécanismes de transmission souples, ressorts dans les dispositifs de mesure, etc. Le calcul de telles structures souples se réduit souvent à une modélisation de leur comportement lors de l'exploitation dans les conditions données : déformation caractérisée par des grands déplacements géométriquement non-linéaires sous une charge de nature complexe, i.e. efforts avec une intensité et une direction variables, prise en considération des effets aérodynamiques ou déformation sous l'action d'un fluide à l'intérieur d'un tube flexible, etc. [Svetlitsky/1 1987], [Svetlitsky 2000]. Le but de ces modélisations est :

- de connaître le comportement de la poutre flexible sous l'effet d'une action mécanique : comportement en statique et dynamique, stabilité de la poutre,
- d'étudier la déformation de cette pièce soumise à des grands déplacements 2D ou 3D,
- d'analyser la résistance de la poutre flexible.

Ainsi, le calcul de poutres flexibles consiste à modéliser un comportement de la structure dans des conditions d'exploitation. Les modèles mécaniques, utilisés couramment dans ce type d'analyse sont des modèles continus, basés sur des équations différentielles d'équilibre d'un modèle poutre, ou ceux élaborés en utilisant la MEF (voir le chapitre 2). Cependant, il est également nécessaire de pouvoir étudier le comportement de telles pièces flexibles avant leur travail effectif, i.e. leurs déformation et résistance lors d'une opération de montage ou d'entretien, l'état de contrainte au moment du montage de ces pièces qui définit leur état pré-contraint ainsi que la géométrie initiale avant leur exploitation, etc. Par conséquent, ces facteurs ont une influence sur le comportement de pièces flexibles pendant leur exploitation, et la non intégration de ces phénomènes dans les calculs évoqués ci-dessus peut provoquer des erreurs de conception. De plus, l'étude de l'assemblabilité, l'analyse de l'accessibilité, la prise en compte des contraintes ergonomiques, etc. sont nécessaires pour l'industrialisation : optimisation des séquences d'A/D ou des opérations délicates d'A/D ou de maintenance, prise en compte d'un facteur humain (fatigue), réduction du temps d'assemblage et d'entretien.

Dans les parties suivantes du mémoire nous nous intéressons plus aux aspects de modélisation mécanique et numérique ainsi qu'à l'étude et à l'analyse d'un comportement de poutres (tiges) flexibles pour la simulation des opérations d'A/D et de maintenance virtuelles. Bien qu'une telle modélisation repose sur des méthodes et modèles mécaniques élaborés pour le calcul général des structures, elle est soumise à la contrainte de temps de réponse extrêmement rapide afin qu'elle soit applicable dans les simulations virtuelles. Ainsi, nous allons présenter dans ce chapitre un modèle mécanique continu décrivant le comportement de poutres flexibles soumises à des grands déplacements et travaillant dans le domaine des petites déformations [Svetlitsky/1 1987], [Antman 1995], [Svetlitsky 2000]. Ce modèle est particulièrement intéressant pour la simulation des opérations d'A/D virtuelles de pièces flexibles. D'une part, il décrit le comportement complexe des poutres soumises aux grands déplacements de façon réaliste sous un certain nombre d'hypothèses. D'autre part, il peut être adapté aux simulations dans un environnement de RV, compte tenu des contraintes de ces simulations, et utilisé dans les manipulations avec les interfaces comportementales de RV. L'étude et l'analyse d'un comportement de pièces flexibles de type poutre flexible pour l'assemblage virtuel seront basées sur ce modèle. Le lecteur trouvera des informations supplémentaires en ce qui concerne la théorie générale des poutres flexibles, des aspects de modélisation dynamique, l'étude de stabilité, etc. dans [Love 1944], [Landau & al. 1970], [Svetlitsky/2 1987], [Dill 1992], [Raboud & al. 2001].

Le chapitre commence par évoquer les principales définitions et hypothèses concernant le comportement du matériau des pièces flexibles modélisées par une poutre flexible, les cas de manipulation dans un environnement de RV ainsi que les chargements considérés par la suite dans le mémoire. Les parties physique et géométrique du modèle de poutres flexibles seront ensuite

présentées. Enfin, le modèle sera discuté en ce qui concerne son adaptabilité potentielle aux manipulations virtuelles.

4.2. Poutres flexibles : définitions et hypothèses

4.2.1. Principales définitions

Nous allons considérer le comportement mécanique de pièces flexibles de type poutres flexibles. Donnons une définition d'un tel type d'objet ainsi que différents éléments associés à sa description géométrique et au comportement des poutres. La *poutre* est un solide dont une grandeur géométrique caractéristique (longueur l de l'objet) est très importante par rapport à deux autres grandeurs géométriques caractéristiques (dimensions d_i de la section S) : $l \gg d_i, i = 1, 2$ (Figure 4.1.).

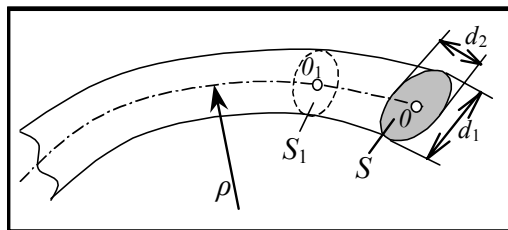


Figure 4.1. Principaux éléments d'une poutre flexible.

La ligne (ou fibre) moyenne de la poutre est la ligne passant par les centres de gravité O et O_1 des sections S et S_1 respectivement. Les sections S_i de la poutre peuvent être constantes ou variables (évolutives) en fonction de l'abscisse curviligne $s \in [0, l]$. Ainsi, la représentation géométrique de la poutre peut se résumer au balayage de la section suivant la ligne moyenne. Donc, on considère le comportement de cette ligne moyenne qui représente la « ligne flexible » et détermine le comportement de la poutre flexible.

En effet, on peut distinguer deux lignes moyennes caractéristiques :

- la ligne *naturelle* décrivant l'état initial de la poutre non chargée,
- la ligne *flexible* caractérisant la géométrie déformée de la poutre sollicitée.

La particularité des poutres flexibles est que la géométrie de la ligne moyenne flexible peut être très différente de celle naturelle. Ce fait nécessite donc la mise en œuvre de relations particulières, distinctes à celles de la résistance des matériaux, et permettant de décrire la forme déformée. Le cas considéré dans ce mémoire correspond au problème de grands déplacements géométriquement non-linéaires. Dans ce cas, le principe de superposition (ou d'indépendance des effets de forces) n'est plus valable : les déplacements de la pièce flexible ne sont plus considérés comme indépendants de l'ordre d'application des efforts extérieurs. Cela signifie que lors de l'application de plusieurs efforts sur une pièce flexible donnée, l'effet de tous ses efforts (déplacements provenant de chaque effort séparément) ne peut être obtenu comme la somme de ces efforts.

Afin de considérer le comportement de poutres flexibles, il convient également de compléter les définitions ci-dessus par les hypothèses géométriques suivantes :

- les dimensions de la section sont faibles devant le rayon de courbure ρ de la ligne moyenne (Figure 4.1) : $\rho \gg d_i$,
- il n'existe aucun allongement entre les sections voisines S_i de la poutre flexible, i.e. la longueur de la poutre l reste constante au cours de la déformation (hypothèse d'Euler) : $l = \text{const.}$

4.2.2. Comportement du matériau

Pour modéliser la déformation d'une poutre flexible, certaines hypothèses relatives au comportement de son matériau sont également utilisées [Svetlitsky/1 1987], [Svetlitsky 2000]. On admet que :

- les déformations dans la structure sont petites,
- le matériau utilisé travaille dans le domaine élastique approximé linéairement, i.e. le matériau suit la loi de Hooke au cours de sa déformation (voir la section 3.4.1),
- le matériau est homogène et isotrope,
- les sections S_i planes et normales à la ligne moyenne avant la déformation de la poutre flexible demeurent planes et normales à la ligne moyenne après sa déformation (hypothèse de Bernoulli).

4.2.3. Cas de manipulation

Afin de pouvoir caractériser des opérations d'A/D ou de maintenance de pièces flexibles, il convient de préciser pour quels types d'opérations virtuelles une modélisation donnée est applicable. Ceci nous permettra de justifier le choix des CLs à définir lors d'une simulation virtuelle d'A/D.

Tout d'abord, il est nécessaire de rappeler que les CLs requises lors de la simulation de la plupart des opérations d'A/D virtuelles sont de nature mécanique (forces et moments) et/ou géométrique (positions et orientations) en fonction des interfaces comportementales de RV utilisées. Ces CLs forment les données d'entrée pour la simulation mécanique d'un comportement de pièces flexibles et sont définies dans les deux espaces introduits à la section 2.2.4. Les CLs font donc partie du modèle mécanique utilisé pour présenter la déformation de pièces flexibles pour une manipulation donnée. L'ensemble de ces informations, i.e. choix d'un modèle mécanique et définition des CLs associées, doit être adéquat par rapport à la manipulation réelle. Donc, la structuration des différentes manipulations à simuler est indispensable afin de pouvoir déterminer des modélisations appropriées, qui peuvent être utilisées du point de vue mécanique. Proposons une distinction quantitative pour quelques manipulations les plus souvent réalisées lors des opérations d'assemblage ou de maintenance de ces pièces :

- manipulation à deux mains durant l'opération de montage d'un tube flexible, initialement libre, dans deux trous A et B (Figure 4.2a) ;
- manipulation à une/deux main(s) durant une opération de montage d'un tube flexible, dont une des extrémités est déjà assemblée, dans un trou B (Figure 4.2b) ;
- manipulation à une/deux main(s) d'un tube flexible durant une opération de montage/démontage d'un autre composant rigide/déformable C (Figure 4.2c).

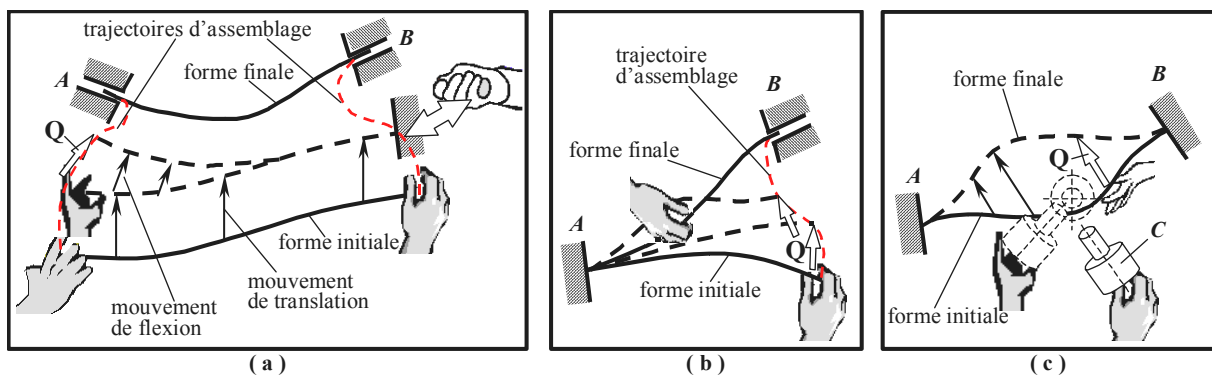


Figure 4.2. Exemples de manipulations d'un tube flexible et de modèles mécaniques associés pour la simulation des opérations d'assemblage ou de maintenance : (a) montage à deux mains d'un tube initialement libre, (b) montage à une/deux main(s) d'un tube dont une des extrémités est assemblée, (c) manipulation d'un tube lors du montage d'un composant C .

La première catégorie de manipulations caractéristiques de pièces flexibles est la plus générale (Figure 4.2a). Elle consiste en la préhension de la poutre flexible avec deux mains, la transmission de différents mouvements à la pièce flexible et sa mise en place à des emplacements fonctionnels donnés (par exemple, son insertion dans deux trous *A* et *B*). La particularité de cette catégorie de manipulation est le fait que la pièce flexible n'est pas assemblée initialement, i.e. il n'existe aucun contact entre la pièce à manipuler et le produit/sous-ensemble du produit au début de l'opération de montage. Au cours de la manipulation de la pièce, l'opérateur transmet à la pièce ses mouvements en générant une trajectoire d'assemblage pour chaque extrémité de la pièce. Du point de vue de la modélisation mécanique, une telle manipulation peut être représentée comme un ensemble de mouvements de corps rigides, de flexion, de torsion, ..., dans différentes zones de l'espace de travail :

- la manipulation de la pièce flexible dans une zone de travail éloignée du mécanisme où cette pièce sera mise en place, et libre d'obstacles dans l'espace. Ainsi, afin de simplifier une simulation virtuelle compte tenu de la contrainte de temps de réponse, la manipulation de la pièce flexible dans cette zone peut être représentée comme un ensemble de mouvements de corps solide sans la déformation de la pièce, i.e. la pièce est ainsi considérée comme une pièce rigide ;
- la manipulation de la pièce flexible dans une zone de travail proche d'obstacle. Maintenant, les mouvements supplémentaires de flexion et/ou de torsion sont donc nécessaires afin de pouvoir contourner ces obstacles et effectuer le montage de la pièce.

Afin de simplifier la modélisation mécanique des actions de l'opérateur, les mouvements de flexion transmis à la pièce flexible peuvent être représentés par exemple comme un ensemble de mouvements séquentiels d'une poutre flexible « encastrée » à un instant donné. L'encastrement est une modélisation mécanique de « fixation » d'une des extrémités de la poutre donnée, fortement tenue dans une main de l'opérateur (Figure 4.2a). Ainsi, des actions complexes de l'opérateur peuvent être décomposées en une manipulation à une main de la poutre flexible « partiellement assemblée » et soumise à des grands déplacements, ce qui représente la seconde catégorie de manipulations caractéristiques (Figure 4.2b).

La seconde catégorie de manipulations à une/deux main(s) peut représenter :

- un montage de la pièce flexible : l'insertion d'une extrémité libre dans un trou *B*, par exemple (Figure 4.2b),
- une manipulation de la pièce flexible afin de pouvoir accéder à une autre pièce ou à un ensemble mécanique disposé en retrait par rapport à cette pièce flexible,
- etc.

Dans tous les cas, la pièce flexible considérée est déjà partiellement assemblée. Ainsi, la déformation de la pièce flexible dont une des extrémités est déjà fixée peut être modélisée par exemple comme celle d'une poutre flexible encastrée (en fonction du type de fixation réalisée) et soumise à des grands déplacements.

La troisième catégorie de manipulations de pièces flexibles est celle qui regroupe des opérations d'A/D ou de maintenance d'autres composants rigides et nécessite la déformation de pièces flexibles, se trouvant à proximité ou dans la zone de mise en place de ces composants rigides. A titre d'exemple, une opération de maintenance typique peut être résumée au scénario suivant : un tube flexible installé dans un ensemble mécanique est déformé afin de permettre à l'opérateur d'avoir accès à une autre pièce, masquée par le tube, ou de réaliser un montage d'un composant (Figure 4.2c). Dans ce cas, si le tube flexible est fixé à ses deux extrémités (par exemple, il est encastré), le modèle mécanique de poutre flexible soumise à des grands déplacements, encastrée et déformée par l'opérateur, peut être utilisé pour évaluer la déformation du tube. Il est également possible de considérer le comportement de cette pièce en la divisant en deux parties, i.e. deux poutres encastrées à une seule extrémité, déformées par un effort équivalent et reliées par des conditions de continuité au point de raccordement de ces deux parties : les déplacements imposés ainsi que les angles de rotation de la section de raccordement des deux parties de la pièce sont égaux.

Ainsi, dans beaucoup de cas de manipulations de pièces flexibles de type poutres flexibles, il est possible d'utiliser un modèle mécanique de poutre flexible, encastrée à une/deux extrémité(s) et manipulée par une/deux main(s). Au choix de ce modèle les CLs géométriques et mécaniques

s'ajoutent également. Ces CLs sont déterminées, d'une part, au moment de la préparation de données et de choix d'un modèle (par exemple, le choix d'un type de fixation : encastrement,...) et d'autre part, fournies par les interfaces comportementales de RV lors de la manipulation d'une pièce virtuelle (par exemple, les déplacements imposés définissant la trajectoire d'A/D souhaitée ou les efforts développés à partir du travail musculaire de l'opérateur et appliqués à la pièce flexible).

4.2.4. Modélisation des conditions aux limites

Malgré l'apparente simplicité du problème de définition et d'application des CLs, l'information fournie par les interfaces comportementales de RV n'est pas toujours convenable car :

- certaines interfaces motrices technologiquement ne sont pas capables de produire les données dont on a besoin pour la définition des CLs,
- il est difficile de traduire l'action d'un être humain sur la pièce flexible, par exemple, la main représentée par un ensemble d'efforts adéquats, appliqués à la pièce et simulant ainsi une action d'un opérateur.

Le premier problème est caractéristique pour certaines interfaces motrices de contrôle en effort et en position. Les interfaces de contrôle en effort fournissent une information géométrique qui est la position d'un objet virtuel dans l'espace et, moins souvent, son orientation. Cette information est nécessaire pour déterminer par exemple la position d'une main virtuelle dont le repère est attaché à une des extrémités du tube virtuel flexible à manipuler. Ceci permet à son tour de définir une trajectoire d'A/D souhaitée. Cependant, l'information d'entrée définissant les CLs géométriques en terme de positions courantes de l'extrémité manipulée de la poutre flexible doit être précise, car le modèle géométriquement non-linéaire de poutres flexibles est sensible aux CLs géométriques difficilement réalisables en réalité. Toutefois, la définition des déplacements imposés (par exemple, la trajectoire d'A/D) lors d'une manipulation virtuelle de pièces flexibles ne signifie pas que l'orientation de la main de l'opérateur n'influe pas sur le résultat d'évaluation de la déformation de la pièce flexible. Par ailleurs, un exemple caractéristique du fait que les déplacements angulaires jouent un rôle important dans une telle modélisation mécanique est une évaluation de la déformation de pièces flexibles de type poutres flexibles soumises à des grands déplacements. Par exemple, l'orientation de la main tenant une extrémité d'une poutre flexible à manipuler définit les angles de rotation de la section extrême, associée au point d'application des efforts. Ces angles déterminent les directions d'application des forces et caractérisent les valeurs des moments de flexion et de torsion appliqués. Donc, les CLs en termes des déplacements angulaires doivent être également prises en compte lors d'une manipulation virtuelle de poutre flexible. Malheureusement, certaines interfaces de localisation spatiale, comme des systèmes optiques utilisant les LEDs, ne permettent pas de fournir directement une information concernant l'orientation d'une section manipulée d'un objet virtuel à caractère flexible. Ainsi, trois modes de définition des CLs angulaires sont distingués en fonction des caractéristiques technologiques de l'interface considérée :

- l'utilisation des interfaces motrices de RV capables de mesurer directement et en temps réel une information exacte concernant les CLs angulaires,
- le calcul exact/approximatif des angles de rotation de la section manipulée (CLs) en temps réel à partir des positions de la main mesurées par une interface de RV donnée,
- la détermination des angles de rotation constants/variables, imposés par l'opérateur avant une manipulation virtuelle, si l'interface motrice utilisée ne permet pas d'évaluer l'orientation de la section manipulée de la pièce virtuelle flexible.

En ce qui concerne l'utilisation des interfaces haptiques à retour d'effort pour le contrôle en position, certains de ces dispositifs ne permettent pas non plus de proposer toute la gamme des efforts que l'on peut développer physiquement lors d'une manipulation de pièce flexible réelle à cause de ses limites technologiques (incapacité à développer des moments, voir la section 2.2) et économique (coût de l'interface). En effet, il ne faut pas oublier que les opérations réelles d'A/D et de maintenance de pièces flexibles supposent également le développement de forces de flexion et de traction/compression ainsi que de moments de flexion et de torsion. Ainsi, il est nécessaire de prendre en compte ce fait en

choisissant une interface correspondante. Notamment, il est souhaitable d'employer des dispositifs munis d'un capteur d'efforts et permettant de mesurer l'orientation de la main. L'information concernant les forces développées réellement par l'utilisateur ainsi que les déplacements angulaires de la main permettent de déduire la direction et la valeur des forces à appliquer à la pièce virtuelle flexible afin de pouvoir générer une déformation de cette pièce de façon cohérente. La Figure 4.3 montre des exemples d'application des efforts de type :

- efforts-suiveurs qui suivent la trajectoire d'A/D avec une modification continue de sa direction d'application. Par exemple, l'angle entre la direction d'une force Q appliquée à l'extrémité d'une poutre flexible et sa ligne moyenne peut être conservé pour simplifier cette configuration (Figure 4.3a),
- efforts conservatifs qui maintiennent leur direction d'application suivant une direction d , (Figure 4.3b).

Un autre point important est la traduction d'une action de l'opérateur manipulant la pièce virtuelle en information d'entrée compatible et adéquate en ce qui concerne la représentation de la main par un ensemble d'efforts « équivalents », i.e. les efforts permettant de décrire de façon réaliste l'action de l'utilisateur. Ce problème devient très important dans le cas d'un contrôle en effort, i.e. les CLs géométriques sont fournies par une interface motrice de RV. Dans ce cas, une réponse du système mécanique dans l'espace des efforts peut être déterminée de façon conventionnelle : une modélisation des efforts à développer représentant l'action à réaliser afin d'assurer une trajectoire d'A/D prescrite et leur calcul par le modèle mécanique sont nécessaires. Cette modélisation doit être la plus adéquate possible par rapport à l'application réelle des efforts (leur nature, direction d'application,...) simulant la main de l'opérateur lors des opérations d'A/D ou de maintenance. Une telle réponse mécanique est équivalente à un chargement particulier à effectuer durant la manipulation d'une poutre flexible et représente en effet beaucoup de cas de charge possibles. Cependant, cette diversité peut être fortement limitée en considérant les sollicitations les plus appropriées pour les opérations d'A/D et en tenant compte de la forme de composants flexibles. Ainsi, une réponse en termes d'efforts à appliquer (CLs mécaniques) est modélisée par des efforts-suiveurs dans le cas de simulation dans l'espace des configurations, car ce type d'efforts est le plus approprié pour la manipulation d'A/D de pièces flexibles modélisées par une poutre flexible soumise à des grands déplacements (Figure 4.3c). Par ailleurs, il est également possible de modéliser les CLs mécaniques par des efforts-suiveurs lors de la simulation d'une pièce flexible dans l'espace des efforts (Figure 4.3a). Il est nécessaire de noter que des problèmes de stabilité ne sont pas considérés dans ce mémoire.

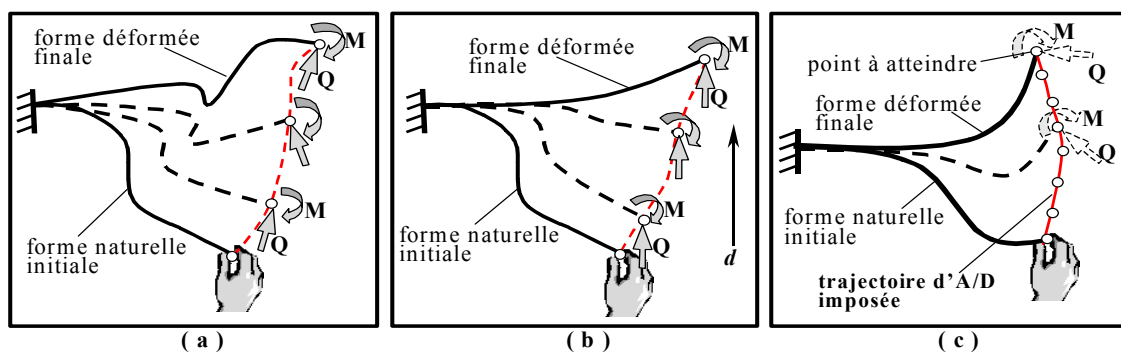


Figure 4.3. Exemples de simulation des CLs pour des opérations d'A/D :
(a) application d'efforts-suiveurs, (b) application d'efforts conservatifs selon la direction d ,
(c) définition de la trajectoire d'A/D imposée pour l'évaluation des efforts-suiveurs.

A part de la modélisation des CLs géométriques et mécaniques, il convient de faire un certain nombre d'hypothèses simplificatrices en ce qui concerne la façon dont ces CLs sont appliquées et leurs impacts éventuels sur la simplification du modèle de comportement. Ainsi, compte tenu des cas de manipulation d'A/D de poutres flexibles considérés précédemment, les hypothèses supplémentaires utilisées pour modéliser l'application des CLs sont :

- l'encastrement d'une des extrémités de la poutre flexible. Cette CL peut paraître une restriction forte, mais compte tenu de la technologie de réalisation de la liaison entre la pièce flexible et son environnement extérieur rigide, nous pouvons nous contenter d'une telle modélisation de liaison. La même modélisation peut être utilisée lorsqu'il s'agit d'une manipulation à deux mains (Figure 4.2a) ; cependant, une telle modélisation s'avère très approximative car cela suppose un serrage fort de la pièce flexible,
- les efforts appliqués à la pièce flexible sont ponctuels,
- la section d'application des efforts ne se déforme pas et reste quasi-plane lors du chargement : absence de phénomènes de flambement de la section,
- les efforts extérieurs sont ramenés à la ligne moyenne de la poutre flexible alors qu'en réalité, ils sont appliqués à la surface extérieure de la pièce manipulée,
- le principe de Saint-Venant est applicable : des efforts locaux différents, mais statiquement équivalents, provoquent le même état de contrainte dans la poutre flexible si les contraintes locales dans la zone d'application de ces efforts ne sont pas prises en compte. La solution obtenue en terme de déformation de la structure est valable loin de la zone d'application des efforts extérieurs.

Il convient également de noter qu'au cours d'une manipulation virtuelle, la pièce flexible peut rencontrer un obstacle sur sa trajectoire. Lorsque la pièce manipulée rentre en collision, la configuration correspondante suppose principalement deux cas de CLs supplémentaires à prendre en considération :

- la détermination d'efforts de contact et la prise en compte de cette charge complémentaire lors de la simulation dans l'espace des efforts,
- l'intégration du (des) point(s) de contact comme des CLs géométriques complémentaires (déplacements imposés) dans le cas de simulation dans l'espace des configurations.

Toutefois, uniquement le cas de manipulation d'une poutre flexible dans son espace des configurations libres sera traité dans ce mémoire. Ceci signifie qu'aucune déformation supplémentaire, due aux contacts avec les obstacles présents dans l'espace de travail de la pièce flexible, n'est considérée, même si le modèle proposé est directement compatible avec une telle configuration.

4.3. Partie géométrique du modèle : non-linéarité géométrique

4.3.1. Généralités

La partie géométrique du modèle ne contient que les termes géométriques nécessaires pour reconstruire une forme déformée d'une poutre flexible 3D sollicitée au cours d'une manipulation quelconque. Afin de caractériser cette déformation, deux repères orthonormés sont couramment utilisés dans la mécanique des poutres : un repère global de référence $\{O, \vec{i}_1, \vec{i}_2, \vec{i}_3\}$, définissant une position absolue de la poutre, et un repère local mobile $\{O_k, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3\}$, lié à un point courant de la ligne moyenne de la poutre (Figure 4.4).

Vu que les déplacements produits par la poutre au cours de sa manipulation sont grands (non-linéaires), il est commode d'exprimer les coordonnées de la poutre flexible déformée (ou plutôt les coordonnées de la ligne moyenne) dans le repère global, lié par exemple à l'extrémité encastree de la poutre, à l'aide d'une représentation paramétrique. En effet, on va chercher à déterminer les coordonnées (x, y, z) d'un centre de gravité O_k de la section courante S_k , $k \in [1, m]$ de la poutre flexible en fonction d'un paramètre $s \in [0, l]$ qui est l'abscisse curviligne, avec l – longueur de la poutre, m – nombre de points représentant la ligne moyenne de la poutre déformée dans l'espace 3D.

Il est également à noter que le repère local mobile (ou simplement, repère local) n'est pas celui de Frenet, couramment utilisé dans la géométrie différentielle [Laroze 1988], [Struik 1988]. En effet,

le repère de Frenet caractérise la géométrie d'une courbe 3D sans tenir compte d'un effet de torsion mécanique dans la section de la poutre, i.e. rotations des sections, au cours de la déformation. La particularité du repère local introduit dans [Svetlitsky/1 1987], [Svetlitsky 2000] est que ce repère est lié non seulement à la ligne moyenne de la poutre, mais aussi à la section courante S_k . Ainsi, lors de la torsion mécanique de la poutre, le repère local effectue des rotations correspondantes, car la section S_k tourne d'un certain angle.

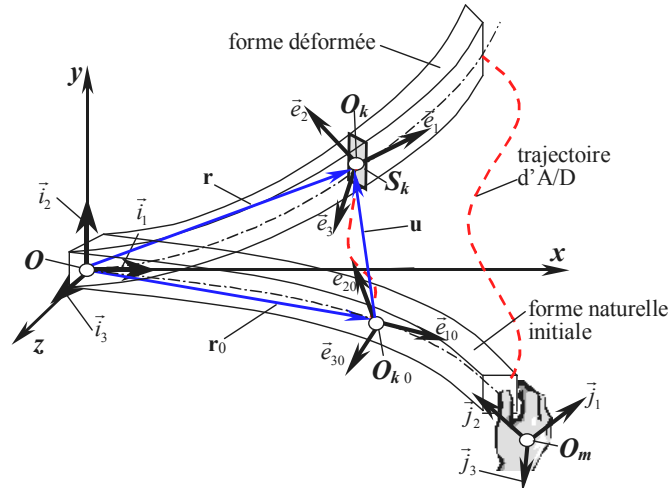


Figure 4.4. Définition des différents repères associés à la poutre flexible.

4.3.2. Transformation de coordonnées

Lors de la manipulation d'une poutre flexible, la nouvelle position de chaque point de sa ligne moyenne est caractérisée par un vecteur de déplacement \mathbf{u} et une rotation du repère local (Figure 4.4). De plus, la forme déformée de la poutre doit être exprimée dans le repère global $\{O, \vec{i}_1, \vec{i}_2, \vec{i}_3\}$, lié au repère d'une main virtuelle $\{O_m, \vec{j}_1, \vec{j}_2, \vec{j}_3\}$. Ces deux problèmes nécessitent une transformation géométrique entre le repère global et les repères locaux de la poutre. Une telle transformation peut être effectuée en utilisant des angles d'Euler.

4.3.2.1. Matrices de rotation

Les matrices de rotation jouent un rôle essentiel dans le concept des angles d'Euler. La transformation d'un vecteur dans l'espace 3D peut être exprimée à partir de trois rotations consécutives autour des axes correspondants en effectuant un passage d'un repère de référence à un autre repère. La Figure 4.5a présente deux repères de référence différents $\{O, X, Y\}$ et $\{O, X', Y'\}$. Un vecteur \mathbf{a} peut être exprimé dans le repère $\{O, X, Y\}$, mais également dans le repère $\{O, X', Y'\}$. Les relations entre des coordonnées dans deux repères sont :

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}. \quad (4.1)$$

Pour la même rotation plane mais exprimée en 3D, on obtient :

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

d'où la matrice de rotation par rapport à l'axe Z :

$$\mathbf{L}_Z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

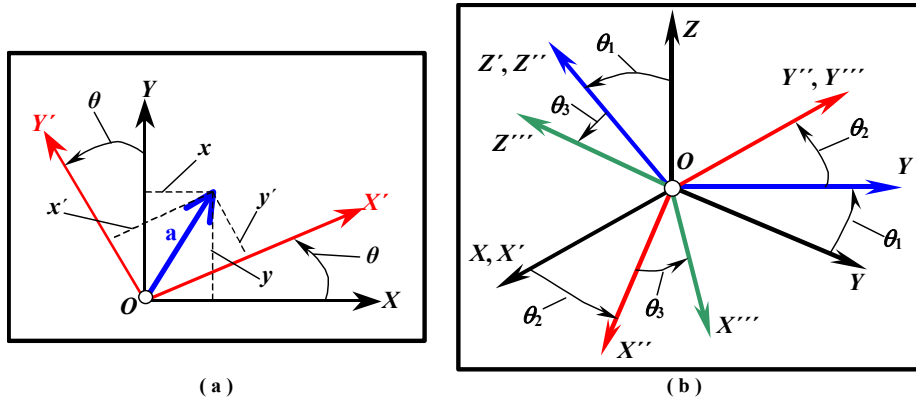


Figure 4.5. Rotation de repères et angles d'Euler : (a) cas 2D, (b) cas 3D.

En appliquant la même procédure, on obtient, en 3D, des matrices de rotation par rapport aux axes X et Y respectivement :

$$\mathbf{L}_X(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}; \quad \mathbf{L}_Y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (4.4)$$

4.3.2.2. Angles d'Euler

Les angles d'Euler sont couramment utilisés en mécanique pour exprimer le passage d'un repère à un autre, en ce qui concerne la géométrie d'un objet. Ces angles sont employés pour décrire la rotation complète d'un système de coordonnées Cartésien en effectuant trois rotations élémentaires des axes de ce système. Ainsi, afin de passer à un nouveau repère en 3D, trois rotations successives planes doivent être effectuées [Goldstein 1950], [Svetlitsky/1 1987], [Lallemand & al. 1994] : une première rotation par exemple autour de l'axe X (angle θ_1), ensuite une seconde rotation (angle θ_3) autour d'un nouvel axe Z noté Z' et finalement, une troisième rotation (angle θ_2) autour d'un nouvel axe Y (Y'') (Figure 4.5b). Cette transformation est donc définie par une matrice de rotation :

$$\mathbf{L} = \mathbf{L}_Y(\theta_2) \mathbf{L}_Z(\theta_3) \mathbf{L}_X(\theta_1), \quad (4.5)$$

où :

$$\mathbf{L}_Y(\theta_2) = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & -\sin \theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{L}_Z(\theta_3) = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & \sin \theta_3 & 0 \\ -\sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{L}_X(\theta_1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ 0 & -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix}.$$

Ainsi, on obtient :

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2\cos\theta_3 & \cos\theta_2\sin\theta_3\cos\theta_1 + \sin\theta_2\sin\theta_1 & \cos\theta_2\sin\theta_3\sin\theta_1 - \sin\theta_2\cos\theta_1 \\ -\sin\theta_3 & \cos\theta_1\cos\theta_3 & \cos\theta_3\sin\theta_1 \\ \sin\theta_2\cos\theta_3 & \sin\theta_2\sin\theta_3\cos\theta_1 - \cos\theta_2\sin\theta_1 & \sin\theta_2\sin\theta_3\sin\theta_1 + \cos\theta_2\cos\theta_1 \end{bmatrix}. \quad (4.6)$$

Ainsi, un vecteur quelconque \mathbf{a} , dont les composantes dans le repère $\{O, X, Y, Z\}$ sont a_i , peut être exprimé dans le repère $\{O, X''', Y''', Z'''\}$ de façon suivante :

$$\mathbf{a}_n = \mathbf{L} \mathbf{a}, \quad (4.7)$$

avec a_n les composantes du vecteur \mathbf{a} dans le nouveau repère $\{O, X''', Y''', Z'''\}$.

La relation entre les composantes du vecteur \mathbf{a} des deux repère est donc :

$$a_n = l_{in} a_i, \quad (4.8)$$

avec l_{in} les composantes de la matrice de transformation de coordonnées \mathbf{L} ; $i, n = \{1, 2, 3\}$.

4.3.3. Coordonnées de la ligne moyenne de la poutre

Les coordonnées de la ligne moyenne de la poutre flexible déformée correspondent à l'ensemble des centres de gravité des sections courantes S_k , $k \in [1, m]$, coïncidant avec les centres O_k des repères locaux $\{O_k, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3\}$ dont les positions sont définies par un rayon-vecteur \mathbf{r} dans le repère global $\{O, \vec{i}_1, \vec{i}_2, \vec{i}_3\}$. Par ailleurs, un autre repère local orthonormé $\{O_k, \vec{e}_{10}, \vec{e}_{20}, \vec{e}_{30}\}$ peut être utilisé afin de caractériser la forme naturelle initiale quelconque de la poutre flexible en 3D (par exemple, une poutre déformée initialement). Les relations de passage entre les repères locaux, caractérisés par trois vecteurs unitaires \mathbf{e}_i et \mathbf{e}_{j0} , et global, défini également par trois vecteurs unitaires \mathbf{i}_p , peuvent être établies en se basant sur les équations (4.6)-(4.8) :

$$\mathbf{e}_i = \mathbf{L} \mathbf{e}_{j0} ; \quad \mathbf{e}_{j0} = \mathbf{L}^0 \mathbf{i}_p, \quad i, j, p = 1, 2, 3, \quad (4.9)$$

avec \mathbf{L}^0 la matrice de transformation caractérisant la forme initiale de la ligne moyenne de la poutre flexible. Les composantes de cette matrice ont la même forme et les mêmes indices en ce qui concerne les angles initiaux connus θ_{j0} que les composantes de la matrice \mathbf{L} .

Ainsi, la relation entre deux repères $\{O, \vec{i}_1, \vec{i}_2, \vec{i}_3\}$ et $\{O_k, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3\}$ est :

$$\mathbf{e}_i = \mathbf{L} \mathbf{L}^0 \mathbf{i}_p = \mathbf{L}^{(1)} \mathbf{i}_p, \quad i, p = \{1, 2, 3\}, \quad (4.10)$$

avec $\mathbf{L}^{(1)}$ la matrice de transformation caractérisant le passage du repère \mathbf{i}_p au repère \mathbf{e}_i .

Si la forme naturelle initiale de la ligne moyenne est rectiligne, $\mathbf{L}^0 = \mathbf{I}$ – matrice identité. Dans ce cas, $\mathbf{L}^{(1)} = \mathbf{L}$.

En géométrie différentielle, le vecteur tangent \mathbf{t} en chaque point k de la ligne moyenne peut être déterminé, d'une part, à partir de l'expression générale [Struik 1988] :

$$\mathbf{t}(s) = \frac{d\mathbf{r}}{ds} = \frac{d}{ds}[x; y; z]^T. \quad (4.11)$$

D'autre part, le vecteur tangent peut être calculé à partir de la matrice $\mathbf{L}^{(1)}$: les coordonnées de ce vecteur sont les composantes de la première ligne de la matrice de transformation :

$$\mathbf{t}(s) = \mathbf{e}_1 = [l_{11}^{(1)}; l_{12}^{(1)}; l_{13}^{(1)}]^T. \quad (4.12)$$

Ainsi, les coordonnées de la ligne moyenne sont définies à partir des équations (4.11) et (4.12). En particulier, lorsque la forme initiale de la ligne moyenne est rectiligne, i.e. $l_{1n} = l_{1n}^{(1)}$, $n = \{1, 2, 3\}$, le vecteur \mathbf{X} de ses coordonnées est :

$$\frac{d\mathbf{X}}{ds} = \frac{d}{ds} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \cos \theta_3 \\ \cos \theta_2 \sin \theta_3 \cos \theta_1 + \sin \theta_2 \sin \theta_1 \\ \cos \theta_2 \sin \theta_3 \sin \theta_1 - \sin \theta_2 \cos \theta_1 \end{bmatrix}. \quad (4.13)$$

D'un côté, il est nécessaire de souligner que les coordonnées x, y, z de chaque point k de la ligne moyenne déformée sont déterminées dans le repère global de la poutre flexible, i.e. le repère lié à une des extrémités de cette poutre (Figure 4.4), tandis que les angles de rotation θ_i sont exprimés dans le repère local lié à chaque point k . Il convient donc de déterminer ces angles inconnus au cours de la déformation de la poutre flexible. D'un autre côté, on peut déjà remarquer que même dans le cas particulier de manipulation d'une pièce flexible modélisée par une poutre flexible ayant une forme initiale rectiligne, les déplacements de cette pièce sont géométriquement non-linéaires selon (4.13).

4.3.4. Orientation de la ligne moyenne de la poutre

4.3.4.1. Dérivée des vecteurs du repère local par rapport au paramètre s

Soit l'expression de la dérivée des vecteurs unitaires \mathbf{e}_i du repère local par rapport au paramètre s qui est l'abscisse curviligne de la ligne moyenne de la poutre flexible [Svetlitsky/1 1987], [Laroze 1988] :

$$\frac{d\mathbf{e}_i}{ds} = \sum_{j=1}^3 b_{ij} \mathbf{e}_j, \quad i = \{1, 2, 3\}, \quad (4.14)$$

avec b_{ij} les composantes d'une matrice quelconque \mathbf{B} à déterminer.

Après multiplication scalaire de l'équation (4.14) par \mathbf{e}_k , on obtient :

$$\frac{d\mathbf{e}_i}{ds} \cdot \mathbf{e}_k = b_{ik}, \quad i, k = \{1, 2, 3\}. \quad (4.15)$$

Si $i = k$, $\frac{d}{ds}(\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_i) = 0$, car $\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_i = 1$. Ainsi, il vient :

$$\frac{d\mathbf{e}_i}{ds} \cdot \mathbf{e}_i + \mathbf{e}_i \cdot \frac{d\mathbf{e}_i}{ds} = 0 \Rightarrow \frac{d\mathbf{e}_i}{ds} \cdot \mathbf{e}_i = 0 \Rightarrow b_{ii} = 0.$$

Si $i \neq k$, $\frac{d}{ds}(\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_k) = 0$, car $\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_k = 0$. Compte tenu de l'équation (4.15), on déduit :

$$\frac{d\mathbf{e}_i}{ds} \cdot \mathbf{e}_k + \mathbf{e}_i \cdot \frac{d\mathbf{e}_k}{ds} = 0 \Rightarrow \frac{d\mathbf{e}_i}{ds} \cdot \mathbf{e}_k = -\mathbf{e}_i \cdot \frac{d\mathbf{e}_k}{ds} \Rightarrow b_{ik} = -b_{ki}.$$

Ainsi, la matrice \mathbf{B} a seulement trois composantes indépendantes :

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & b_{12} & b_{13} \\ -b_{12} & 0 & b_{23} \\ -b_{13} & -b_{23} & 0 \end{bmatrix}.$$

Soit une matrice $\mathbf{K} = \mathbf{B}$ avec les composantes : $\kappa_1 = b_{23}$, $\kappa_2 = -b_{13}$, $\kappa_3 = b_{12}$. Donc, l'équation (4.14) peut être réécrite de la façon suivante :

$$\frac{d}{ds} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \\ \mathbf{e}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \kappa_3 & -\kappa_2 \\ -\kappa_3 & 0 & \kappa_1 \\ \kappa_2 & -\kappa_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \\ \mathbf{e}_3 \end{bmatrix}. \quad (4.16)$$

Par exemple, compte tenu de l'équation (4.16), on peut écrire pour le vecteur \mathbf{e}_1 , d'une part :

$$\frac{d\mathbf{e}_1}{ds} = \kappa_3 \mathbf{e}_2 - \kappa_2 \mathbf{e}_3. \quad (4.17)$$

D'autre part, en introduisant un vecteur $\boldsymbol{\kappa}$ ayant seulement trois composantes indépendantes selon (4.16) [Svetlitsky/1 1987] :

$$\boldsymbol{\kappa} = \kappa_1 \mathbf{e}_1 + \kappa_2 \mathbf{e}_2 + \kappa_3 \mathbf{e}_3, \quad (4.18)$$

on peut obtenir le même résultat à partir de l'expression suivante :

$$\boldsymbol{\kappa} \times \mathbf{e}_1 = \begin{vmatrix} \mathbf{e}_1 & \mathbf{e}_2 & \mathbf{e}_3 \\ \kappa_1 & \kappa_2 & \kappa_3 \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = \kappa_3 \mathbf{e}_2 - \kappa_2 \mathbf{e}_3. \quad (4.19)$$

Ainsi, la dérivée des vecteurs unitaires \mathbf{e}_i du repère local par rapport au paramètre s s'exprime de la façon suivante :

$$\frac{d\mathbf{e}_i}{ds} = \boldsymbol{\kappa} \times \mathbf{e}_i. \quad (4.20)$$

A partir de (4.20), on peut obtenir une relation importante, permettant de déterminer la dérivée d'un vecteur quelconque \mathbf{a} dans le repère local lié à la ligne moyenne de la poutre flexible, et utilisée par la suite [Svetlitsky/1 1987] :

$$\frac{d\mathbf{a}}{ds} = \frac{\tilde{d}\mathbf{a}}{ds} + \boldsymbol{\kappa} \times \mathbf{a}, \quad (4.21)$$

où $\frac{\tilde{d}}{ds}$ est la dérivée dite locale.

4.3.4.2. Lien entre le repère local et celui de Frenet

Le repère local mobile $\{O_k, \bar{\mathbf{e}}_1, \bar{\mathbf{e}}_2, \bar{\mathbf{e}}_3\}$ est un repère plus général que celui de Frenet, qui peut également caractériser le comportement d'une courbe 3D. La principale différence entre ces deux repères est la prise en compte ou non d'un phénomène de torsion mécanique et donc, la rotation de la section (matière) associée à la ligne moyenne avec laquelle le repère local est lié. Le repère de Frenet ne caractérise le comportement d'une courbe que du point de vue géométrique sans la prise en compte de la rotation de la section de la poutre, car ce repère est lié par notion à la courbe. Le repère local général est lié à la courbe (ligne moyenne) ainsi qu'à la section correspondante. Donc, si le phénomène de rotation de la section courante n'a pas lieu, le repère local coïncide avec celui de Frenet. Comparons plus en détail ces deux repères ; ceci nous permettra en particulier de préciser le sens du vecteur $\boldsymbol{\kappa}$ (équation (4.18)).

Rappelons que le repère de Frenet est formé à partir de trois vecteurs unitaires orthonormés [Laroze 1988], [Struik 1988] : \mathbf{t} – vecteur tangent à une courbe au point courant, \mathbf{n} – vecteur normal et \mathbf{b} – vecteur binormal (ou binormale). Les relations de géométrie différentielle donnent :

$$\frac{d\mathbf{t}}{ds} = \boldsymbol{\chi} = \frac{1}{\rho} \mathbf{n}; \quad (4.22)$$

$$\frac{d\mathbf{b}}{ds} = \boldsymbol{\zeta} \mathbf{n} = \frac{1}{\tau} \mathbf{n}, \quad (4.23)$$

avec : χ la courbure de la courbe, ρ le rayon de courbure, ζ la torsion (géométrique) de la courbe, τ le rayon de torsion.

Ainsi, l'équation (4.16) peut être réécrite de la façon suivante [Laroze 1988] :

$$\frac{d}{ds} \begin{bmatrix} \mathbf{t} \\ \mathbf{n} \\ \mathbf{b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1/\rho & 0 \\ -1/\rho & 0 & 1/\tau \\ 0 & -1/\tau & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{t} \\ \mathbf{n} \\ \mathbf{b} \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} \mathbf{t} \\ \mathbf{n} \\ \mathbf{b} \end{bmatrix}. \quad (4.24)$$

En comparant les composantes respectives des matrices \mathbf{K} et \mathbf{C} (équations (4.16), (4.24)), on déduit que lorsqu'il n'y a pas de rotation d'une section courante, associée à la ligne moyenne de la poutre flexible, i.e. $\mathbf{K} = \mathbf{C}$ avec \mathbf{t} et \mathbf{e}_1 – deux vecteurs tangents à ligne moyenne :

$$\kappa_1 = \zeta = \frac{1}{\tau}; \quad \kappa_2 = 0; \quad \kappa_3 = \chi = \frac{1}{\rho}. \quad (4.25)$$

En conséquence, κ_1 est la torsion de la ligne moyenne déformée de la poutre flexible, κ_3 est la courbure de la ligne moyenne si la rotation de la section courante n'existe pas. Par contre, lorsqu'il est nécessaire de tenir compte de la rotation de la section autour du vecteur \mathbf{e}_1 , la variable κ_2 n'est plus nulle et devient une deuxième composante de la courbure.

4.3.4.3. Détermination des angles de rotation

Considérons les équations (4.9) :

$$\mathbf{e}_i = \sum_{j=1}^3 l_{ij} \mathbf{e}_{j0}; \quad \mathbf{e}_{j0} = \sum_{p=1}^3 l_{pj} \mathbf{e}_p, \quad i, j = \{1, 2, 3\}, \quad (4.26)$$

avec l_{ij} et l_{pj} les composantes des matrices \mathbf{L} et \mathbf{L}^T respectivement.

Selon l'équation (4.20), la dérivé du vecteur \mathbf{e}_i est :

$$\frac{d\mathbf{e}_i}{ds} = \sum_{j=1}^3 \left(\frac{dl_{ij}}{ds} \mathbf{e}_{j0} + l_{ij} \frac{d\mathbf{e}_{j0}}{ds} \right) = \boldsymbol{\kappa} \times \mathbf{e}_i, \quad i = \{1, 2, 3\}, \quad (4.27)$$

où le terme $\frac{d\mathbf{e}_{j0}}{ds}$ peut être calculé en utilisant (4.20) et (4.26) :

$$\frac{d\mathbf{e}_{j0}}{ds} = \boldsymbol{\kappa}_0 \times \mathbf{e}_{j0} = \boldsymbol{\kappa}_0 \times \left(\sum_{p=1}^3 l_{pj} \mathbf{e}_p \right), \quad j = \{1, 2, 3\},$$

avec $\boldsymbol{\kappa}_0 = \kappa_{10} \mathbf{e}_{10} + \kappa_{20} \mathbf{e}_{20} + \kappa_{30} \mathbf{e}_{30}$ le vecteur de torsion et des courbures initiales connues si la poutre flexible donnée a une forme naturelle initiale non-rectiligne.

Ainsi, l'équation (4.27) prend une forme suivante :

$$\sum_{j=1}^3 \left[\frac{dl_{ij}}{ds} \left(\sum_{p=1}^3 l_{pj} \mathbf{e}_p \right) + l_{ij} \left(\boldsymbol{\kappa}_0 \times \left(\sum_{p=1}^3 l_{pj} \mathbf{e}_p \right) \right) \right] = \boldsymbol{\kappa} \times \mathbf{e}_i, \quad i = \{1, 2, 3\}. \quad (4.28)$$

A partir de cette équation, la torsion κ_1 et les courbures κ_2 et κ_3 sont exprimées en fonction des valeurs des composantes l_{ij} et l_{pj} qui sont fonctions des angles de rotation θ_i inconnus (angles d'Euler des équations (4.6), (4.9)). Les composantes du vecteur $\boldsymbol{\kappa}_0$ sont connues car elles caractérisent la forme initiale de la ligne moyenne de la poutre, ce qui représente une partie des données d'entrée récupérées par exemple à partir d'un modèle CAO de la pièce flexible. Afin de simplifier la présentation, donnons le résultat final obtenu à partir de l'équation (4.28) [Svetlitsky/1 1987], [Svetlitsky 2000] :

$$\boldsymbol{\kappa} = \mathbf{L}_1 \frac{d\boldsymbol{\Theta}}{ds} + \mathbf{L} \boldsymbol{\kappa}_0^{(1)}, \quad (4.29)$$

avec : $\Theta = [\theta_1; \theta_2; \theta_3]^T$ le vecteur des angles d'Euler définissant l'orientation de la ligne moyenne de la poutre, $\kappa_0^{(1)}$ le vecteur de torsion et de courbures initiales, i.e. les composantes du vecteur κ_0 définies dans le repère $\{O_k, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3\}$, L_1 la matrice :

$$L_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \cos \theta_3 & 0 & -\sin \theta_2 \\ -\sin \theta_3 & 1 & 0 \\ \sin \theta_2 \cos \theta_3 & 0 & \cos \theta_2 \end{bmatrix}.$$

Cependant, nous avons besoin des expressions des angles de rotation θ_i , car :

- dans ce cas il est plus simple d'écrire le système d'équations différentielles et donc, de traiter le problème du point de vue numérique,
- une partie des CLs géométriques fournies par une interface motrice de RV représente l'ensemble des angles imposés définissant l'orientation de la section manipulée d'une poutre virtuelle flexible.

Ainsi, on déduit ces angles de l'équation (4.29) :

$$\frac{d\Theta}{ds} = L_1^{-1}(\kappa - L\kappa_0^{(1)}). \quad (4.30)$$

En particulier, si la forme initiale de la ligne moyenne de la poutre flexible est rectiligne, l'équation (4.30) développée a la forme suivante :

$$\frac{d\Theta}{ds} = \frac{d}{ds} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\cos \theta_3} (\kappa_1 \cos \theta_2 + \kappa_3 \sin \theta_2) \\ \kappa_2 + \text{tg} \theta_3 (\kappa_1 \cos \theta_2 + \kappa_3 \sin \theta_2) \\ -\kappa_1 \sin \theta_2 + \kappa_3 \cos \theta_2 \end{bmatrix}. \quad (4.31)$$

Comme pour les déplacements de la ligne moyenne de la poutre décrits par l'équation (4.13), l'expression ci-dessus met également en évidence le problème de non-linéarité géométrique à prendre en considération lors de la modélisation de comportement d'une poutre flexible soumise à des grands déplacements.

4.4. Partie physique du modèle : équations d'équilibre

La partie physique du modèle de poutre flexible représente en effet les équations d'équilibre mécanique d'une poutre déformée lors de sa manipulation : A/D, maintenance, etc. Sous l'action des efforts extérieurs provoqués par exemple par une main d'un être humain, les objets solides se déforment et les équations d'équilibre sont toujours valables, mais elles seront écrites pour une structure déformée dont la nouvelle forme est caractérisée par des changements géométriques importants. Les grands déplacements d'un tel objet entraîneront des déplacements des points d'application des efforts ainsi que des modifications importantes de l'orientation de ces efforts.

Dans cette section nous présenterons principalement les équations différentielles d'équilibre d'une poutre flexible déformée sous l'action de la main d'un opérateur. Cependant, le cas d'une manipulation d'une poutre flexible à deux (ou plus pour plusieurs opérateurs) mains sera également considéré. Toutefois, une hypothèse de modélisation de l'application des mains (Section 4.2.4) est utilisée dans tous les cas : chaque main est modélisée par un ensemble d'efforts-suiveurs extérieurs ponctuels sans aucune répartition des efforts exercés par la main ni la considération d'une pression sur la surface extérieure de la poutre, la pression due aux doigts de la main.

4.4.1. Equations d'équilibre

Soit une poutre flexible sous l'action d'efforts-suiveurs extérieurs appliqués à une extrémité libre (Figure 4.6a). Ces efforts modélisent l'application d'une main d'opérateur et forment deux vecteurs des efforts-suiveurs extérieurs résultants : \mathbf{R} – vecteur des forces et \mathbf{T} – vecteur des moments.

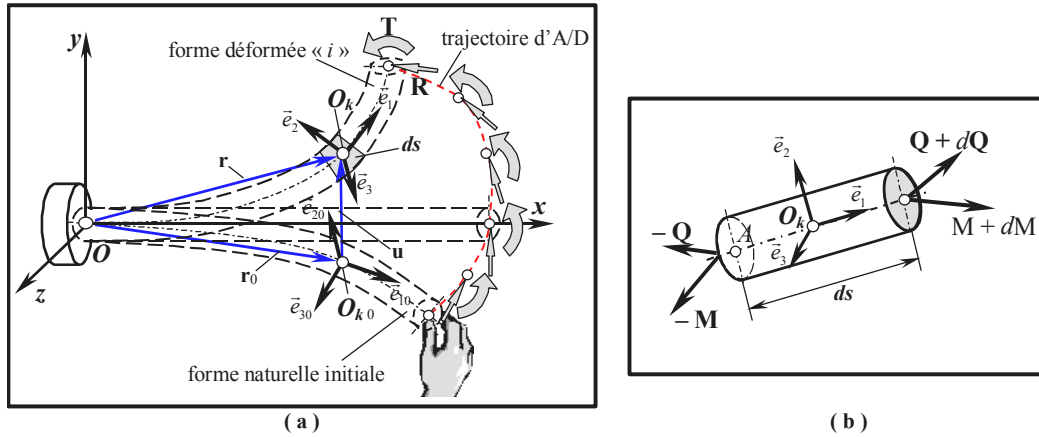


Figure 4.6. Schémas de chargement pour la modélisation mécanique :
(a) déformation d'une poutre flexible sous des efforts-suiveurs extérieurs \mathbf{R} et \mathbf{T} ;
(b) tronçon élémentaire ds de la poutre.

Considérons l'état d'équilibre d'un tronçon élémentaire ds d'une poutre dans un repère local $\{O_k, \bar{\mathbf{e}}_1, \bar{\mathbf{e}}_2, \bar{\mathbf{e}}_3\}$ (Figure 4.6b). On trouve dans les sections de ce tronçon les efforts internes suivants :

- \mathbf{Q} – le vecteur des forces internes exprimées dans le repère local : $\mathbf{Q} = Q_1 \mathbf{e}_1 + Q_2 \mathbf{e}_2 + Q_3 \mathbf{e}_3$, avec Q_1 l'effort normal, Q_2 et Q_3 les efforts tranchants,
- \mathbf{M} – le vecteur des moments internes exprimés également dans le repère local : $\mathbf{M} = M_1 \mathbf{e}_1 + M_2 \mathbf{e}_2 + M_3 \mathbf{e}_3$, avec M_1 le moment de torsion, M_2 et M_3 les moments de flexion.

L'équilibre mécanique du tronçon ds s'écrit ainsi (au point A) :

$$\begin{cases} -\mathbf{Q} + \left(\mathbf{Q} + \frac{d\mathbf{Q}}{ds} ds \right) = \mathbf{0} \\ -\mathbf{M} + \left(\mathbf{M} + \frac{d\mathbf{M}}{ds} ds \right) + (\mathbf{e}_1 ds) \times \mathbf{Q} = \mathbf{0} \end{cases}$$

d'où :

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{Q}}{ds} = \mathbf{0} \\ \frac{d\mathbf{M}}{ds} + \mathbf{e}_1 \times \mathbf{Q} = \mathbf{0} \end{cases} \quad (4.32)$$

Dans la pratique, la main d'un opérateur manipulant une pièce flexible peut être appliquée à n'importe quel endroit de la pièce et pas forcément à l'extrémité libre. De plus, une opération d'A/D ou de maintenance peut être parfois réalisée avec deux (voire plus) mains. Dans ces cas, il convient d'introduire des efforts-suiveurs ponctuels, appliqués entre les deux extrémités de la poutre flexible. Afin de pouvoir simuler une telle manipulation, une δ -fonction dite fonction de Dirac peut être utilisée (Figure 4.7) :

$$\delta(s) = \begin{cases} 0, & s < l_{P_i} \\ \infty, & s = l_{P_i} \\ 0, & s > l_{P_i} \end{cases} \quad (4.33)$$

où $s \in [0, l]$ est l'abscisse curviligne (avec l la longueur de la poutre), $0 < l_{P_i} < l$ est la distance d'application d'efforts ponctuels \mathbf{P}_i modélisant une main i .

En effet, cette fonction a une propriété intéressante utilisée dans le traitement numérique du problème :

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(s - l_{P_i}) ds = 1. \quad (4.34)$$

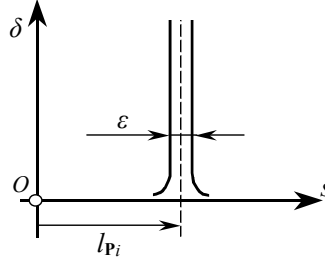


Figure 4.7. δ -fonction de Dirac.

Donc, lorsque $s = l_{P_i}$, les efforts modélisant la main i s'appliquent : ils sont répartis sur une petite distance ε et sont égaux à \mathbf{P}_i (Figure 4.7). Ainsi, si une opération d'A/D est effectuée avec n mains (sans compter la main appliquée à l'extrémité d'une poutre flexible et donc, représentant les CLs mécaniques), modélisées par des vecteurs de forces \mathbf{F}_i et de moments \mathbf{C}_i extérieurs appliqués aux distances respectives l_{F_i, C_i} , le système d'équations 4.32 prend la forme suivante [Svetlitsky/1 1987], [Svetlitsky 2000] :

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{Q}}{ds} + \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i \delta(s - l_{F_i}) = \mathbf{0} \\ \frac{d\mathbf{M}}{ds} + \mathbf{e}_1 \times \mathbf{Q} + \sum_{i=1}^n \mathbf{C}_i \delta(s - l_{C_i}) = \mathbf{0} \end{cases} \quad (4.35)$$

4.4.2. Vecteur des forces internes dans le repère local

Le vecteur $\boldsymbol{\kappa}$ dans les équation (4.30), (4.31), caractérisant la torsion et la courbure de la ligne moyenne d'une poutre flexible déformée, est exprimé dans ce repère local. Déterminons donc les équations définissant le vecteur des efforts internes dans le repère local. Par ailleurs, ces équations nous seront utiles pour l'évaluation de l'état de contrainte dans une pièce flexible déformée. Selon l'expression (4.21), la première équation du système (4.32) s'écrit :

$$\frac{d\mathbf{Q}}{ds} = \frac{\tilde{d}\mathbf{Q}}{ds} + \boldsymbol{\kappa} \times \mathbf{Q} = \mathbf{0}, \quad (4.36)$$

où :

$$\boldsymbol{\kappa} \times \mathbf{Q} = \begin{vmatrix} \mathbf{e}_1 & \mathbf{e}_2 & \mathbf{e}_3 \\ \kappa_1 & \kappa_2 & \kappa_3 \\ Q_1 & Q_2 & Q_3 \end{vmatrix} = \mathbf{e}_1(\kappa_2 Q_3 - \kappa_3 Q_2) - \mathbf{e}_2(\kappa_1 Q_3 - \kappa_3 Q_1) + \mathbf{e}_3(\kappa_1 Q_2 - \kappa_2 Q_1).$$

Ainsi, en projetant les composantes des vecteurs de l'équation (4.36) sur les vecteurs unitaires \mathbf{e}_i du repère local et en supprimant le signe tilde pour simplifier l'expression finale, on en déduit le vecteur des forces dans la section de la poutre :

$$\frac{d\mathbf{Q}}{ds} = \frac{d}{ds} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa_3 Q_2 - \kappa_2 Q_3 \\ -\kappa_3 Q_1 + \kappa_1 Q_3 \\ \kappa_2 Q_1 - \kappa_1 Q_2 \end{bmatrix}. \quad (4.37)$$

4.4.3. Vecteur des moments internes dans le repère local

Le vecteur des moments internes dans le repère local s'exprime également à partir des équations (4.21) et (4.32) :

$$\frac{d\mathbf{M}}{ds} = \frac{\tilde{d}\mathbf{M}}{ds} + \boldsymbol{\kappa} \times \mathbf{M} + \mathbf{e}_1 \times \mathbf{Q} = 0, \quad (4.38)$$

où :

$$\boldsymbol{\kappa} \times \mathbf{M} = \begin{vmatrix} \mathbf{e}_1 & \mathbf{e}_2 & \mathbf{e}_3 \\ \kappa_1 & \kappa_2 & \kappa_3 \\ M_1 & M_2 & M_3 \end{vmatrix} = \mathbf{e}_1(\kappa_2 M_3 - \kappa_3 M_2) - \mathbf{e}_2(\kappa_1 M_3 - \kappa_3 M_1) + \mathbf{e}_3(\kappa_1 M_2 - \kappa_2 M_1),$$

$$\mathbf{e}_1 \times \mathbf{Q} = \begin{vmatrix} \mathbf{e}_1 & \mathbf{e}_2 & \mathbf{e}_3 \\ 1 & 0 & 0 \\ Q_1 & Q_2 & Q_3 \end{vmatrix} = -\mathbf{e}_2 Q_3 + \mathbf{e}_3 Q_2.$$

Ainsi, en projetant les composantes des vecteurs de l'équation 4.38 sur les vecteurs unitaires \mathbf{e}_i du repère local et en supprimant le signe tilde pour simplifier l'expression finale, on en déduit le vecteur des moments dans la section de la poutre :

$$\frac{d\mathbf{M}}{ds} = \frac{d}{ds} \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa_3 M_2 - \kappa_2 M_3 \\ -\kappa_3 M_1 + \kappa_1 M_3 \\ \kappa_2 M_1 - \kappa_1 M_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ Q_3 \\ -Q_2 \end{bmatrix}. \quad (4.39)$$

4.5. Vecteur d'état de la pièce flexible

4.5.1. Lien entre les moments internes et la courbure/torsion

Dans les équations résultant (4.30), (4.31), (4.37), (4.39) la courbure et la torsion κ_i sont des inconnues. Donc, il convient d'utiliser des relations supplémentaires, permettant d'exprimer ces variables géométriques. En effet, dans le cas de petits déplacements, il est possible d'utiliser avec une bonne approximation des relations de proportionnalité entre les moments internes dans la section d'une poutre flexible et la courbure/torsion du point de vue de la résistance des matériaux. Les coefficients de proportionnalité sont les rigidités de flexion, de torsion et dépendent du matériau utilisé ainsi que des caractéristiques géométriques de la section d'une poutre flexible (voir un exemple à la section 3.4.1, équation (3.9)).

Cependant, il est nécessaire de rappeler qu'une pièce flexible peut être initialement déformée, i.e. elle posséderait une certaine courbure et/ou une torsion initiales κ_{i0} . Par conséquent, il est

indispensable de prendre en compte cette déformation initiale qui peut être issue d'un modèle CAO fourni.

Ainsi, la relation entre les moments internes et la courbure/torsion d'une poutre flexible est [Svetlitsky/1 1987], [Svetlitsky 2000] :

$$\mathbf{M} = \mathbf{A}(\boldsymbol{\kappa} - \boldsymbol{\kappa}_0^{(1)}), \quad (4.40)$$

avec : $\boldsymbol{\kappa}_0^{(1)} = \kappa_{10}\mathbf{e}_1 + \kappa_{20}\mathbf{e}_2 + \kappa_{30}\mathbf{e}_3$ le vecteur de courbure et de torsion initiales, exprimées dans le repère local $\{O_k, \bar{\mathbf{e}}_1, \bar{\mathbf{e}}_2, \bar{\mathbf{e}}_3\}$, \mathbf{A} la matrice de rigidité :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix},$$

où : $A_{11} = GI_p$ pour la rigidité de torsion, $A_{22} = EI_2$ et $A_{33} = EI_3$ pour les rigidités de flexion avec G module d'élasticité transversal, E module d'Young, I_p moment quadratique polaire de la section, $I_{2,3}$ les moments quadratiques de la section.

Donc, la courbure et la flexion initiales sont déterminées à partir de l'équation (4.40) :

$$\boldsymbol{\kappa} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{M} + \boldsymbol{\kappa}_0^{(1)}. \quad (4.41)$$

Par exemple, pour une poutre flexible initialement rectiligne, les paramètres κ_i sont :

$$\kappa_1 = \frac{M_1}{A_{11}}; \quad \kappa_2 = \frac{M_2}{A_{22}}; \quad \kappa_3 = \frac{M_3}{A_{33}}. \quad (4.42)$$

4.5.2. Vecteur d'état d'une poutre flexible

En rassemblant les équations (4.11), (4.30), (4.36), (4.38) et en tenant compte l'équation (4.41), on obtient finalement un système d'équations différentielles non-linéaires du premier ordre :

$$\begin{cases} d\mathbf{X}/ds = \mathbf{e}_1 \\ d\boldsymbol{\Theta}/ds = \mathbf{L}_1^{-1}(\boldsymbol{\kappa} - \mathbf{L}\boldsymbol{\kappa}_0^{(1)}) \\ d\mathbf{Q}/ds = -\boldsymbol{\kappa} \times \mathbf{Q} \\ d\mathbf{M}/ds = -\boldsymbol{\kappa} \times \mathbf{M} - \mathbf{e}_1 \times \mathbf{Q} \end{cases}. \quad (4.43)$$

Ce système peut être exprimé sous une forme plus compacte :

$$\frac{d\mathbf{H}}{ds} = \frac{d}{ds}[\mathbf{X}; \boldsymbol{\Theta}; \mathbf{Q}; \mathbf{M}]^T, \quad (4.44)$$

avec \mathbf{H} le vecteur d'état caractérisant l'état d'une poutre flexible déformée des points de vue géométrique (forme déformée de la poutre) et mécanique (état d'équilibre) sous des CLs géométriques/mécaniques données.

4.5.3. Adimensionnement des équations

Du point de vue du traitement numérique du système (4.44), il est intéressant de présenter ce système sous une forme adimensionnelle. Par exemple, certaines solutions validées (trajectoires d'A/D, efforts associés,...) peuvent être stockées dans une base de données sous forme adimensionnelle et utilisées pour d'autres manipulations virtuelles ou lors de différentes optimisations lorsque la géométrie et/ou le matériau changent, sans nouvelle résolution du système d'équations

différentielles non-linéaires. De plus, l'exploitation des systèmes adimensionnels permet d'être indépendant du choix d'une échelle des unités physiques.

Afin de pouvoir adimensionner une équation quelconque, il convient de trouver une correspondance entre des variables physiques v_i , intervenant dans cette équation, et ses valeurs adimensionnelles \bar{v}_i à l'aide des coefficients d'adimensionnement k_i , représentant les dimensions de ces variables physiques :

$$v_i = k_i \bar{v}_i. \quad (4.45)$$

En ce qui concerne les variables intervenant dans le système (4.44), leurs coefficients de proportionnalité k_i correspondants sont regroupés dans le Tableau 4.1.

Variabes	Coordonnées s, x, y, z	Courbure/ torsion κ_i, κ_{i0}	Angles θ_i	Rigidité A_{33}	Forces Q_i	Moments M_i
Coefficients k_i	L	$1/L$	1	B	B/L^2	B/L

Tableau 4.1. Coefficients d'adimensionnement k_i .

De plus, introduisons un coefficient adimensionnel α_i tel que pour une section constante :

$$A_{ii} = \alpha_i A_{33}, \quad i = \{1, 2, 3\}. \quad (4.46)$$

Donc, les équations reliant les variables physiques et leurs valeurs adimensionnelles sont :

$$\begin{cases} s = L\bar{s}; & z = L\bar{z}; & \theta_i = \bar{\theta}_i; \\ x = L\bar{x}; & \kappa_i = \bar{\kappa}_i/L; & Q_i = (B/L^2)\bar{Q}_i; \\ y = L\bar{y}; & \kappa_{i0} = \bar{\kappa}_{i0}/L; & M_i = (B/L)\bar{M}_i, \end{cases} \quad (4.47)$$

où $B = A_{33}$ est la rigidité.

Ainsi, l'adimensionnement des équations différentielles du système (4.44) peut être effectué en remplaçant les variables par de nouvelles variables adimensionnelles (équations (4.47)). Ci-dessus nous présentons un exemple d'un tel adimensionnement de la dernière équation du système (4.44) où $L = l$:

$$\begin{aligned} \frac{dM_3}{ds} = \kappa_2 M_1 - \kappa_1 M_2 - Q_2 & \Leftrightarrow \frac{B}{L} \frac{d\bar{M}_3}{L d\bar{s}} = \frac{1}{L} \bar{\kappa}_2 \frac{B}{L} \bar{M}_1 - \frac{1}{L} \bar{\kappa}_1 \frac{B}{L} \bar{M}_2 - \frac{B}{L^2} \bar{Q}_2 \Rightarrow \\ \frac{d\bar{M}_3}{d\bar{s}} = \bar{\kappa}_2 \bar{M}_1 - \bar{\kappa}_1 \bar{M}_2 - \bar{Q}_2, & \quad \bar{s} \in [0,1]. \end{aligned}$$

Les autres équations du système (4.44) ont été adimensionnées de la même manière.

En ce qui concerne la formule (4.41), permettant d'exprimer la courbure et la torsion inconnues, l'adimensionnement de cette équation est effectué de la façon suivante en utilisant les équations (4.46), (4.47) :

$$\begin{aligned} \kappa_i = \frac{M_i}{A_{ii}} + \kappa_{i0}^{(1)} = \frac{M_i}{\alpha_i A_{33}} + \kappa_{i0}^{(1)} & \Leftrightarrow \frac{1}{L} \bar{\kappa}_i = \frac{B}{L} \frac{\bar{M}_i}{\alpha_i (B \cdot 1)} + \frac{1}{L} \bar{\kappa}_{i0}^{(1)} \Rightarrow \\ \bar{\kappa}_i = \frac{\bar{M}_i}{\alpha_i} + \bar{\kappa}_{i0}^{(1)}, & \quad i = \{1, 2, 3\}. \end{aligned} \quad (4.48)$$

Les coefficients adimensionnels α_i des équations (4.46), (4.48) dépendent de la géométrie de la section de la poutre ainsi que du matériau utilisé. Déterminons ces paramètres pour une section tubulaire, couramment rencontrée dans la pratique industrielle, avec D_{ext} et D_{int} les diamètres extérieur et intérieur respectivement. Les rigidités pour une pièce flexible de ce type sont :

$$A_{11} = GI_p = G \frac{\pi}{32} (D_{ext}^4 - D_{int}^4); \quad A_{22} = A_{33} = EI_{2,3} = E \frac{\pi}{64} (D_{ext}^4 - D_{int}^4).$$

Ainsi :

$$\alpha_2 = \alpha_3 = 1; \quad (4.49')$$

$$\alpha_1 = \frac{A_{11}}{A_{33}} = \frac{GI_p}{EI_3} = 2 \frac{G}{E} = 2 \frac{2(1+\mu)}{E} = \frac{1}{1+\mu}, \quad (4.49'')$$

où μ est le coefficient de Poisson.

Dans les chapitres suivants nous considérons des exemples de simulations numériques de poutres flexibles 2D et 3D. Donnons ici les équations adimensionnelles finales, utilisées par la suite, sous la forme développée. Pour une poutre flexible 2D, on a :

$$\frac{d\bar{\mathbf{H}}}{d\bar{s}} = \frac{d}{d\bar{s}} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{\theta} \\ \bar{N} \\ \bar{Q} \\ \bar{M} \end{bmatrix} = \frac{d}{d\bar{s}} \begin{bmatrix} \cos(\bar{\theta} + \bar{\theta}_0) \\ \sin(\bar{\theta} + \bar{\theta}_0) \\ \bar{M} \\ (\bar{M} + \bar{\kappa}_0^{(1)})\bar{Q} \\ -(\bar{M} + \bar{\kappa}_0^{(1)})\bar{N} \\ -\bar{Q} \end{bmatrix}, \quad \bar{s} \in [0,1], \quad (4.50)$$

avec : $\bar{\theta} = \bar{\theta}_3$ l'angle entre la ligne moyenne de la poutre flexible déformée et l'axe de coordonnées \bar{x} ; $\bar{N} = \bar{Q}_1$, $\bar{Q} = \bar{Q}_2$, $\bar{M} = \bar{M}_3$ sont respectivement l'effort normal, l'effort et le moment de flexion dans la section courante de la poutre ; $\bar{\kappa}_0^{(1)} = \bar{\kappa}_{30}^{(1)}$ la courbure initiale de la ligne moyenne de la poutre, exprimée dans le repère local mobile, lié à la ligne moyenne déformée ; $\bar{\theta}_0 = \bar{\theta}_{30}$ l'angle caractérisant la forme initiale de la ligne moyenne.

Dans le cas de manipulation d'une poutre 3D initialement rectiligne, les équations adimensionnelles finales sont :

$$\frac{d\bar{\mathbf{H}}}{d\bar{s}} = \frac{d}{d\bar{s}} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{X}} \\ \bar{\Theta} \\ \bar{\mathbf{Q}} \\ \bar{\mathbf{M}} \end{bmatrix} = \frac{d}{d\bar{s}} \left\{ \begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} \cos \bar{\theta}_2 \cos \bar{\theta}_3 \\ \cos \bar{\theta}_2 \sin \bar{\theta}_3 \cos \bar{\theta}_1 + \sin \bar{\theta}_2 \sin \bar{\theta}_1 \\ \cos \bar{\theta}_2 \sin \bar{\theta}_3 \sin \bar{\theta}_1 - \sin \bar{\theta}_2 \cos \bar{\theta}_1 \end{array} \right\} \bar{\mathbf{X}} \\ \left. \begin{array}{l} (\bar{\kappa}_1 \cos \bar{\theta}_2 + \bar{\kappa}_3 \sin \bar{\theta}_2) / \cos \bar{\theta}_3 \\ \bar{\kappa}_2 + \text{tg } \bar{\theta}_3 (\bar{\kappa}_1 \cos \bar{\theta}_2 + \bar{\kappa}_3 \sin \bar{\theta}_2) \\ - \bar{\kappa}_1 \sin \bar{\theta}_2 + \bar{\kappa}_3 \cos \bar{\theta}_2 \end{array} \right\} \bar{\Theta} \\ \left. \begin{array}{l} \bar{\kappa}_3 \bar{Q}_2 - \bar{\kappa}_2 \bar{Q}_3 \\ - \bar{\kappa}_3 \bar{Q}_1 + \bar{\kappa}_1 \bar{Q}_3 \\ \bar{\kappa}_2 \bar{Q}_1 - \bar{\kappa}_1 \bar{Q}_2 \end{array} \right\} \bar{\mathbf{Q}} \\ \left. \begin{array}{l} \bar{\kappa}_3 \bar{M}_2 - \bar{\kappa}_2 \bar{M}_3 \\ - \bar{\kappa}_3 \bar{M}_1 + \bar{\kappa}_1 \bar{M}_3 + \bar{Q}_3 \\ \bar{\kappa}_2 \bar{M}_1 - \bar{\kappa}_1 \bar{M}_2 - \bar{Q}_2 \end{array} \right\} \bar{\mathbf{M}} \end{array} \right\}, \quad \bar{s} \in [0,1], \quad (4.51)$$

où la courbure et la torsion adimensionnées $\bar{\kappa}_i$ de la ligne moyenne sont exprimées à partir de l'équation (4.48).

4.5.4. Adaptation du modèle mécanique à la manipulation virtuelle

Selon la méthodologie de simulation des opérations d'A/D de pièces déformables dans un environnement de RV (Section 3.2), la simulation effective d'un comportement réaliste d'une pièce déformable donnée est basée sur un des modèles mécaniques qui (Figure 3.1) :

- nécessite différentes données d'entrée : géométrie et matériau de la pièce déformable, conditions d'A/D, etc.,
- fournit une information de sortie de différente nature : géométrie déformée, trajectoire d'A/D, efforts à développer, etc.

Le modèle présenté dans ce chapitre peut faire partie des modèles mécaniques à intégrer dans un module de simulation de pièces flexibles dans le contexte d'A/D afin de pouvoir modéliser de façon plus réaliste le comportement de ces pièces et notamment, de pièces de type poutres flexibles. Donc, le modèle de poutres flexibles est un modèle mécanique bien adapté (Section 2.3.7), i.e. le modèle traitant le comportement d'une classe de pièces soumises à une sollicitation, une déformation,... données. Cependant, tous les modèles susceptibles d'être intégrés dans le module de simulation de pièces déformables d'un environnement de RV sont soumis aux contraintes de la simulation virtuelle. Parmi ces contraintes, le temps de réponse et la capacité d'adaptation aux manipulations virtuelles, i.e. la conformité des données d'entrée/sortie requises/fournies par le modèle mécanique et par les interfaces comportementales de RV sont essentielles. Les aspects de formulation numérique de modèle de poutres flexibles, de problèmes de temps de calcul et, en conséquence, l'évaluation de ce modèle du point de vue de temps de réponse seront considérés au chapitre suivant. Néanmoins, il semble nécessaire d'évaluer dans cette partie l'adéquation du modèle de poutres flexibles aux manipulations virtuelles, i.e. de discuter des aspects de conformité ou d'adéquation des données d'entrée/sortie requises/fournies par ce modèle mécanique et par les interfaces comportementales de RV. Ceci nous permettra dès le début de considérer et de valider ou non l'intégration potentielle du modèle de poutres flexibles dans un système de simulation d'opérations d'A/D virtuelles.

Globalement, le processus de simulation d'un comportement de pièces virtuelles flexibles, basée sur le modèle mécanique de poutres flexibles, peut être représenté de la façon suivante (Figure 4.8) :

1. L'opérateur définit un certain nombre de données d'entrée lors de la phase de préparation de données pour la simulation : géométrie de pièce flexible, matériau, certaines CLs (type de fixation, par exemple). Ces données sont inchangées pour une manipulation virtuelle donnée.
2. Au cours de la manipulation virtuelle, l'opérateur fournit les CLs requises par le modèle mécanique à l'aide des interfaces motrices de RV.
3. A partir des CLs données, la résolution de l'équation (4.44) est effectuée, et une réponse réaliste du modèle mécanique est fournie : forme déformée de la pièce flexible, trajectoire d'A/D, efforts requis à appliquer à la pièce durant sa manipulation, état de contrainte dans la pièce déformée, etc.
4. Cette réponse est transformée en données correspondantes pour leur perception visuelle, physique (retour d'efforts), sonore, etc.

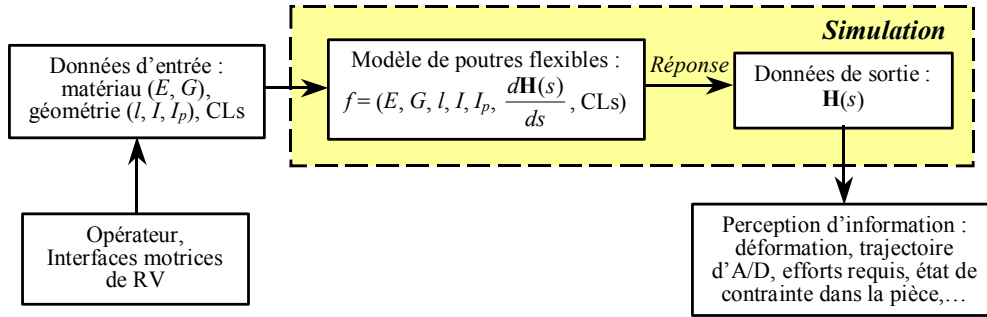


Figure 4.8. Schéma du processus de simulation de comportement de poutres flexibles.

Donc, le processus de résolution du système différentiel (4.44) au cours de la simulation virtuelle peut être représenté comme une fonction des données d'entrée (paramètres de la pièce flexible, CLs,...) et de sortie (vecteur d'état \mathbf{H} de la pièce). Les vecteurs \mathbf{X} et Θ intervenant dans le vecteur d'état \mathbf{H} représentent des variables géométriques et sont définies dans l'espace des configurations. Les vecteurs \mathbf{Q} et \mathbf{M} , qui font également partie du vecteur d'état de la poutre flexible, sont des variables mécaniques.

Afin de pouvoir résoudre le système (4.44), deux catégories de CLs sont requises :

- mécaniques : les forces et les moments extérieurs appliqués à la poutre flexible,
- géométriques : les déplacements et les angles imposés.

Par exemple, dans le cas de la simulation d'A/D d'une poutre flexible dont une extrémité est encastree et l'autre est manipulée par un opérateur (Figure 4.6), les CLs mécaniques sont les vecteurs d'efforts \mathbf{R} et des moments \mathbf{T} suiveurs modélisant la main de l'opérateur. Ces CLs sont fournies par une interface haptique permettant de mesurer les efforts développés, définis dans l'espace des efforts-suiveurs (\mathbf{R} , \mathbf{T}) à six dimensions dans le cas 3D et exprimées de façon suivante :

$$\begin{cases} \mathbf{Q}_{s=l} = \mathbf{Q}(l) = \mathbf{R}; \\ \mathbf{M}_{s=l} = \mathbf{M}(l) = \mathbf{T}. \end{cases} \quad (4.52)$$

Pour l'extrémité fixe, modélisée par un encastrement, les CLs géométriques sont :

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{s=0} = \mathbf{X}(0) = \mathbf{0}; \\ \Theta_{s=0} = \Theta(0) = \mathbf{0}. \end{cases} \quad (4.53)$$

Lorsqu'il s'agit de la manipulation de poutre flexible soumise à des déplacements imposés, fournis par une interface de localisation spatiale mesurant par exemple les déplacements \mathbf{X}_n et les angles Θ_n de rotation de l'extrémité libre manipulée de la pièce flexible, les CLs géométriques sont définies dans l'espace des configurations (\mathbf{X}_n , Θ_n) à six dimensions dans le cas 3D et exprimées de façon suivante :

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{s=l} = \mathbf{X}(l) = \mathbf{X}_n; \\ \Theta_{s=l} = \Theta(l) = \Theta_n. \end{cases} \quad (4.54)$$

Ces CLs peuvent représenter par exemple un point courant d'une trajectoire d'A/D définie par l'opérateur au cours de la manipulation de la pièce flexible. Si l'extrémité fixe est également modélisée par l'encastrement idéal, les CLs géométriques pour cette extrémité sont définies par l'équation (4.53). Il convient également de noter qu'il est indispensable d'effectuer l'adimensionnement des CLs géométriques/mécaniques si le système d'équations différentielles adimensionnées est utilisé. L'adimensionnement des CLs se réalise à partir des équations (4.47).

Il est nécessaire de souligner que les CLs en deux points (*Boundary Value Problem (BVP)* en anglais), représentant les deux extrémités d'une poutre flexible, sont requises. Ce problème nécessitant l'utilisation de méthodes numériques particulières sera discuté au chapitre suivant. Cependant, il est

intéressant de remarquer que les CLs requises par le modèle mécanique de poutres flexibles sont de nature géométriques et/ou mécaniques, fournies par une des interfaces motrices de RV et définies soit dans l'espace des efforts, soit dans l'espace des configurations. La simulation d'un comportement mécanique de telles pièces est donc effectuée à partir de ces CLs, et une réponse du système mécanique est fournie par le modèle dans l'espace des efforts/configurations en fonction des CLs données ainsi que des objectifs de simulation virtuelle (évaluation des efforts requis à développer, simulation de la déformation, calcul de la trajectoire d'A/D, etc.). Ainsi, la simulation de pièces flexibles basée sur le modèle mécanique de poutres flexibles s'inscrit dans le contexte de simulations virtuelles basées sur contrôle en effort/position (Figure 4.9). Ceci signifie que ce modèle est potentiellement adapté aux manipulations virtuelles avec différents types de CLs exprimées dans les espaces des efforts/configurations conformément aux interfaces comportementales actuelles de RV.

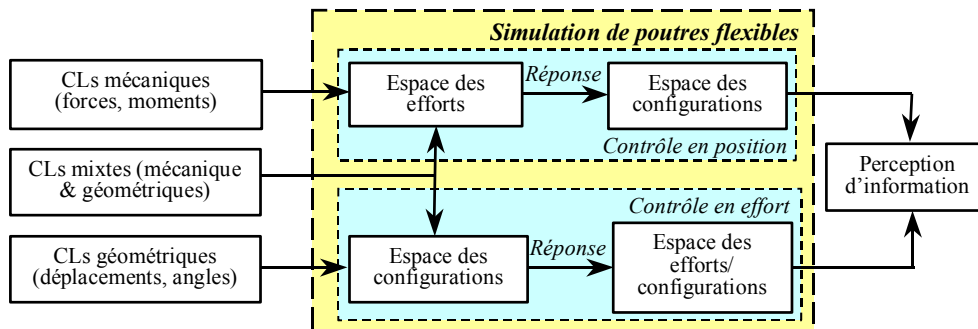


Figure 4.9. Adéquation du modèle de poutres flexibles aux manipulations virtuelles : simulation dans les espaces des efforts/configurations en fonction des CLs.

Il convient également de préciser qu'il existe d'autres efforts extérieurs qui peuvent être appliqués à une pièce virtuelle flexible au cours de sa manipulation. Par exemple, ces efforts peuvent modéliser une opération d'A/D à deux mains ou plus ou représenter des réactions dues à des contacts entre la pièce flexible et les obstacles de son environnement extérieur. Toutefois, ces efforts ne sont pas les CLs en ce qui concerne la résolution du système d'équations différentielles décrivant le comportement de poutres flexibles. En effet, ces efforts sont directement introduits dans l'expression d'équilibre en utilisant, par exemple, une δ -fonction de Dirac (équation (4.35)) et donc, pris en compte lors de la manipulation virtuelle si nécessaire.

Dans le cas particulier des CLs mixtes, par exemple, les CLs mécaniques et géométriques pour l'extrémité manipulée d'une pièce flexible sont fournies, et la réponse du système mécanique au cours de la résolution de l'équation (4.44) sera fournie dans l'espace des efforts mais aussi dans celui des configurations (Figure 4.9) car certaines CLs de nature mécanique et géométrique à l'extrémité manipulée sont inconnues. Dans tous les cas, le nombre total des CLs géométriques et/ou mécaniques est toujours égal à :

- 12 dans le cas 3D : 6 CLs géométriques/mécaniques pour chaque extrémité de la poutre flexible,
- 6 dans le cas 2D : 3 CLs géométriques/mécaniques pour chaque extrémité de la poutre.

4.6. Conclusions

Dans ce chapitre, le modèle de pièces flexibles de type poutres flexibles soumises à des grands déplacements a été présenté. Ce modèle est basé sur un modèle poutre, couramment utilisé dans la mécanique des structures, i.e. la plupart des hypothèses en ce qui concerne la géométrie et la loi de comportement du matériau de la pièce flexible sont valables. Cependant, ce modèle mécanique autorise des grands déplacements entraînant des modifications importantes de la forme de la pièce flexible au cours de sa déformation. Par conséquent, ces déplacements ne sont plus linéaires

géométriquement, ce qui a été démontré par les équations correspondantes (cf. partie géométrique du modèle). Ce fait complique par ailleurs le traitement numérique du problème de déformation : les équations finales décrivant le comportement de pièces de type poutres flexibles sont différentielles et non-linéaires.

Le modèle de poutres flexibles ne traite que le comportement d'une classe donnée de pièces flexibles qui peuvent être modélisées par une poutre dont le matériau est élastique linéaire. Ainsi, ce modèle mécanique fait partie des modèles adaptés, valables pour une classe précise de composants flexibles et intégrable dans un module de simulation virtuelle de pièces déformables. Généralement, le modèle est constitué de deux parties :

- la partie géométrique, décrivant la forme géométrique déformée de la pièce flexible compte tenu de sa forme initiale,
- la partie physique (ou mécanique), formulant l'état d'équilibre mécanique de la pièce flexible à un instant donné durant sa manipulation.

Le modèle présenté est adapté à la problématique de simulation des opérations d'A/D et de maintenance d'une classe donnée de pièces flexibles. D'une part, ces opérations supposent des changements importants de forme géométrique de la pièce flexible au cours de sa manipulation, par exemple, durant son montage. Le modèle mécanique utilisé permet alors de considérer ce type de changements géométriques de façon réaliste au cours de la simulation d'une opération d'A/D.

D'autre part, le modèle de poutres flexibles est soumis à des CLs géométriques et mécaniques qui sont de même nature que celles fournies par les interfaces comportementales actuelles de RV. Ainsi, une catégorie de données d'entrée pour le modèle mécanique (CLs) regroupe des informations d'entrée fournies par les interfaces motrices ou sensori-motrices de RV et définies dans les espaces des efforts/configurations. Les données de sortie produites par le modèle mécanique sont des réponses réalistes de système mécanique dans les espaces des efforts/configurations : forme déformée de la poutre flexible, trajectoire d'A/D, efforts requis pour l'opérateur afin de pouvoir réaliser une opération d'A/D donnée. Les données de sortie générées par le modèle donnent également accès à d'autres informations supplémentaires, utiles lors d'une analyse/optimisation du processus d'A/D ou de maintenance : évaluation d'un état de contrainte dans la pièce au cours de sa manipulation et dans sa position finale de montage, contrôle de la courbure maximale/ minimale (contrainte technologique), prise en compte de contraintes ergonomiques (efforts, déplacements linéaires et angulaires maximum autorisés), etc. Donc, la génération et l'analyse de cet ensemble d'informations de sortie représente le contrôle en effort et/ou en position réalisé à l'aide des interfaces sensorielles de RV : interfaces de visualisation, dispositifs haptiques à retour d'efforts, etc.

Un autre point fort de l'utilisation du modèle présenté est la prise en compte du comportement du matériau de la pièce flexible. Le modèle mécanique est valable dans le domaine des petites déformations, i.e. la loi de comportement d'un matériau utilisé est approximée linéairement. Les caractéristiques du matériau comme les modules d'Young E et d'élasticité transversal G sont directement introduits dans le modèle et donc, forment une autre catégorie de données d'entrée définies par l'utilisateur lors d'une phase de préparation de données pour la simulation virtuelle.

Ainsi, le modèle mécanique présenté répond non seulement aux besoins de la simulation réaliste des opérations d'A/D ou de maintenance de pièces flexibles d'une classe donnée, mais il est aussi potentiellement adapté à des manipulations dans un environnement de RV supposant l'utilisation d'interfaces de contrôle en effort/position. Cependant, il est nécessaire d'évaluer ce modèle du point de vue du temps de réponse, car une autre contrainte forte de toute simulation virtuelle est le calcul en temps réel. Cette évaluation sera effectuée au chapitre suivant, car le problème de temps de calcul est directement lié à la mise en place numérique du modèle.

Il convient également de souligner le problème de modélisation de l'application des CLs mécaniques requises par ce modèle. En effet, le modèle de poutres flexibles autorise l'application d'efforts ponctuels appliqués à l'extrémité de la poutre et considérés comme des CLs, ainsi que des efforts ponctuels ou répartis qui ne sont plus considérés comme les CL mécaniques mais formulés et intégrés directement dans les équations d'équilibre mécanique, par exemple, à l'aide d'une δ -fonction de Dirac (équation (4.35)). Ainsi, la main d'un être humain manipulant une extrémité de la poutre flexible est modélisée comme un ensemble d'efforts ponctuels, i.e. CLs mécaniques appliquées à la ligne moyenne de la poutre, tandis qu'une deuxième main appliquée entre les deux extrémités de la

poutre peut être modélisée par un effort réparti, exprimé en utilisant la δ -fonction. De plus, il est nécessaire de prendre en compte des particularités des opérations d'A/D de pièces flexibles soumises à des grands déplacements : changements géométriques importants de la forme de la pièce lors de sa déformation, changements de direction des forces traduisant l'application de la main d'un opérateur, préhension manuelle de la pièce flexible, etc. Ainsi, le modèle mécanique permet de considérer l'application d'efforts-suiveurs modélisant plus naturellement une main d'être humain manipulant une pièce flexible.

Chapitre 5

Mise en place et études du comportement numérique du modèle

Table des matières

5.1. Introduction	164
5.2. Méthodes numériques employées	164
5.2.1. Problématique de la résolution numérique	164
5.2.2. Méthode de tir	166
5.2.2.1. Principe de la méthode de tir	166
5.2.2.2. Evaluation du Jacobien	168
5.2.3. Méthode de collocation	170
5.3. Simulation dans l'espace des efforts	172
5.3.1. Généralités	172
5.3.2. Etudes expérimentales	173
5.3.3. Chemins de chargement et multiplicité de solutions	175
5.3.4. Exemples de simulation 3D de poutres flexibles	177
5.4. Simulation dans l'espace des configurations	179
5.4.1. Généralités	179
5.4.2. Influence de la solution initiale sur le comportement du MMI	181
5.4.3. Etudes expérimentales	184
5.4.4. Planification de trajectoires d'A/D en 2D	186
5.4.5. Exemple de simulation 3D de poutre flexible	189
5.4.6. Recherche d'une solution par la discrétisation de l'espace	192
5.4.6.1. Principe de la méthode de discrétisation de l'espace	192
5.4.6.2. Exemple de recherche d'une solution en 2D	194
5.5. Conclusions	195

5.1. Introduction

Dans ce chapitre nous nous intéresserons aux problèmes numériques de mise en place du modèle de poutres flexibles (MMI). Ces problèmes sont d'une part liés à la résolution numérique du système d'équations différentielles présentées précédemment. Il faut remarquer que ces équations sont soumises aux CLs en deux points, ce qui représente une difficulté du point de vue de leur résolution et nécessite l'utilisation de méthodes numériques particulières. Ainsi, nous allons présenter une méthode générale, appelée méthode de tir et adaptée aux CLs en deux points, ainsi qu'une nouvelle approche basée sur une méthode de collocation. Par ailleurs, la résolution des équations différentielles nécessitera la spécification de CLs de différentes natures (mécaniques, géométriques) conformément aux données d'entrée qui peuvent être fournies par les interfaces courantes de RV. Par conséquent, des simulations dans deux espaces associés, i.e. ceux des efforts et des configurations définis à partir des CLs mécaniques et géométriques, seront effectuées.

D'autre part, une évaluation du modèle par rapport au temps de calcul et à la qualité de la solution produite par le modèle sera réalisée. En effet, la contrainte la plus forte pour toute simulation virtuelle est le temps de réponse du modèle employé lors d'une telle simulation. Ainsi, nous montrerons que dans certains cas il serait nécessaire d'utiliser une stratégie de recalage des différents modèles adaptés, une stratégie proposée au chapitre 3. En outre, la recherche d'une solution, adéquate par rapport aux CLs imposées, mais aussi réaliste en ce qui concerne la génération d'une forme déformée de la pièce virtuelle flexible ou des efforts inconnus nécessaires à développer, reflète le problème de qualité de la solution recherchée. Ceci est un impact important pour l'utilisation de la solution obtenue pour l'analyse du comportement d'une pièce flexible, la recherche et l'optimisation des trajectoires d'A/D, le choix des séquences d'A/D, etc. En effet, ce problème se résume à l'existence de solutions multiples (Section 2.2.4) liées aux particularités du comportement de pièces flexibles. Ainsi, à travers des exemples numériques, nous illustrerons la possibilité d'avoir une multitude de solutions possibles pour un ensemble des CLs données. Par conséquent, des solutions permettant d'éviter ce type de problème et pilotant la recherche d'une solution convenable, i.e. physiquement réalisable seront proposées et discutées dans ce chapitre.

Par ailleurs, des expériences supplémentaires physiques et numériques ont été mises en place afin de pouvoir vérifier et valider la stratégie proposée pour la recherche d'une solution numérique adéquate, notamment dans le cas de manipulations dans l'espace des configurations. Les résultats de ces tests seront également exposés dans ce chapitre. Ceci nous permettra d'utiliser par la suite la stratégie validée dans des études expérimentales et des caractérisations d'opérations d'A/D de pièces flexibles à partir d'une solution dans les espaces des efforts/configurations fournie par le modèle de poutres flexibles.

5.2. Méthodes numériques employées

5.2.1. Problématique de la résolution numérique

Comme nous l'avons vu précédemment, la manipulation d'une pièce déformable, modélisée par une poutre flexible dans un environnement de RV, peut être ramenée à la simulation d'un comportement mécanique de cette pièce soumise à des CLs à ses deux extrémités. Le schéma de calcul d'une telle pièce représente alors la modélisation mécanique d'une poutre dont un côté est soumis au blocage de certains déplacements (CLs géométriques) et l'autre est manipulé à partir des CLs mécaniques/géométriques fournies par une interface motrice de RV et définies dans les espaces des efforts/configurations. Ainsi, la résolution des équations décrivant le comportement mécanique de poutres flexibles nécessite la définition des CLs en deux points, représentant deux extrémités d'une poutre flexible, et correspond à un problème de résolution d'Equations Différentielles Ordinaires (EDOs) non-linéaires avec des valeurs imposées aux limites.

Analytiquement, il est possible de résoudre l'équation (4.44) pour un système mécanique soumis à des CLs géométriques d'un côté et à des CLs mécaniques correspondant à un moment

constant uniquement de l'autre. Par exemple, considérons le cas d'une flexion de poutre 2D initialement rectiligne et soumise à des grands déplacements dus à un moment constant \bar{T} définissant le chemin de chargement dans l'espace des efforts adimensionnés (Figure 5.1). Selon l'équation (4.50), la géométrie de la pièce déformée peut être exprimée de la façon suivante :

$$\frac{d}{d\bar{s}} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{\theta} \end{bmatrix} = \frac{d}{d\bar{s}} \begin{bmatrix} \cos \bar{\theta} \\ \sin \bar{\theta} \\ \bar{M} \end{bmatrix}, \quad \bar{s} \in [0,1], \quad (5.1)$$

avec $\bar{M} = \bar{T} = \text{const}$, le moment de flexion adimensionné.

Cette pièce est soumise à un moment constant uniquement, donc les efforts internes dans la pièce sont nuls. Les CLs géométriques adimensionnées dans la zone d'encastrement sont :

$$\begin{cases} \bar{x}(0) = 0; \\ \bar{y}(0) = 0; \\ \bar{\theta}(0) = 0. \end{cases} \quad (5.2)$$

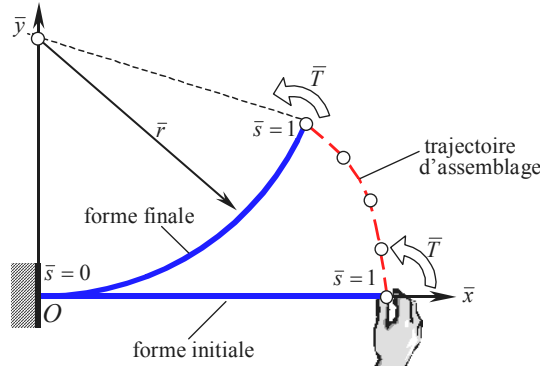


Figure 5.1. Déformation d'une poutre flexible soumise à un moment de flexion.

La troisième équation du système (5.1) permet d'exprimer la solution générale définissant l'angle de rotation de la section courante de la poutre flexible manipulée :

$$\bar{\theta} = \int \bar{M} d\bar{s} = \bar{M} \int d\bar{s} = \bar{M} \bar{s} + C_{\theta}.$$

Compte tenu des CLs géométriques (équation (5.2)), $C_{\theta} = 0$. Donc, on en déduit :

$$\bar{\theta} = \bar{M} \bar{s}, \quad \bar{s} \in [0,1]. \quad (5.3)$$

Les deux premières équations du système (5.1) donnent accès aux coordonnées adimensionnées de la forme déformée de la poutre flexible (solution générale), forme qui est exprimée dans le repère global de la pièce par :

$$\bar{x} = \int \cos \bar{\theta} d\bar{s} = \int \cos(\bar{M} \bar{s}) d\bar{s} = \frac{1}{\bar{M}} \sin(\bar{M} \bar{s}) + C_x, \quad (5.4')$$

$$\bar{y} = \int \sin \bar{\theta} d\bar{s} = \int \sin(\bar{M} \bar{s}) d\bar{s} = -\frac{1}{\bar{M}} \cos(\bar{M} \bar{s}) + C_y. \quad (5.4'')$$

Compte tenu des CLs géométriques (équation (5.2)), $C_x = 0$, $C_y = \frac{1}{\bar{M}}$. Ainsi, on a :

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{1}{\bar{M}} \sin(\bar{M} \bar{s}) \\ \bar{y} = \frac{1}{\bar{M}} [1 - \cos(\bar{M} \bar{s})] \end{cases}, \quad \bar{s} \in [0,1]. \quad (5.5)$$

Les équations obtenues permettent de décrire la forme déformée de la poutre, qui est une réponse du système mécanique dans l'espace des configurations. Cette forme déformée représente en fait un arc de cercle du rayon adimensionné $\bar{r} = 1/\bar{M}$ pour le chargement considéré.

Cependant, les CLs qui sont appliquées à l'extrémité libre de la poutre flexible sont en réalité plus complexes. Par exemple, des forces et des moments non-linéaires, dépendant de la trajectoire d'A/D de la pièce (efforts-suiveurs,...), de la manière dont ces efforts sont appliqués (chemin de chargement,...), d'autres phénomènes physiques (frottement,...), etc. peuvent avoir lieu. Ceci complique significativement la résolution des équations non-linéaires du système (4.44) que celle-ci devient pratiquement impossible analytiquement. Si des CLs géométriques sont imposées au cours de la manipulation d'une pièce virtuelle flexible, la résolution directe théorique des équations du système (4.44) est en général impossible.

Ainsi, l'utilisation de méthodes numériques afin de pouvoir résoudre le système (4.44) est indispensable. De plus, ce système est de type Problème aux Limites (PL). Par conséquent, l'emploi des méthodes numériques connues pour la résolution des EDOs soumises à des conditions initiales, comme la méthode de Newton et celle de Runge-Kutta, n'est plus possible. De ce fait, ce problème nécessite l'utilisation d'autres méthodes numériques, particulièrement adaptées au PL. Dans cette partie, nous allons donc présenter deux méthodes numériques employées dans la mise en place numérique du modèle de poutres flexibles : la méthode la plus générale, appelée « méthode de tir », et la méthode récemment parue dans la littérature, appelée « méthode de collocation » et particulièrement intéressante dans le cas des manipulations de pièces flexibles dans l'espace des efforts.

5.2.2. Méthode de tir

5.2.2.1. Principe de la méthode de tir

La méthode de tir (ou *shooting method* en anglais) est une méthode générale, utilisable dans le cas de PL pour la résolution des EDOs [Cambridge 1992], [Meade & al. 1998]. L'application de cette méthode dans la modélisation et l'étude d'un comportement mécanique de poutres flexibles soumises à des grands déplacements a été étudiée dans [Raboud & al. 1996], [Pai & al. 1996], [Raboud & al. 1997], [Raboud & al. 2001], [Mikchevitch & al./1 2003]. Nous présenterons dans cette partie la base de la méthode de tir et nous discuterons de quelques aspects pratiques concernant son application dans la résolution numérique du système (4.44). Les exemples numériques seront présentés et discutés dans les sections suivantes du présent chapitre.

En effet, l'intérêt principal de l'utilisation de cette méthode est son adaptabilité à des manipulations d'une poutre flexible dans deux espaces à la fois : l'espace des efforts et celui des configurations. Rappelons que les manipulations dans ces espaces sont caractérisées par la définition de CLs mécaniques ou géométriques par l'intermédiaire des interfaces motrices de RV, CLs qui seront appliquées à l'extrémité libre de la poutre flexible. Par exemple, les CLs adimensionnées appliquées à une pièce flexible et caractérisant son état d'équilibre mécanique sont :

- à l'extrémité fixée (encastrement) : $\bar{\mathbf{H}}(0) = [\bar{\mathbf{X}}_f, \bar{\mathbf{\Theta}}_f, \bar{\mathbf{Q}}_f, \bar{\mathbf{M}}_f]^T$ avec $\bar{\mathbf{X}}_f = [\bar{x}_f, \bar{y}_f, \bar{z}_f]^T$ et $\bar{\mathbf{\Theta}}_f = [\bar{\theta}_{1f}, \bar{\theta}_{2f}, \bar{\theta}_{3f}]^T$ les coordonnées et les angles de rotation fixés par l'opérateur, $\bar{\mathbf{Q}}_f = [\bar{Q}_{1f}, \bar{Q}_{2f}, \bar{Q}_{3f}]^T$ et $\bar{\mathbf{M}}_f = [\bar{M}_{1f}, \bar{M}_{2f}, \bar{M}_{3f}]^T$ les forces et les moments internes dans la pièce flexible à l'encastrement,

- à l'extrémité manipulée (réponse du système) : $\bar{\mathbf{H}}(1) = [\bar{\mathbf{X}}_m, \bar{\mathbf{\Theta}}_m, \bar{\mathbf{Q}}_m, \bar{\mathbf{M}}_m]^T$ avec $\bar{\mathbf{X}}_m = [\bar{x}_m, \bar{y}_m, \bar{z}_m]^T$ et $\bar{\mathbf{\Theta}}_m = [\bar{\theta}_{1m}, \bar{\theta}_{2m}, \bar{\theta}_{3m}]^T$ les coordonnées et les angles de rotation, $\bar{\mathbf{Q}}_m = [\bar{Q}_{1m}, \bar{Q}_{2m}, \bar{Q}_{3m}]^T$ et $\bar{\mathbf{M}}_m = [\bar{M}_{1m}, \bar{M}_{2m}, \bar{M}_{3m}]^T$ les forces et les moments internes dans la section extrême manipulée.

Par exemple, pour la manipulation d'une poutre flexible dans l'espace des configurations, les CLs connues fournies par une interface motrice de localisation spatiale de RV sont géométriques, i.e. les vecteurs $\bar{\mathbf{X}}_m$ et $\bar{\mathbf{\Theta}}_m$. Ainsi, le problème de modélisation du comportement d'une pièce flexible se résume à l'évaluation d'une réponse du système mécanique dans l'espace des efforts $\{\bar{\mathbf{Q}}, \bar{\mathbf{M}}\}$ afin de pouvoir déterminer les CLs mécaniques inconnues requises à l'extrémité manipulée $\bar{\mathbf{Q}}_m$ et $\bar{\mathbf{M}}_m$, i.e. les vecteurs des forces et des moments à appliquer pour atteindre la configuration géométrique imposée par l'opérateur. Par ailleurs, il faut remarquer que dans le cas de l'évaluation des efforts-suiveurs externes appliqués à la poutre flexible (CLs mécaniques), leurs valeurs sont égales aux valeurs des efforts internes dans la section extrême de la poutre.

Dans le cas d'une manipulation dans l'espace des efforts, les vecteurs $\bar{\mathbf{Q}}_m$ et $\bar{\mathbf{M}}_m$ (CLs mécaniques) sont fournis par une interface haptique de RV. Par conséquent, le système de simulation de RV doit fournir une réponse du système mécanique en ce qui concerne les CLs géométriques $\bar{\mathbf{X}}_m$ et $\bar{\mathbf{\Theta}}_m$ ainsi que la forme déformée dans l'espace des configurations associé $\{\bar{\mathbf{X}}, \bar{\mathbf{\Theta}}\}$.

La méthode de tir a donc pour le but de fournir une telle réponse mécanique si des CLs mécaniques ou géométriques sont définies. Le principe de cette méthode consiste en un « tir » d'une solution à partir d'une solution initiale définie à une extrémité de la poutre afin de satisfaire les CLs définies sur l'autre extrémité. La recherche d'une telle solution passe alors par la résolution du système d'EDOs (4.44), exprimé sous la forme $\mathbf{y}'_s = \mathbf{f}(y_i, \bar{s}), i = \{1, 2, \dots, 12\}$, à partir d'une solution issue du « tir », qui représente donc les conditions initiales. Le processus de recherche de solution se résume à la comparaison du résultat obtenu avec les CLs exactes, définies à l'aide d'une interface motrice de RV. Le processus de recherche de la solution \mathbf{y} du système d'EDOs se termine si cette solution satisfait les CLs données. Ainsi, une telle solution représente la réponse \mathbf{H} recherchée du système mécanique dans l'espace des efforts/configurations.

Par exemple, considérons la manipulation d'une pièce modélisée par une poutre flexible dans l'espace des configurations. Dans ce cas, les CLs mécaniques inconnues sont celles appliquées à deux extrémités de la pièce, i.e. les vecteurs des efforts $\mathbf{b}_f = [\bar{\mathbf{Q}}_f, \bar{\mathbf{M}}_f]^T$ et $\mathbf{b}_m = [\bar{\mathbf{Q}}_m, \bar{\mathbf{M}}_m]^T$ avec \mathbf{b}_m représentant la réponse mécanique recherchée du système dans l'espace des efforts. Ainsi, d'après la méthode de tir, le processus de recherche d'une solution \mathbf{y} du système d'EDOs s'effectue selon l'algorithme suivant (Figure 5.2) :

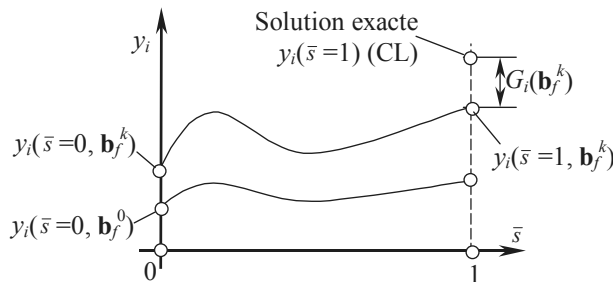


Figure 5.2. Schéma de recherche d'une solution \mathbf{y} du système d'EDOs selon la méthode de tir.

1. Initialisation d'une solution initiale \mathbf{b}_f^0 , de l'erreur maxi Δ .
2. Organisation d'une boucle de recherche de solution du système d'EDOs :

Début de la boucle

- 2.1. Résolution du système d'EDOs $\mathbf{y}'_s = \mathbf{f}(\mathbf{y}, \bar{s})$, $\bar{s} \in [0,1]$, avec les conditions initiales $\bar{\mathbf{X}}_f$, $\bar{\Theta}_f$ et \mathbf{b}_f^k .
- 2.2. Calcul de la fonction objectif à minimiser :

$$\mathbf{G}(\mathbf{b}_f^k) = \left\| \left\{ \bar{\mathbf{X}}(\bar{s} = 1, \mathbf{b}_f^k) - \bar{\mathbf{X}}_m \right\} \left\{ \bar{\Theta}(\bar{s} = 1, \mathbf{b}_f^k) - \bar{\Theta}_m \right\} \right\|.$$
- 2.3. Si $\mathbf{G}(\mathbf{b}_f^k) \geq \Delta$, calculer une nouvelle solution initiale :

$$\mathbf{b}_f^{k+1} = \mathbf{b}_f^k + \delta \mathbf{b}_f^k.$$

Sinon, sortie de la boucle.

Fin de la boucle

3. Perception des réponses mécaniques évaluées dans l'espace des efforts/configurations si un résultat est obtenu. Sinon, envoi d'un message d'erreur.

Ainsi, lors de la recherche d'une solution du système d'EDOs, la minimisation d'une fonction objectif représentant, par exemple, la différence normée entre la solution courante du système d'EDOs et la solution exacte du PL, est nécessaire :

$$\mathbf{G}(\mathbf{b}_f^k) = \left\| \left\{ \bar{\mathbf{X}}(\bar{s} = 1, \mathbf{b}_f^k) - \bar{\mathbf{X}}_m \right\} \right\| \rightarrow \min \quad (5.6)$$

Lorsque cette différence est supérieure à une erreur fixée, par exemple, $\Delta = 10^{-3}$ pour le système adimensionné, une autre évaluation de la solution initiale du système d'EDOs et donc, un nouveau « tir » sont indispensables. L'évaluation d'une nouvelle solution (étape 2.3 de l'algorithme) s'effectue à partir de l'expression ci-dessous :

$$\mathbf{b}_f^{k+1} = \mathbf{b}_f^k + \delta \mathbf{b}_f^k = \mathbf{b}_f^k - \left[\frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{b}_f^k)}{\partial \mathbf{b}_f^k} \right]^{-1} \mathbf{G}(\mathbf{b}_f^k). \quad (5.7)$$

5.2.2.2. Evaluation du Jacobien

La principale difficulté dans la résolution du système (4.44) consiste en l'évaluation d'une nouvelle solution initiale \mathbf{b}_f^{k+1} ou, plus précisément, en l'évaluation d'un terme représentant le Jacobien. Présenterons une méthode basée sur la résolution des EDOs supplémentaires et permettant donc d'évaluer précisément le Jacobien inconnu. Pour cela, il est utile d'utiliser une nouvelle notation plus uniforme, adaptée au calcul numérique :

- le système d'EDOs (4.44) adimensionné est représenté sous la forme suivante : $\mathbf{y}'_s = \mathbf{f}(y_i, \bar{s})$, $i = \{1, 2, \dots, 12\}$, $\bar{s} \in [0,1]$. Par exemple, $d\bar{x}/d\bar{s} = dy_1/d\bar{s}$ avec $\bar{x}(0) = y_1(0)$ et $\bar{x}(1) = y_1(1)$ les CLs correspondantes déterminées numériquement,

- le vecteur $\mathbf{b} = [b_1, b_2, \dots, b_6]^T$ regroupe les CLs mécaniques inconnues dans d'encastrement de la poutre flexible, i.e. $\mathbf{b} = \mathbf{b}_f$. Par exemple, $b_1 = \bar{Q}_1(0) = y_7(0)$, etc. Les composantes $b_j, j = \{1, 2, \dots, 6\}$, sont les inconnues,
- le vecteur $\mathbf{G}(\mathbf{b}_f^k)$ est représenté sous la forme $\mathbf{G} = [G_1, G_2, \dots, G_6]^T$. Ainsi, les composantes de ce vecteur peuvent être calculées de la façon suivante : $\mathbf{G} = \mathbf{y}(1) - \bar{\mathbf{H}}(1)$. Par exemple, $G_1 = y_1(\bar{s} = 1, \mathbf{b}) - \bar{x}_m = y_1(1) - \bar{x}_m$.

Ainsi, les composantes du Jacobien peuvent être exprimées de façon plus simple. Par exemple, on obtient pour la première composante :

$$\frac{\partial G_1}{\partial b_1} = \frac{\partial}{\partial b_1} (y_1(\bar{s} = 1, \mathbf{b}) - \bar{x}_m) = \frac{\partial y_1(1)}{\partial b_1}, \text{ car } \bar{x}_m = \text{const.}$$

Donc, l'expression du Jacobien est :

$$\frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{b}_f^k)}{\partial \mathbf{b}_f^k} = \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{b})}{\partial \mathbf{b}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial G_1}{\partial b_1} & \frac{\partial G_1}{\partial b_2} & \dots & \frac{\partial G_1}{\partial b_6} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial G_6}{\partial b_1} & \frac{\partial G_6}{\partial b_2} & \dots & \frac{\partial G_6}{\partial b_6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_1(1)}{\partial b_1} & \frac{\partial y_1(1)}{\partial b_2} & \dots & \frac{\partial y_1(1)}{\partial b_6} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial y_6(1)}{\partial b_1} & \frac{\partial y_6(1)}{\partial b_2} & \dots & \frac{\partial y_6(1)}{\partial b_6} \end{bmatrix}. \quad (5.8)$$

Ainsi, l'évaluation du Jacobien se réduit au calcul des termes $\partial y_i(1)/\partial b_j, i, j = \{1, 2, \dots, 6\}$. Afin de pouvoir les calculer, des équations différentielles supplémentaires ont été utilisées. Introduisons un vecteur $\mathbf{Y} = [\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2, \dots, \mathbf{Y}_6]^T$ contenant les termes inconnus à déterminer :

$$\mathbf{Y}_j = \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial b_j}, \quad j = \{1, 2, \dots, 6\}. \quad (5.9)$$

Chaque vecteur \mathbf{Y}_j contient douze composantes inconnues. Pour exprimer des équations supplémentaires, déterminons par exemple la dérivée première du vecteur \mathbf{Y}_1 par rapport à l'abscisse curviligne adimensionnée \bar{s} :

$$\frac{\partial}{\partial \bar{s}} (\mathbf{Y}_1) = \frac{\partial}{\partial \bar{s}} \left(\frac{\partial \mathbf{y}}{\partial b_1} \right) = \frac{\partial^2 \mathbf{y}}{\partial \bar{s} \partial b_1} = \frac{\partial}{\partial b_1} \left(\frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \bar{s}} \right) = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial b_1} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \cdot \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial b_1} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \cdot \mathbf{Y}_1.$$

Ainsi, on obtient six EDOs supplémentaires à résoudre afin de pouvoir déduire les variables inconnues \mathbf{Y}_j permettant de calculer les composantes du Jacobien :

$$\frac{\partial \mathbf{Y}_j}{\partial \bar{s}} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \cdot \mathbf{Y}_j = \mathbf{K} \cdot \mathbf{Y}_j, \quad j = \{1, 2, \dots, 6\}, \quad (5.10)$$

avec : $\mathbf{Y}_j(0)$ les conditions initiales correspondantes, \mathbf{K} la matrice calculée de la manière suivante :

$$\mathbf{K} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial y_1} & \frac{\partial f_1}{\partial y_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial y_{12}} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_{12}}{\partial y_1} & \frac{\partial f_{12}}{\partial y_2} & \dots & \frac{\partial f_{12}}{\partial y_{12}} \end{bmatrix}, \text{ où } \mathbf{f}(y_i, \bar{s}) = \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \bar{s}}, i = \{1, 2, \dots, 12\} \text{ est le système d'EDOs (4.44).}$$

Par exemple, les conditions initiales $\mathbf{Y}_1(0)$ pour l'équation (5.10) lorsque $j = 1$ sont :

$$\frac{\partial y_i(0)}{\partial b_1} = 0 \text{ pour } i = \{1, 2, \dots, 6, 8, 9, \dots, 12\}, \quad \frac{\partial y_7(0)}{\partial b_1} = 1, \text{ car } y_7(0) = b_1.$$

Ainsi, à chaque nouvelle itération ($k+1$) selon l'équation (5.7), la résolution de (12×6) EDOs supplémentaires est effectuée d'après l'équation (5.10) afin de calculer précisément les composantes du Jacobien $\partial y_i(1)/\partial b_j, i, j = \{1, 2, \dots, 6\}$. Par conséquent, le temps de réponse du système mécanique selon la méthode de tir peut être assez important. Cependant, cette méthode permet potentiellement de répondre aux contraintes de recherche d'une solution du PL compte tenu d'une incertitude dans l'évaluation d'une solution physiquement réalisable. Notamment, ceci est particulièrement important dans le cas de manipulations dans l'espace des configurations lorsque le problème de solutions multiples existe (Section 2.2.4). Les exemples numériques d'application de la méthode de tir seront présentés dans les sections suivantes de présent chapitre.

Il reste également à préciser qu'une méthode de Runge-Kutta du 4^{ème} ordre a été utilisée pour la résolution des équations différentielles (5.10) et les équations du système (4.44) soumises à des conditions initiales \mathbf{b}_f^k à l'intérieur de la boucle de la méthode de tir.

5.2.3. Méthode de collocation

La méthode de tir est une méthode générale qui peut être utilisée dans la résolution d'un PL lorsqu'une ou plusieurs solutions satisfaisant des CLs données existent (la manipulation d'une poutre flexible dans l'espace des configurations, par exemple). Lorsqu'une seule solution existe physiquement (manipulation dans l'espace des efforts), il est possible d'utiliser des autres méthodes numériques plus rapides. Pour ce type de PL, les méthodes de discrétisation dites aussi les méthodes de collocation ou de différences finies peuvent être utilisées [Gupta 1985], [Hanke & al. 1985], [Cash 1988], [Keller 1992], [Enright & al. 1993], [Ascher & al. 1995].

Le principe de ces méthodes consiste en une approximation d'une solution exacte inconnue par une fonction quelconque ou plutôt par sa discrétisation représentant une solution numérique approximée. Dans ce cas, l'hypothèse d'existence de la solution est formulée afin de pouvoir approximer cette dernière par son équivalent discret. Finalement, le problème de résolution d'un système d'EDOs $\mathbf{y}'_s = \mathbf{f}(\mathbf{y}, \bar{s})$ soumises aux CLs en deux points se réduit à la résolution d'un système d'équations algébriques non-linéaires représentant la solution recherchée sous forme discrète. Ces équations sont souvent exprimées en utilisant des différences finies pour décrire un équivalent discret des dérivées des fonctions du système d'EDOs. Par conséquent, la discrétisation d'un domaine de variation de l'argument \bar{s} est requise. Ainsi, quelques problèmes numériques liés à une telle discrétisation peuvent être cités :

- le choix d'une discrétisation adéquate afin d'assurer la convergence de la méthode tout en préservant une bonne précision entre les solutions exacte et numérique,

- la discrétisation ne doit pas être trop fine ; dans le cas contraire, un système d'équations algébriques de taille très importante est généré, ce qui entraîne une augmentation du temps de calcul.

Par ailleurs, une solution initiale \mathbf{y}^0 est requise afin de pouvoir résoudre le système d'équations algébriques obtenu. La résolution de ce dernier est souvent basée sur les méthodes itératives connues comme celles de Newton, de corde, etc. [Ascher & al. 1995], [Kierzenka 1998]. Il faut également préciser que la discrétisation du domaine limité par les frontières (CLs) n'est pas celle représentant un maillage pour la modélisation de comportement d'une structure utilisant la MEF. Dans le cas présent, la discrétisation est nécessaire uniquement pour la résolution numérique du PL.

La méthode utilisée dans notre PL est basée sur le principe général de recherche d'une solution unique à partir d'une procédure de discrétisation présentée ci-dessous. Cette méthode, proposée dans [Kierzenka 1998], [Kierzenka 2000] et intégrée dans l'environnement de calcul scientifique Matlab 6 [MathWorks 2002], a des avantages particuliers :

- une solution pour chaque équation du système d'EDOs est approximée par une fonction polynomiale cubique $S(\bar{s})$ sur chaque intervalle $h_i = [\bar{s}_i, \bar{s}_{i+1}]$ du domaine discrétisé $\bar{s} \in [0,1]$ en utilisant une formule de Simpson du 4^{ème} ordre :

$$y_{i+1} = y_i + \frac{h_i}{6} (f_i + 4f_{(i+1)/2} + f_{i+1}), \quad (5.11)$$

avec : $y_i = S(\bar{s}_i)$ la valeur de la fonction approximant la solution au point courant \bar{s}_i , $f_i = f(y_i, \bar{s}_i)$ et $f_{i+1} = f(y_{i+1}, \bar{s}_{i+1})$ les dérivés de y_i calculées dans les points \bar{s}_i et \bar{s}_{i+1} à partir du système donné $\mathbf{y}'_s = \mathbf{f}(\mathbf{y}, \bar{s})$, $f_{(i+1)/2}$ est évaluée au milieu de l'intervalle h_i par :

$$f_{(i+1)/2} = f\left(\left(\frac{y_i + y_{i+1}}{2} - \frac{h_i}{8}(f_{i+1} - f_i)\right), \left(\bar{s}_i + \frac{h_i}{2}\right)\right), \quad (5.12)$$

- le contrôle d'une erreur $r(\bar{s}_{(i+1)/2})$ au niveau local sur l'intervalle h_i . Cette erreur est évaluée au milieu de chaque intervalle h_i et dépend de la dérivée de la solution,
- la discrétisation adaptative en fonction de la valeur de l'erreur médiane sans la création d'un système conséquent d'équations algébriques et donc, sans un encombrement inutile de la mémoire de l'ordinateur.

Ainsi, selon la méthode de collocation [Kierzenka 2000], l'algorithme de résolution d'un système d'EDOs (4.44), représenté sous la forme $\mathbf{y}'_s = \mathbf{f}(\mathbf{y}, \bar{s})$, se résume à :

1. Initialisation des vecteurs de discrétisation initiale $\bar{\mathbf{s}} = [\bar{s}_0, \bar{s}_1, \dots, \bar{s}_n]^T$ et de solution initiale \mathbf{y}^0 .
2. Expression du système d'EDOs $\mathbf{y}'_s = \mathbf{f}(\mathbf{y}, \bar{s})$ sous la forme d'un système d'équations algébriques $\mathbf{F}(\mathbf{Y}, \bar{\mathbf{s}}) = 0$, avec $\mathbf{Y} = [y_0, y_1, \dots, y_n]^T$ la solution numérique approximant la solution de chacune des EDOs $\mathbf{f}(\mathbf{y}, \bar{s})$ données aux points \bar{s}_i . Les équations \mathbf{F} du système sont formées à l'aide des équations (5.11), (5.12) ainsi que des équations supplémentaires faisant intervenir les CLs $\mathbf{g}(y_0, y_n)$:

$$\mathbf{F}_0(\mathbf{Y}, \bar{\mathbf{s}}) = \mathbf{g}(y_0, y_n) = \mathbf{g}(y_0(0), y_n(1)) = [\bar{\mathbf{X}}_f, \bar{\boldsymbol{\Theta}}_f, \bar{\mathbf{Q}}_m, \bar{\mathbf{M}}_m]^T,$$

$$\mathbf{F}_i(\mathbf{Y}, \bar{\mathbf{s}}) = \mathbf{y}_i - \mathbf{y}_{i-1} - \frac{h_{i-1}}{6} (\mathbf{f}_{i-1} + 4\mathbf{f}_{(i-1)/2} + \mathbf{f}_i), \quad i = \{1, 2, \dots, n\}.$$

3. Organisation d'une boucle de recherche d'une solution numérique \mathbf{y} du système $\mathbf{F}(\mathbf{Y}, \bar{\mathbf{s}}) = 0$ par une méthode itérative (de corde, de Newton, ...) :

Début de la boucle

- 3.1. Résolution du système d'EDOs $\mathbf{F}(\mathbf{Y}, \bar{\mathbf{s}}) = 0$, avec la solution initiale \mathbf{y}^0 .
 - 3.2. Calcul d'une erreur médiane locale sur l'intervalle h_i [Kierzenka 2000] :

$$\mathbf{r}(\bar{s}_{(i+1)/2}) = \frac{3}{2h_i} \mathbf{F}_{i+1}.$$
 - 3.3. Si $\mathbf{r}(\bar{s}_{(i+1)/2}) \geq \Delta$, tolérance fixée initialement (par exemple, 10^{-5}), calculer une nouvelle solution initiale :

$$\mathbf{y}^{k+1} = \mathbf{y}^k + \delta \mathbf{y}^k = \mathbf{y}^k - \left[\frac{\partial \mathbf{F}_i}{\partial \mathbf{y}_i^k} \right]^{-1} \mathbf{F}_i.$$
 - Sinon, sortie de la boucle.
 - 3.4. Si $\mathbf{r}(\bar{s}_{(i+1)/2}) \geq \lambda \cdot \Delta$ (où λ est un facteur constant fixé, par exemple, $\lambda = 100$ [Kierzenka 2000]), ajouter un point supplémentaire \bar{s}_i à l'intervalle h_i , i.e. affiner la discrétisation initiale.
- Fin de la boucle

4. Perception des réponses mécaniques évaluées dans l'espace des efforts/configurations si le résultat est obtenu. Sinon, envoi d'un message d'erreur.

Lors de la résolution du système d'équations algébriques $\mathbf{F}(\mathbf{Y}, \bar{\mathbf{s}}) = 0$, le Jacobien peut être évalué par des différences finies [Enright & al. 1993], [Shampine & al. 1997], [Kierzenka 2000]. En fonction de la valeur de l'erreur, le Jacobien peut être estimé approximativement. Par exemple, si l'erreur ne varie plus de façon importante au bout de quelques itérations, le Jacobien à évaluer pour l'itération suivante peut être remplacé par le même Jacobien que celui utilisé à l'itération précédente. Dans ce que la méthode itérative employée devient la méthode quasi-newtonienne. De même, si l'erreur locale ne varie pas significativement lors du passage d'un point \bar{s}_i à un point \bar{s}_{i+1} , une nouvelle colonne du Jacobien peut être formée à partir d'une colonne correspondant à y_i . Par conséquent, cette opération permet de réduire le coût de calcul du Jacobien et donc, de diminuer le temps général de recherche d'une solution du système d'EDOs.

5.3. Simulation dans l'espace des efforts

5.3.1. Généralités

La simulation dans l'espace des efforts représente la modélisation de comportement d'une pièce flexible soumise à des efforts extérieurs. Ces efforts sont générés par un opérateur à partir d'un certain travail musculaire lors d'une opération d'A/D ou de maintenance d'une pièce. Ainsi, les efforts développés lors d'une telle manipulation sont mesurés par le capteur d'efforts d'une interface haptique et transmis à l'aide des métaphores d'interactions (modélisation des CLs mécaniques) à un système de

simulation de RV. Par conséquent, les efforts extérieurs exprimés sous la forme de CLs mécaniques sont appliqués à la pièce virtuelle flexible. Alors, une modélisation de déformation de la pièce flexible à partir d'un MMI/MTR est effectuée : une réponse du système mécanique dans l'espace des configurations est générée et donc, le contrôle en position est réalisé.

Le modèle de poutres flexibles (MMI) considéré doit produire une réponse réaliste et rapide dans l'espace des configurations, i.e. la trajectoire d'A/D ainsi que la séquence de toutes les formes géométriques d'une poutre virtuelle flexible déformée sous une charge donnée. En fait, le modèle mécanique fournit toutes les lignes axiales de la poutre déformée au cours de la manipulation virtuelle. Ces lignes permettent ainsi de déduire la trajectoire d'A/D (trajectoire d'une extrémité de la pièce) ainsi que de reconstituer toutes les formes géométriques déformées compte tenu de la géométrie de la section courante (ses dimensions et orientation). Rappelons également que dans le cas de la simulation dans l'espace des efforts, la réponse produite par un tel MMI dans l'espace des configurations est unique (Section 2.2.4) et dépend du chemin de chargement défini par l'opérateur lors de la manipulation en temps réel.

Selon de nombreux tests numériques effectués dans l'espace des efforts, le temps CPU de génération d'une seule forme déformée d'une pièce souple modélisée par une poutre flexible varie entre 0,06 et 1 s (sur un PC avec un processeur 800 MHz et 380 MB de RAM) et dépend de différents éléments mis en jeu. Notamment, on peut citer les facteurs suivants :

- l'intensité des efforts extérieurs appliqués ainsi que le chemin de chargement,
- CLs mécaniques linéaires ou non : efforts-suiveurs, efforts conservatifs, forces dues à un frottement, etc.,
- le nombre de mains utilisées pour une opération d'A/D donnée,
- la géométrie initiale de la pièce flexible,
- la simulation 2D ou 3D,
- le nombre de formes déformées par la trajectoire d'A/D, ce qui représente l'intensité des mouvements ou autrement dit, la qualité des déplacements de la main virtuelle,
- la méthode numérique utilisée pour le PL donné, etc.

Dans cette partie nous allons évaluer le MMI ainsi que les méthodes numériques employées du point de vue du réalisme et de la stabilité numérique. Ceci est important vis-à-vis des contraintes fortes de simulation virtuelle d'un comportement de pièces flexibles : la génération de données réalistes en terme de géométrie de la poutre flexible déformée. Nous montrerons également quelques exemples de simulations numériques en mettant en évidence l'importance de certains facteurs ci-dessus. Notamment, certains aspects liés aux différents chemins de chargement possibles et donc, montrant la physique du problème de multiplicité de solutions seront discutés. Nous comparons également les méthodes numériques employées du point de vue du temps de réponse.

5.3.2. Etudes expérimentales

Différentes études expérimentales ont été réalisées afin de pouvoir évaluer le MMI de poutres flexibles du point de vue de l'intégration possible de ce MMI dans un environnement de simulation d'A/D virtuel compte tenu du réalisme requis dans la simulation d'un comportement de pièces flexibles. Premièrement, les résultats numériques expérimentaux produits par le MMI ont été comparés avec ceux obtenus à partir d'une étude théorique effectuée pour un cas de charge particulier. En effet, il est possible d'obtenir un résultat théorique exact en ce qui concerne la forme déformée de la poutre 2D lorsqu'un moment constant de flexion $\bar{M}(1)$ est appliqué (équation (5.5)). Ainsi, ce résultat exact peut-être comparé à un résultat numérique en contrôlant les coordonnées adimensionnées des points de contrôle P_i^C sur l'axe de la poutre déformée (Figure 5.3). Le tableau 5.1. présente quelques résultats obtenus théoriquement et numériquement lorsque le moment adimensionné $\bar{M}(1) = 2$ est développé par l'utilisateur et appliqué à l'extrémité de la poutre flexible encastree. Pour la résolution du système d'EDOs (4.50), la méthode de collocation a été utilisée.

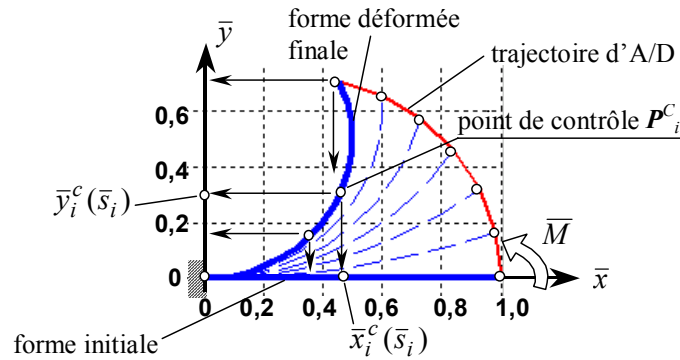


Figure 5.3. Réponse du système mécanique dans l'espace des configurations.

Abscisse curviligne \bar{s}_i	Coordonnées de P_i^C obtenues théoriquement (équation (5.5))		Coordonnées de P_i^C obtenues numériquement (MMI de poutres flexibles)	
	$\bar{x}_i^c \text{ théor}(\bar{s}_i)$	$\bar{y}_i^c \text{ théor}(\bar{s}_i)$	$\bar{x}_i^c \text{ num}(\bar{s}_i)$	$\bar{y}_i^c \text{ num}(\bar{s}_i)$
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,4	0,3587	0,1516	0,3587	0,1516
0,6	0,4660	0,3188	0,4660	0,3188
1,0	0,4546	0,7081	0,4546	0,7081

Tableau 5.1. Comparaison de résultats théoriques et numériques.

Les résultats obtenus numériquement permettent de conclure que le MMI de poutres flexibles mis en place produit des données réalistes avec une convergence satisfaisante, en ce qui concerne les résultats théoriques et numériques, sous la condition que les CLs mécaniques modélisant les efforts développés réellement par l'opérateur soient adéquates. Cette adéquation dépend en particulier de la qualité des mesures (capteurs d'effort) ainsi que des métaphores d'interaction mises en œuvre.

Une autre étude expérimentale, basée cette fois-ci sur la comparaison des résultats de mesures de la déformation d'une pièce flexible réelle avec ceux produits numériquement par le MMI, a été effectuée [Mikchevitch & al./3 2003]. Afin de pouvoir réaliser cette analyse, des données expérimentales de l'étude d'une pièce souple modélisée par une poutre flexible du projet européen DMU-VI [Léon & al. 1999], [Léon & al. 2001] ont été utilisées.

Cette pièce flexible est un composant de type durit de BMW, i.e. tuyau souple utilisé dans un véhicule. Le tuyau est constitué généralement de multiples matériaux. Dans le cas présent, la pièce est composée d'un tuyau plastique à l'intérieur, un tissu et des fils métalliques orientés à $\pm 45^\circ$ à l'extérieur (Figure 5.4a). Donc, cette pièce a un comportement mécanique complexe et peut produire des grands déplacements.

Lors de l'étude expérimentale de déformation en flexion sous des chargements plans donnés (forces \vec{F}_i), les déplacements ont été mesurés sur la durit. Les résultats du projet européen ont permis de mettre en évidence les grands déplacements et les transformations géométriques non-linéaires qui peuvent avoir lieu lors des opérations d'A/D de pièces flexibles dont le comportement mécanique est inconnu.

Une modélisation EF dans l'environnement Ansys 5.6 avait été effectuée afin de pouvoir identifier certains paramètres de la durit pour sa modélisation numérique :

- module d'Young équivalent constant E ($E \approx 7$ MPa),
- éléments permettant de réaliser la modélisation EF dans le domaine de grands déplacements aussi fidèlement possible.

$$\begin{cases} \bar{Q}(1) = \bar{F}_1 \cos \bar{\theta}(1) \\ \bar{N}(1) = \bar{F}_1 \sin \bar{\theta}(1) \end{cases} \quad (5.13)$$

Si les forces extérieures \bar{F}_1 et \bar{F}_2 sont appliquées à la pièce virtuelle simultanément et proportionnellement, ce qui correspond au chemin de chargement $\{a \rightarrow b\}$ représenté sur la Figure 5.5a, le MMI de poutres flexibles mis en place fournit une réponse unique dans l'espace des configurations associé (Figure 5.5b) : les formes déformées de la pièce et la trajectoire d'A/D. Par ailleurs, il est possible d'évaluer l'état contraint dans la pièce au cours de sa manipulation en temps réel à partir des efforts internes calculés. La figure 5.5c représente un exemple de tel calcul pour la forme déformée, correspondant à la configuration finale de montage/démontage, et met en évidence le caractère non-linéaire de distribution des efforts internes dans la pièce flexible.

Cependant, afin d'atteindre la configuration finale b , caractérisée par les CLs géométriques en termes de position et d'orientation de l'extrémité manipulée ainsi que par la forme déformée finale, il est possible physiquement de réaliser beaucoup de chemins de chargement différents de $\{a \rightarrow b\}$. Cela signifie que malgré les mêmes valeurs des efforts extérieurs appliqués, malgré la forme déformée finale identique pour les charges considérées, caractérisées seulement par des chemins de chargement distincts, les trajectoires d'A/D ainsi que les séquences correspondantes des formes déformées intermédiaires de la pièce flexible donnée ne seront pas similaires. Ce fait est illustré par les Figures 5.5 d, e représentant des exemples de différents chemins de chargement possibles $\{a \rightarrow c \rightarrow b\}$ et $\{a \rightarrow d \rightarrow b\}$. Ce phénomène illustre le problème de solutions multiples, en ce qui concerne l'existence de différents chemins de chargement et trajectoires d'A/D possibles, et montre également des difficultés éventuelles qui peuvent être rencontrées lors de la simulation de pièces flexibles dans l'espace des configurations.

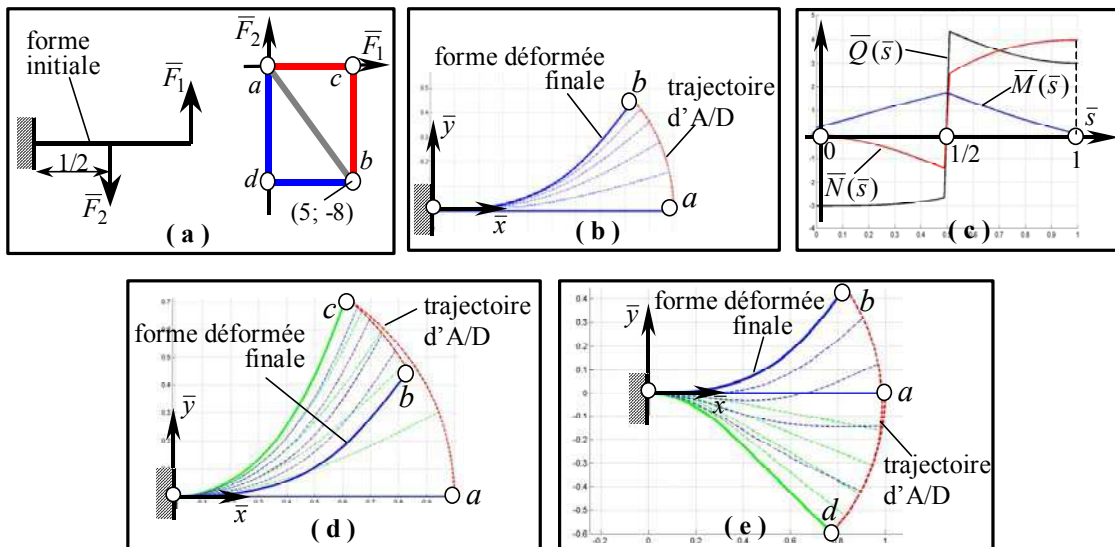


Figure 5.5. Planification de trajectoires d'A/D d'une poutre flexible 2D :
 (a) différents chemins de chargement possibles, (b) trajectoire d'A/D pour le chargement $\{a \rightarrow b\}$,
 (c) efforts internes dans la poutre flexible déformée pour la forme finale,
 (d) trajectoire d'A/D pour le chemin de chargement $\{a \rightarrow c \rightarrow b\}$,
 (e) trajectoire d'A/D pour le chemin de chargement $\{a \rightarrow d \rightarrow b\}$.

En effet, le cas considéré correspond au problème de grands déplacements, lorsque le principe de superposition des efforts n'est plus valable, i.e. les déplacements de la pièce flexible ne sont plus considérés comme indépendants de l'ordre d'application des efforts extérieurs. Cela signifie que lors de l'application de plusieurs efforts à une pièce flexible (Figure 5.5), l'effet de tous ces efforts – déformation de la forme provenant de chaque effort séparément – ne peut être obtenu comme la somme de ces efforts.

Toutefois, il convient de souligner que la réponse dans l'espace des configurations est toujours unique pour le chemin de chargement défini. Cette réponse devient multiple si différents chemins de chargement sont envisagés, mais elle reste toujours unique pour chaque chemin de chargement. Ainsi, l'unicité de la solution dans l'espace des configurations est une propriété intéressante à exploiter lorsque la simulation de la pièce flexible est effectuée dans l'espace des efforts. De ce fait, il est nécessaire de favoriser le développement des interfaces haptiques de RV permettant de mesurer les efforts appliqués par l'opérateur. Par conséquent, ceci permettrait d'éviter le problème de multiplicité de solutions, problème caractéristique rencontré lors de la simulation de pièces flexibles dans l'espace des configurations et dont les conséquences seront discutées à la Section 5.4.

5.3.4. Exemples de simulation 3D de poutres flexibles

Dans cette partie nous allons présenter et discuter des résultats de simulations 3D d'une poutre flexible dans l'espace des efforts. En effet, les modélisations 3D sont les plus répandues pour les simulations virtuelles et notamment, les simulations des opérations d'A/D ou de maintenance virtuelles de pièces flexibles. Ainsi, il convient d'évaluer le MMI de poutres flexibles dans le cas 3D du point de vue du temps de réponse du système – la contrainte la plus importante pour toute simulation virtuelle.

La Figure 5.6 représente une simulation 3D d'une pièce souple modélisée par une poutre flexible soumise à des grands déplacements sous une charge adimensionnée donnée : les efforts-suiveurs de flexion $\bar{Q}_2(1) = 1$ et $\bar{Q}_3(1) = 1,5$ ainsi que le moment de torsion $\bar{M}_1(1) = 1$. Ainsi, cette charge définit des CLs mécaniques dans l'espace des efforts $(\bar{Q}_2, \bar{Q}_3, \bar{M}_1)$. Les valeurs de ces CLs ainsi que la manière dont ils sont appliqués détermine un chemin de chargement défini par l'opérateur en temps réel lors de la manipulation de la pièce flexible virtuelle.

La simulation 3D représente la planification de trajectoires d'A/D et est basée cette fois-ci sur le système (4.51). Comme nous l'avons déjà vu, une telle simulation consiste à trouver une réponse du système mécanique donné dans l'espace des configurations associé $(\bar{\mathbf{X}}, \bar{\Theta})$, i.e. l'évaluation de la trajectoire d'A/D ainsi que toutes les formes déformées intermédiaires de la pièce virtuelle flexible lors de sa manipulation. Dans le cas présent, la simulation a été effectuée pour deux chemins de chargement distincts $\{a \rightarrow d\}$ et $\{a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d\}$. Comme dans le cas des simulations représentées sur la Figure 5.5, la forme finale de la pièce déformée est la même pour les deux chemins de chargement et les trajectoires d'A/D sont différentes. Le Tableau 5.2. contient une information concernant le temps de réponse du système mécanique (temps CPU). Cette simulation est basée sur la méthode de collocation est effectuée sur un PC Intel R Pentium 4 avec un processeur 2.8 GHz et 520 MB de RAM.

Les résultats présentés dans le Tableau 5.2 montrent que le MMI de poutres flexibles satisfait également à la contrainte de temps de réponse rapide relative à toute simulation temps réel. Ceci permet donc mettre en évidence les capacités suffisantes de ce modèle concernant son intégration et exploitation efficace dans un environnement de simulation d'A/D virtuel de pièces flexibles et notamment, son utilisation dans le cas de simulations réalistes dans l'espace des efforts.

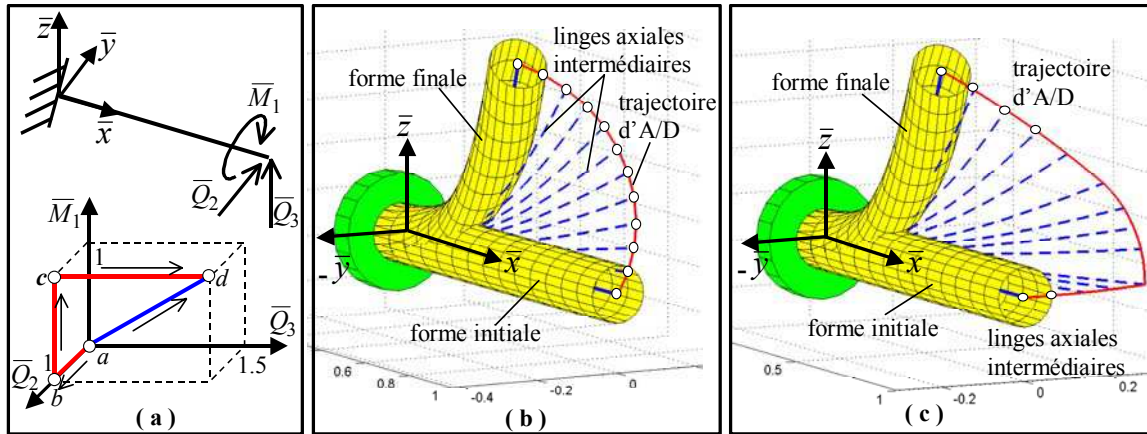


Figure 5.6. Planification de trajectoires d'A/D d'une poutre flexible 3D :
 (a) schéma de chargement et différents chemins de chargement possibles,
 (b) trajectoire d'A/D pour le chemin de chargement $\{a \rightarrow d\}$,
 (c) trajectoire d'A/D pour le chemin de chargement $\{a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d\}$.

Chemin de chargement dans l'espace adimension. des efforts ($\bar{Q}_2, \bar{Q}_3, \bar{M}_1$)	Nombre de formes déformées par trajectoire d'A/D	Temps CPU total de calcul de la trajectoire d'A/D, (s)	Temps CPU moyen de calcul d'une seule forme déformée, (s)
$\{a \rightarrow d\}$	33	1,110	0,034
$\{a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d\}$	33	1,312	0,040

Table 5.2. Temps CPU total de génération de trajectoires d'A/D (Figure 5.6).

Il convient également d'évaluer le comportement du MMI du point de vue du temps de calcul lorsque différentes méthodes numériques sont susceptibles d'être utilisées pour la simulation d'un comportement mécanique de pièces souples modélisées par une poutre flexible dans l'espace des efforts. Nous avons vu dans la Section 5.2 que deux méthodes numériques peuvent être employées pour la résolution d'EDOs décrivant le comportement de la poutre flexible : la méthode de collocation et la méthode plus générale, celle de tir. La principale particularité de ces méthodes est leur aptitude à la résolution de PL. Ainsi, il est intéressant de comparer ces deux approches afin de pouvoir conclure laquelle de ces méthodes répond au mieux aux contraintes de la simulation virtuelle et, en particulier, en terme de temps de calcul.

Pour une telle comparaison quantitative, la simulation de la poutre flexible, représentée sur la Figure 5.6b et correspondant au chemin de chargement $\{a \rightarrow d\}$, a été effectuée par les deux méthodes numériques citées ci-dessus. Lors de cette simulation, des résultats similaires en terme de réponses dans l'espace des configurations (la trajectoire d'A/D ainsi que les formes déformées intermédiaires de la pièce flexible) ont été obtenus. Cependant, ces tests ont montré que le temps de réponse du système mécanique est plus court si la méthode de collocation est utilisée. Le Tableau 5.3 contient une comparaison concernant ces simulations de comportement de la poutre flexible. Ces simulations ont été effectuées sur un PC Intel R Pentium 4 avec un processeur 2.8 GHz et 520 MB de RAM. Il vient de ce fait que l'utilisation de la méthode de collocation est préférable dans le cas de la simulation d'A/D virtuel de pièces de type poutres flexibles dans l'espace des efforts.

Méthode numérique pour le problème BVP	Nombre de formes déformées par trajectoire d'A/D	Temps CPU total de calcul de la trajectoire d'A/D, (s)	Temps CPU moyen de calcul d'une seule forme déformée, (s)
Méthode de collocation	11	0,703	0,064
Méthode de tir	11	4,375	0,398

Table 5.3. Comparaison de méthodes de collocation et de tir dans le cas d'une manipulation dans l'espace des efforts (Figure 5.6b).

5.4. Simulation dans l'espace des configurations

5.4.1. Généralités

La simulation dans l'espace des configurations représente la modélisation d'une pièce flexible soumise à des déplacements imposés ou des configurations géométriques à atteindre lors d'une manipulation d'une pièce virtuelle. Dans ce cas, l'opérateur manipule un objet virtuel à déplacer à l'aide d'une interface motrice de RV fournissant l'information géométrique concernant les déplacements mesurés de la main « attachée » à une interface motrice donnée (interface de localisation spatiale, interface de commande de type SpaceMouse ou SpaceBall, dispositif haptique,...) et donc, les déplacements d'une poignée manipulée de ce dispositif, par exemple (Section 2.2). Ces déplacements sont produits directement par l'opérateur à partir d'un certain effort développé et appliqué à une interface motrice donnée de RV (le travail musculaire d'un être humain reste donc toujours une action primordiale) et transmis par l'intermédiaire des métaphores d'interactions à un système de simulation de RV. Ainsi, cette information géométrique détermine des CLs géométriques dans l'espace des configurations à appliquer à une pièce flexible donnée.

Les CLs géométriques sont les déplacements de nature linéaire et/ou angulaire et représentent une configuration géométrique à atteindre qui est, dans le cas de l'A/D virtuel, souvent un point courant sur la trajectoire d'A/D lié à l'extrémité manipulée d'une pièce souple modélisée par une poutre flexible. Ce point définit de la section de la pièce liée à ce point sur la ligne moyenne. Par conséquent, le système de simulation de RV doit produire une forme déformée de la pièce flexible manipulée, une forme qui caractérise une configuration déformée intermédiaire, associée au point courant de la trajectoire d'A/D, et fournir une information concernant des efforts nécessaires à développer afin de pouvoir produire cette configuration déformée. Donc, deux réponses sont fournies par le système de simulation de RV : la première représente une réponse dans l'espace des configurations (forme déformée de la pièce flexible) et la seconde est une évaluation des forces/moments requis dans l'espace des efforts.

Dans cette section nous nous intéressons à des simulations 2D/3D dans l'espace des configurations de pièces souples modélisées par des poutres flexibles. Les résultats de telles simulations nous permettront d'évaluer le MMI de poutres flexibles considéré dans le présent mémoire du point de vue des principales contraintes de la simulation : réalisme de la simulation en ce qui concerne les réponses dans les espaces des efforts/configurations et temps de réponse. En effet, une telle évaluation est un facteur important dans le cas d'un problème de multiplicité de solutions présent lors de la simulation dans l'espace des configurations. Ce problème peut par ailleurs entraîner l'augmentation importante du temps de calcul représentant en réalité le temps de recherche d'une solution mécaniquement correcte dans l'espace des efforts. Cependant, une telle solution n'est pas toujours physiquement réalisable, est coûteux en terme de temps de calcul et nécessite un nouveau recalcul conforme à la réalité. Afin d'éviter ce type de problème, une approche basée sur une évaluation d'une solution initiale pour la résolution numérique du système d'EDOs décrivant le comportement mécanique de poutres flexibles a été proposée [Mikchevitch & al./1 2003], [Mikchevitch & al./2 2004]. Dans cette section, nous présenterons tout d'abord des principes de cette approche et des résultats correspondants. Nous évaluerons ensuite le MMI de poutres flexibles du point de vue du réalisme des résultats de simulation basée sur l'approche proposée ainsi que de la stabilité numérique du MMI. Nous présenterons également un exemple de simulation 2D pour la planification de trajectoires d'A/D en présence d'obstacles (sans traiter le cas d'une déformation supplémentaire de la pièce flexible due à un contact éventuel avec cet obstacle) ainsi qu'une simulation 3D, tout en tenant compte du temps de réponse du système mécanique. Enfin, nous discuterons une autre approche proposée pour une simulation dans l'espace des configurations, une approche basée sur une interaction entre les espaces des efforts et des configurations à partir d'un espace des efforts associé, crée auparavant et représentant un ensemble des solutions pré-calculées appelé « molécule de solutions » [Mikchevitch & al./2 2004].

Avant de présenter les exemples et leur analyse, il semble important d'évoquer quelques remarques générales en ce qui concerne la simulation réaliste du comportement de pièces flexibles dans l'espace des configurations. Premièrement, comme nous l'avons déjà vu dans les Sections 2.2.4

et 5.3.3, le problème de multiplicité de solutions existe dans le cas de la simulation dans l'espace des configurations, i.e. une réponse dans l'espace des efforts associé n'est pas unique. Ceci influe directement sur la mise en place numérique du MMI (choix des méthodes numériques particulières pour le PL), le processus de recherche de la solution et même sur la définition d'une nouvelle stratégie à exploiter afin de pouvoir diminuer le temps de réponse. Selon de nombreux tests numériques effectués dans l'espace des configurations, le temps CPU de génération d'une seule forme déformée d'une pièce souple modélisée par une poutre flexible ainsi qu'une évaluation parallèle des efforts requis varie entre 0,5 et 3 s (sur un PC banalisé avec un processeur 800 MHz et 380 MB de RAM) et dépend notamment des facteurs suivants :

- la multiplicité des solutions,
- la stratégie de mise en place numérique du MMI,
- les CLs géométriques : la position des points inaccessibles ou difficilement atteignables afin d'assurer la trajectoire d'A/D souhaitée non-optimisée, l'orientation prescrite de la section manipulée (paramètre assez sensible),
- la forme initiale de la poutre flexible,
- la simulation 2D ou 3D ainsi que le nombre de formes déformées intermédiaires correspondant au nombre de points de passage définissant la trajectoire d'A/D, etc.

Des solutions possibles concernant la contrainte de temps de réponse à respecter pour la simulation d'A/D virtuel peuvent être :

- le raffinement du mouvement de la main de l'opérateur manipulant la pièce virtuelle flexible, i.e. l'augmentation du nombre de points de passage de la trajectoire d'A/D. Dans certains cas, ceci permettrait d'améliorer la qualité du mouvement de l'opérateur : les mouvements ne sont plus brusques, l'opérateur a le temps pour analyser les données de sortie, notamment, contrôler la déformation complexe de la pièce ainsi que le positionnement de cette pièce par rapport à son environnement,
- la diminution de la fréquence en ce qui concerne le transfert de données d'entrée fournies par une interface motrice de localisation spatiale,
- l'interaction des modèles MMI et MTR proposée dans la méthodologie générale de simulation de composants déformables (Section 3.3),
- l'élaboration de nouvelles méthodes numériques pour la résolution rapide des EDOs dans le cas du PL,
- etc.

Il convient également de noter une difficulté de certaines interfaces motrices courantes de fournir une information précise concernant l'orientation de la pièce virtuelle à manipuler, par exemple, les interfaces de RV utilisant les LEDs pour qualifier le mouvement de la main ou du corps de l'opérateur. Il est nécessaire de souligner que la modélisation adéquate du comportement de pièces flexibles nécessite la prise en compte des CLs angulaires ce qui est souvent négligé lors de la manipulation virtuelle d'un objet rigide. De plus, d'après des tests effectués, la valeur d'un déplacement angulaire imposé est un paramètre assez sensible pour la recherche d'une solution convenable et physiquement réalisable dans l'espace des efforts. Donc, dans le cas de la simulation du comportement mécanique de pièces virtuelles flexibles, il est nécessaire d'utiliser des interfaces motrices capables de fournir également les données d'entrée suffisamment précises en ce qui concerne l'orientation de la section manipulée de la pièce virtuelle. Généralement, les CLs géométriques en terme d'orientation peuvent être définies dans l'espace des configurations par :

- la mesure précise des angles en temps réel lors de la manipulation virtuelle donnée en utilisant une des interfaces motrices ou sensori-motrices correspondantes de RV comme les capteurs Polhemus, les interfaces de commande de type SpaceBall, le bras articulé Virtuouse d'Haption, etc.
- la spécification d'angles constants/variables en temps réel lors de la manipulation virtuelle à partir de valeurs des angles définis avant la manipulation proprement dite. Ces angles sont alors pris en compte automatiquement lors de la simulation d'A/D virtuel sans mesure complémentaire,

- la détermination off-line des angles constants/variables à partir d'extrapolation de données permettant de déduire les CLs manquantes. Par exemple, il est possible d'approximer les angles nécessaires à partir d'un enregistrement d'un certain nombre de formes déformées mesurées préalablement en utilisant une technique de collage de LEDs sur la pièce flexible manipulée. Ces angles permettent d'exprimer approximativement une loi de variation des angles qui sera utilisée par la suite dans une manipulation temps réel.

5.4.2. Influence de la solution initiale sur le comportement du MMI

Lors de la simulation dans l'espace des configurations, une réponse correspondante dans l'espace des efforts associé peut être trouvée en utilisant une méthode générale de tir appliquée au PL. La particularité de ce problème réside dans la difficulté de résoudre les EDOs décrivant le comportement d'une poutre flexible par l'application directe de la méthode de tir. En effet, le problème de multiplicité de solutions existe dans le cas de la manipulation dans l'espace des configurations. Ainsi, il est très difficile de trouver une solution adéquate dans l'espace des efforts, d'autant plus que le processus de recherche de réponse dans cet espace débute à partir de la spécification d'une solution initiale \mathbf{b}_f^0 ou \mathbf{b}_m^0 requise pour la méthode de tir (Section 5.2.2).

L'incertitude sur la détermination d'une solution physiquement adéquate, i.e. une solution physiquement réalisable par un être humain, est directement liée au choix de la solution initiale. Par exemple, une spécification de telle ou telle valeur de la solution initiale peut conduire à une réponse mécaniquement correcte dans l'espace des efforts, mais difficilement réalisable car les efforts évalués sont très importants pour être facilement développés par un être humain. De plus, ceci peut conduire à l'apparition de contraintes mécaniques au-delà de la limite acceptable.

La Figure 5.7a présente des exemples 2D de solutions mécaniquement correctes, obtenues à partir de l'application directe de la méthode de tir et correspondant à des solutions initiales distinctes. Toutefois, une solution correspondant à la forme déformée *a* (ou a_1 et a_2 avec les solutions initiales \mathbf{b}_{f,a_1}^0 et \mathbf{b}_{f,a_2}^0) est difficilement réalisable physiquement, car elle nécessite le développement d'efforts-suiveurs importants afin de pouvoir atteindre la configuration géométrique définie par l'opérateur au cours de la manipulation virtuelle de la pièce et caractérisée par les CLs géométriques adimensionnées $[\bar{x}_m, \bar{y}_m, \bar{\theta}_m]^T$. Les détails d'une telle simulation dans l'espace des configurations adimensionné sont précisés dans le Tableau 5.4. La valeur de l'erreur Δ à contrôler à l'intérieur de la boucle de la méthode de tir a été fixée à 10^{-3} . Le MMI est basé sur l'équation (4.50).

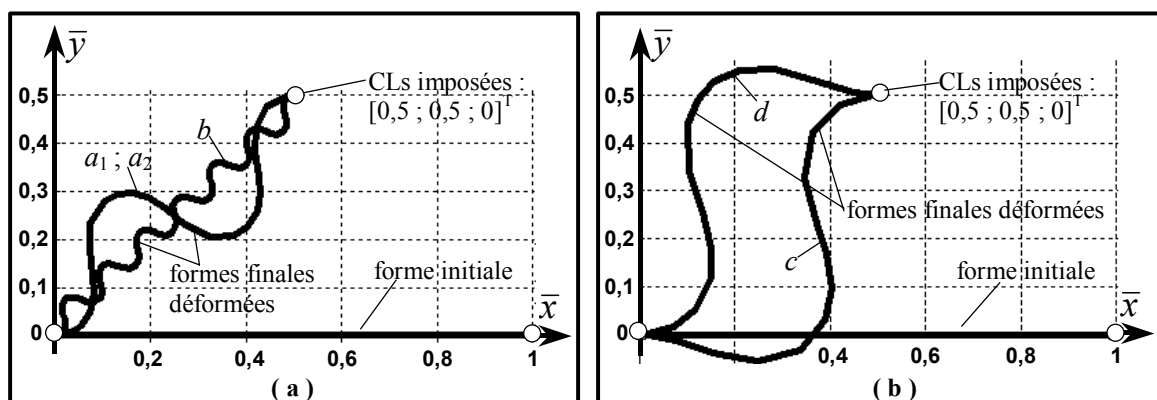


Figure 5.7. Influence de la solution initiale sur la réponse dans l'espace des efforts :

- (a) formes déformées difficilement réalisables,
 (b) formes déformées conformes plus à la réalité.

Forme déformée	CLs géométriques $[\bar{x}_m, \bar{y}_m, \bar{\theta}_m]^T$	Solution initiale $\mathbf{b}_f^0 = [\bar{Q}_f^0, \bar{N}_f^0, \bar{M}_f^0]^T$	Réponse dans l'espace des efforts-suiveurs $[\bar{Q}_m, \bar{N}_m, \bar{M}_m]^T$	Convergence de la méthode de tir
a_1	[0,5 ; 0,5 ; 0]	[1 ; 1 ; 0]	[-65 ; -111 ; -11,5]	oui
a_2	[0,5 ; 0,5 ; 0]	[-1 ; 1 ; -1]	[-65 ; -111 ; -11,5]	oui
b	[0,5 ; 0,5 ; 0]	[0,5 ; 0,5 ; 0]	[-1439 ; -1544 ; -36]	non
c	[0,5 ; 0,5 ; 0]	[1 ; 1 ; 1]	[-32,8 ; -32,8 ; -5,0]	oui
d	[0,5 ; 0,5 ; 0]	[1 ; 1 ; -1]	[-32,8 ; -32,8 ; 5,0]	oui

Tableau 5.4. Efforts évalués par le MMI de poutres flexibles pour différentes solutions initiales (Figure 5.7).

Par conséquent, une mauvaise solution initiale peut entraîner des problèmes de stabilité numérique et même de convergence de la méthode, notamment, des problèmes liés à la génération de valeurs d'efforts trop importants pour le MMI (forme déformée b sur la Figure 5.7a).

De plus, plusieurs solutions en terme de géométrie de la pièce flexible déformée existent. Ces formes déformées (réponse dans l'espace des configurations) dépendent également de la solution initiale requise et correspondent à différentes combinaisons des efforts à développer. Les formes déformées c et d sur la Figure 5.7b présentent un tel cas. Cependant, en fonction du positionnement spatial de l'opérateur manipulant la pièce flexible, il peut être plus facile physiquement de réaliser la forme c que d ou l'inverse. Par conséquent, il est nécessaire de bien spécifier non seulement les valeurs des efforts formant le vecteur de la solution initiale pour la méthode de tir, mais également leurs signes, i.e. la direction d'application des efforts correspondant. Par exemple, les solutions initiales $\mathbf{b}_{f,c}^0$ et $\mathbf{b}_{f,d}^0$ pour les déformées c et d (Figure 5.7b) ne se distinguent que par le signe du moment de flexion \bar{M}_f^0 (Tableau 5.4).

Ainsi, il est nécessaire d'utiliser une stratégie particulière afin de pouvoir piloter le processus de recherche de réponse adéquate dans l'espace des efforts. La stratégie proposée dans ce mémoire est basée notamment sur une évaluation automatique préalable d'une solution initiale correcte avant d'utiliser la méthode de tir. Cette évaluation est basée sur la méthode de gradient et vise à approximer le vecteur \mathbf{b}_f^0 à partir d'une évaluation du vecteur \mathbf{b}_m^0 représentant les CLs mécaniques inconnues à l'extrémité manipulée de la poutre flexible [Mikchevitch & al./1 2003].

L'évaluation d'une solution initiale \mathbf{b}_m^0 est effectuée à partir de l'étude du comportement d'une certaine fonction objectif \mathbf{F} . Cette fonction peut être définie comme une distance entre la position finale à atteindre et la position courante de l'extrémité à manipuler sous des charges faibles données, i.e. à partir d'un chargement de la pièce flexible dans l'espace des efforts. Ainsi, selon la méthode du gradient, la solution initiale est approximée par la relation suivante :

$$\mathbf{b}_m^{0,n+1} = \mathbf{b}_m^{0,n} + \lambda \frac{\nabla \mathbf{F}(\mathbf{b}_m^{0,n})}{\|\nabla \mathbf{F}(\mathbf{b}_m^{0,n})\|}, \quad (5.14)$$

avec λ un paramètre constant ou non.

Un petit nombre d'itérations $n = \{1...3\}$ souvent suffit pour évaluer le comportement de la fonction \mathbf{F} . La Figure 5.8 présente un exemple de simulation de la pièce flexible dans l'espace des configurations, la simulation est similaire aux modélisations de la Figure 5.7 avec les mêmes CLs géométriques à atteindre $[\bar{x}_m, \bar{y}_m, \bar{\theta}_m]^T$ et basée cette fois-ci sur l'approximation préalable de la solution initiale \mathbf{b}_f^0 à partir de l'évaluation de \mathbf{b}_m^0 . La forme déformée obtenue par une telle simulation est la forme e et correspond à la déformée c sur la Figure 5.7b. La forme e représente une solution plus réaliste, physiquement plus conforme à la réalité et demandant moins d'efforts à

développer par l'opérateur. Une évaluation supplémentaire de la solution fournie par le MMI de poutres flexibles à partir de la stratégie proposée sera effectuée dans la Section 5.4.3.

Lorsqu'une interface motrice de RV ne fournissant que les positions est utilisée dans une manipulation virtuelle, le problème de détermination des orientations devient un obstacle important pour la modélisation réaliste du comportement de pièces flexibles. Notamment, l'orientation de la section $\bar{\theta}_{i_m}$ d'une pièce souple modélisée par une poutre flexible constitue une CL géométrique angulaire requise par le MMI de poutres flexibles. Une solution possible est la définition d'une loi de variation des angles souhaités au cours de la manipulation virtuelle. Cependant, il est difficile de définir une telle loi et une valeur constante de l'angle $\bar{\theta}_{i_m}$ peut parfois suffire. Néanmoins, en faisant l'hypothèse que l'évaluation de la solution initiale \mathbf{b}_m^0 permet de trouver une réponse dans l'espace des efforts correspondant à une solution réaliste requérant des efforts moins importants à développer, l'angle inconnu peut être approximé automatiquement à partir de l'évaluation de la solution initiale par la méthode du gradient. Des tests réalisés en 2D montrent qu'une telle approximation automatique de l'angle $\bar{\theta}_{i_m}$ permet de trouver une solution intéressante dans l'espace des efforts, une solution qui correspond à une combinaison d'efforts moins importants que ceux déterminés à partir d'un angle imposé directement par l'utilisateur. Ce fait représente un élément intéressant, permettant d'optimiser éventuellement la recherche d'une réponse dans l'espace des efforts du point de vue de la minimisation possible des efforts requis si l'orientation est un paramètre libre et déterminé par une approximation automatique par la méthode du gradient.

La forme f sur la Figure 5.8 présente un exemple de simulation 2D d'une poutre flexible dans l'espace des configurations lorsque l'angle $\bar{\theta}_m$, CL géométrique inconnue, est libre et déterminée par la méthode du gradient lors de l'évaluation d'une solution initiale pour la méthode de tir. Les efforts-suiveurs produits par le MMI de poutres flexibles pour l'angle imposé (forme e) ou par l'angle libre, approximé par la méthode du gradient (forme f), sont comparés dans le Tableau 5.5.

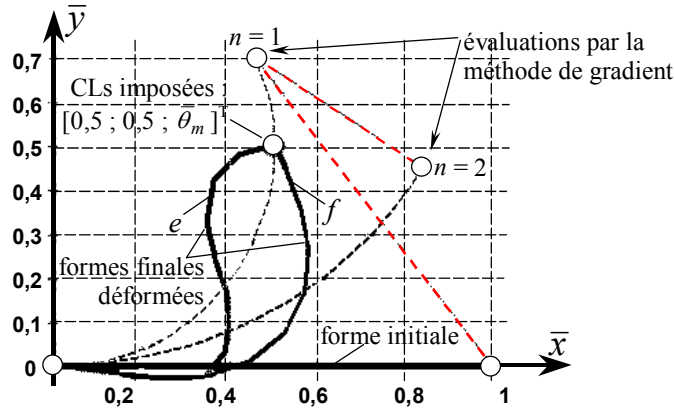


Figure 5.8. Simulation d'une poutre flexible dans l'espace des configurations avec la CL angulaire libre approximée par la méthode du gradient.

Forme déformée	CLs géométriques $[\bar{x}_m, \bar{y}_m, \bar{\theta}_m]^T$	Angle $\bar{\theta}_m$, rad	Nombre d'itérations n de méthode du gradient	Réponse dans l'espace des efforts-suiveurs $[\bar{Q}_m, \bar{N}_m, \bar{M}_m]^T$	Convergence de la méthode de tir
e	$[0,5 ; 0,5 ; 0]$	0 (utilisateur)	1 ; 2 ; 3	$[-32,8 ; -32,8 ; -5,0]$	oui
f	$[0,5 ; 0,5 ; \text{libre}]$	2 (méthode du gradient)	1	$[13,9 ; -7,7 ; -0,2]$	oui

Tableau 5.5. Résultats de simulations dans l'espace des configurations à partir des CLs angulaires imposée par l'utilisateur ou bien libre et approximée par la méthode du gradient (Figure 5.8).

5.4.3. Etudes expérimentales

Comme nous l'avons vu précédemment, le principal problème en ce qui concerne la mise en place et le traitement numérique du MMI dans l'espace des configurations est la multiplicité de solutions dans l'espace des efforts associé. Afin d'éviter des problèmes liés au choix d'une solution initiale pour la méthode de tir, à la stabilité numérique du MMI et par conséquent au temps de calcul, et de pouvoir assurer la génération d'une solution physiquement plus réaliste (efforts requis, forme déformée), l'évaluation préliminaire automatique d'une solution initiale pour la résolution numérique des EDOs soumises au PL a été mise en place. Une telle stratégie permettrait de produire une réponse adéquate, ce qui est important pour l'étude et l'analyse d'une manipulation virtuelle, pour l'optimisation des opérations d'A/D et de maintenance et même la ré-conception possible d'une pièce donnée, d'une séquence d'A/D ou d'un système mécanique des points de vue de la déformation adéquate de la pièce flexible, des efforts réalistes requis, de l'état de contrainte dans la pièce au cours de sa manipulation, du calcul des interférences réalistes, etc. Ainsi, il convient maintenant de tester la stabilité numérique du MMI et de vérifier l'adéquation des résultats de simulation effectuée à partir de la stratégie proposée. Pour cela, une série de tests numériques, basés sur l'étude du comportement numérique du MMI de poutres flexibles dans deux espaces associés ainsi que sur la comparaison des résultats numériques expérimentaux, a été réalisée [Mikchevitch & al./3 2004].

Les études expérimentales consistent en la comparaison des résultats produits par le MMI dans l'espace des efforts avec des données de référence arbitrairement choisies et fixées auparavant. Ces données de référence sont de nature mécanique, i.e. les efforts de référence appliqués à une poutre flexible donnée. Par exemple, dans le cas de la simulation 2D selon l'équation (4.50), les efforts adimensionnés de référence sont $\bar{Q}_{ref(\bar{s}=1)}(i)$, $\bar{N}_{ref(\bar{s}=1)}(i)$, $\bar{M}_{ref(\bar{s}=1)}(i)$ et correspondent à une configuration géométrique $\bar{p}_\bullet(i)$ avec i le point courant sur la trajectoire d'A/D. Par conséquent, cette trajectoire d'A/D représente aussi des données de référence $\bar{x}_{ref(\bar{s}=1)}(i)$, $\bar{y}_{ref(\bar{s}=1)}(i)$, $\bar{\theta}_{ref(\bar{s}=1)}(i)$ mais de nature géométrique. Alors, le but des études expérimentales est de comparer les efforts de référence connus aux efforts numériques produits par le MMI $\bar{Q}_{num(\bar{s}=1)}(i)$, $\bar{N}_{num(\bar{s}=1)}(i)$, $\bar{M}_{num(\bar{s}=1)}(i)$ à partir des CLs géométriques définies dans l'espace des configurations et représentant les données de référence géométriques.

Premièrement, en se basant sur le principe de l'unicité de solution dans l'espace des configurations dans le cas de la simulation dans l'espace des efforts, le MMI a été utilisé afin de pouvoir générer une réponse unique de référence, i.e. une trajectoire d'A/D de référence $\bar{x}_{ref(\bar{s}=1)}(i)$, $\bar{y}_{ref(\bar{s}=1)}(i)$, $\bar{\theta}_{ref(\bar{s}=1)}(i)$ ainsi que toutes les formes intermédiaires déformées $\bar{p}_\bullet(i)$ associées, à partir de la simulation d'une poutre flexible encastree à une extrémité sous une charge de référence donnée $\bar{Q}_{ref(\bar{s}=1)}(i)$, $\bar{N}_{ref(\bar{s}=1)}(i)$, $\bar{M}_{ref(\bar{s}=1)}(i)$ avec $i = \{1, 2, 3, \dots, m\}$, où m est le nombre de points sur la trajectoire d'A/D de référence. Deuxièmement, la trajectoire d'A/D de référence a été utilisée pour former les CLs géométriques (positions et orientations) afin de pouvoir effectuer une simulation inverse : évaluer les efforts requis par le MMI à l'aide de la méthode de tir appliquée au PL avec l'évaluation automatique d'une solution initiale pour le premier point de la trajectoire d'A/D de référence.

La Figure 5.9a présente des résultats de simulation d'une poutre flexible dans l'espace des configurations avec les CLs géométriques de référence (trajectoire d'A/D de référence) déterminés par les efforts-suiveurs de référence $\bar{Q}_{ref(\bar{s}=1)} = 8$, $\bar{N}_{ref(\bar{s}=1)} = 0$ et $\bar{M}_{ref(\bar{s}=1)} = -2$, appliqués linéairement à l'extrémité de la poutre, i.e. les lois $\bar{Q}_{ref(\bar{s}=1)} = f_{1ref}(i)$, $\bar{N}_{ref(\bar{s}=1)} = f_{2ref}(i)$, $\bar{M}_{ref(\bar{s}=1)} = f_{3ref}(i)$ sont des fonctions linéaires. La Figure 5.9a illustre également le comportement numérique du MMI caractérisé par une erreur sur l'évaluation numérique des lois $\bar{Q}_{num(\bar{s}=1)} = f_{1num}(i)$, $\bar{N}_{num(\bar{s}=1)} = f_{2num}(i)$, $\bar{M}_{num(\bar{s}=1)} = f_{3num}(i)$ lors de la recherche d'une

réponse dans l'espace des efforts $(\bar{Q}_{num}, \bar{N}_{num}, \bar{M}_{num})$. L'erreur absolue maximale $\Delta_{max}^F = \max \left\{ \bar{F}_{num}(\bar{s}=1)(i) - \bar{F}_{ref}(\bar{s}=1)(i) \right\}$, où $\bar{F}_{\bullet}(i)$ remplace $\bar{Q}_{\bullet}(i), \bar{N}_{\bullet}(i), \bar{M}_{\bullet}(i)$, est d'ordre $6 \cdot 10^{-2}$. L'erreur relative maximale est de l'ordre 2%, ce qui représente un résultat tout à fait acceptable du point de vue de la simulation réaliste de pièces flexibles.

D'autres tests expérimentaux consistaient en l'étude du comportement numérique du MMI mis en place à partir des données d'entrée de référence $\bar{p}_{\bullet}(i)$ modifiées par une certaine perturbation ω . Une telle étude permettra d'évaluer la stabilité numérique du MMI. Les données $\bar{p}_{\bullet}(i) = \bar{p}_{\bullet}(\bar{s}_j^i)$ représentent un ensemble de vecteurs de coordonnées $\bar{x}_{ref}(\bar{s}_j^i), \bar{y}_{ref}(\bar{s}_j^i)$ de la ligne moyenne de la poutre déformée pour chaque point intermédiaire i de la trajectoire d'A/D de référence, où $j = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ est le nombre de coordonnées caractérisant la ligne moyenne déformée. La perturbation ω peut physiquement caractériser des erreurs de mesure de formes déformées d'une pièce flexible. Ainsi, l'étude de stabilité numérique du MMI peut être réalisée à partir de l'évaluation d'une réponse dans l'espace des efforts associé à l'espace des configurations où les mesures perturbées des formes déformées sont prescrites. Cette réponse est calculée en minimisant une erreur entre les formes déformées de référence perturbées par ω et celles courantes produites par le MMI :

$$\Delta_i = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \left\| \bar{p}_{num}(s_j^i) - \bar{p}_{ref}(s_j^i) \right\|^2 \rightarrow \min_{(\bar{Q}_{num}(\bar{s}=1)(i), \bar{N}_{num}(\bar{s}=1)(i), \bar{M}_{num}(\bar{s}=1)(i))} \quad (5.15)$$

où $\bar{p}_{num}(s_j^i)$ et $\bar{p}_{ref}(s_j^i)$ sont les vecteurs des positions des points j sur la ligne moyenne courante num , obtenue numériquement par le MMI au cours de la minimisation, et celle des positions de référence ref mais perturbées par un bruit ω .

Une telle stratégie de recherche d'une réponse dans l'espace des efforts permet également d'éviter le problème de multiplicité de solutions, car les données $\bar{p}_{ref}(s_j^i)$ restent inchangées lors du processus de minimisation et expriment une solution unique dans l'espace des configurations. De plus, l'erreur Δ_i est une fonction de CLs mécaniques (efforts requis) à évaluer, car le calcul de toute configuration déformée $\bar{p}_{num}(s_j^i)$ est lié aux CLs mécaniques inconnues et déterminées lors de la minimisation. A chaque itération durant le processus de minimisation de la fonction d'erreur Δ_i , la méthode de tir est utilisée afin de pouvoir trouver une réponse courante dans l'espace des efforts (efforts requis) ainsi que dans l'espace des configurations (forme déformée à comparer avec celle de référence perturbée par un bruit ω). La réponse courante dans l'espace des efforts forme un vecteur de la solution initiale pour la méthode de tir pour l'itération suivante de minimisation. La boucle globale du problème d'optimisation représente une minimisation multi-variables. Par exemple, dans le cas de la simulation 2D, on a trois variables minimisant la fonction d'erreur : deux forces et un moment de flexion à appliquer à l'extrémité de la poutre flexible. Une telle minimisation multi-variables peut être effectuée en utilisant une méthode quasi-newtonienne ou celle du simplex [MathWorks 2002].

La Figure 5.9b présente des résultats de simulation d'une poutre flexible effectuée dans l'espace des configurations à partir d'une procédure de minimisation exprimée par l'équation (5.15). Cette simulation correspond à la recherche d'une réponse dans l'espace des efforts $(\bar{Q}_{num}^{bruit}, \bar{N}_{num}^{bruit}, \bar{M}_{num}^{bruit})$ ainsi que dans l'espace des configurations (calcul des déformées correspondant aux efforts évalués). Les données d'entrée pour la présente simulation sont les déformées de référence perturbées par le bruit de mesure introduit pour la coordonnée \bar{x} suivant l'expression suivante :

$$\bar{x}_{num}(s_j^i) = \bar{x}_{ref}(s_j^i) \pm \omega = \bar{x}_{ref}(s_j^i) \pm 0.05 \cdot L, \quad (5.16)$$

avec $L = 1$, la longueur constante de la poutre flexible.

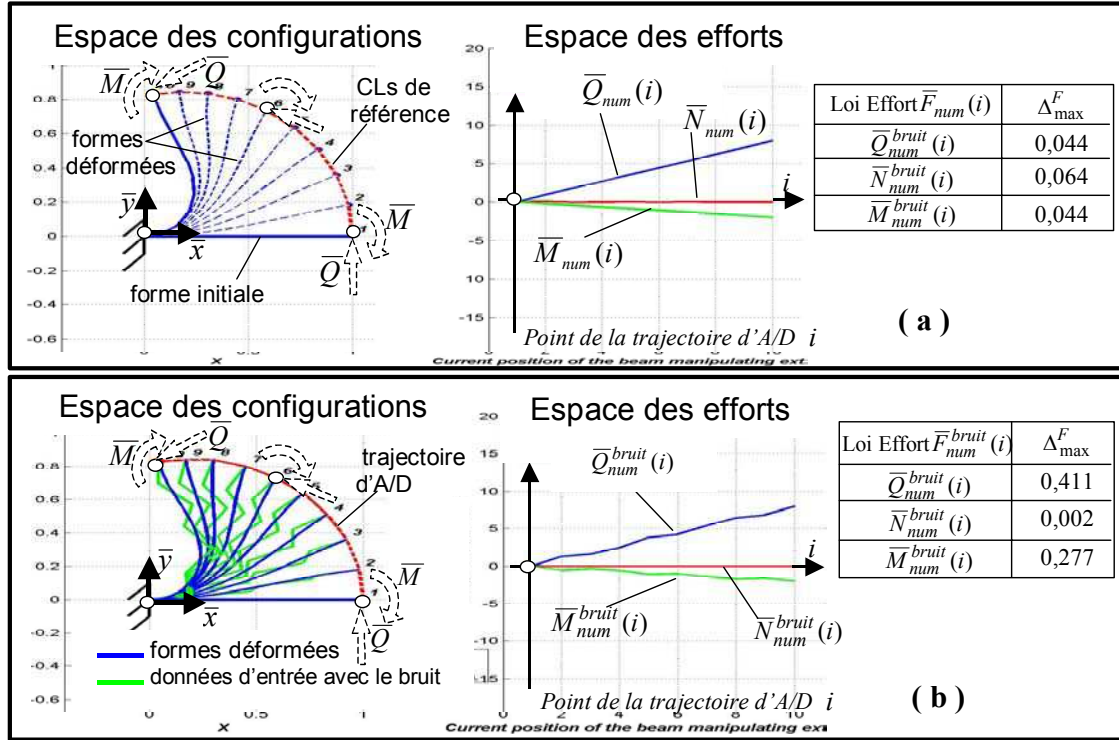


Figure 5.9. Evaluation du MMI pour la simulation réaliste dans l'espace des configurations :
 (a) simulation à partir des CLs de référence, (b) simulation à partir des déformées de référence modifiées par le bruit de mesure introduit.

Les lois d'application des efforts-suiveurs $\bar{Q}_{num(\bar{s}=1)}^{bruit}(i)$, $\bar{N}_{num(\bar{s}=1)}^{bruit}(i)$, $\bar{M}_{num(\bar{s}=1)}^{bruit}(i)$ produits par le MMI sont cohérents par rapport à la charge de référence $\bar{Q}_{ref(\bar{s}=1)}(i)$, $\bar{N}_{ref(\bar{s}=1)}(i)$, $\bar{M}_{ref(\bar{s}=1)}(i)$ ainsi qu'aux efforts $\bar{Q}_{num(\bar{s}=1)}(i)$, $\bar{N}_{num(\bar{s}=1)}(i)$, $\bar{M}_{num(\bar{s}=1)}(i)$ déterminés précédemment (Figure 5.9). L'erreur absolue maximale $\Delta_{max}^F = \max \left\{ \bar{F}_{num(\bar{s}=1)}^{bruit}(i) - \bar{F}_{ref(\bar{s}=1)}(i) \right\}$, où $\bar{F}_{\bullet}(i)$ remplace $\bar{Q}_{\bullet}(i)$, $\bar{N}_{\bullet}(i)$, $\bar{M}_{\bullet}(i)$, est de l'ordre de 0,4. L'erreur relative maximale est de l'ordre 10%, ce qui représente un résultat acceptable du point de vue de la simulation adéquate de pièces flexibles. Par conséquent, les études réalisées montrent la stabilité numérique du MMI de poutres flexibles ainsi que la robustesse du traitement numérique employé.

5.4.4. Planification de trajectoires d'A/D en 2D

L'utilisation la plus directe du MMI de pièces flexibles en ce qui concerne son exploitation dans un environnement de RV est la planification interactive de trajectoires d'A/D lors de la manipulation d'une pièce flexible donnée. Nous avons vu précédemment des exemples de planification de trajectoires d'A/D lorsque l'opérateur manipulait une pièce virtuelle flexible dans l'espace des efforts avec l'évaluation d'une réponse unique dans l'espace des configurations associé.

Maintenant, une fois le MMI validé à la Section 5.4.3 du point de vue de la génération adéquate d'une réponse mécanique dans l'espace des efforts, il est intéressant d'utiliser ce modèle dans le contexte de simulations virtuelles basées sur les interfaces motrices fournissant les données d'entrée en termes de configurations géométriques à atteindre. Par ailleurs, des tests d'application du MMI de poutres flexibles au problème de planification de trajectoires d'A/D permettront d'évaluer ce

modèle mécanique du point de vue du temps de réponse lorsqu'une pièce souple modélisée par une poutre flexible est manipulée dans l'espace des configurations.

Dans le cas de simulation de pièces flexibles dans l'espace des configurations, un aspect important à noter est l'existence de différentes lois de variation des efforts due au problème de multiplicité de solutions. En effet, le cas le plus simple à considérer est celui correspondant à la forme arbitraire d'une loi de variation des efforts sans imposer de contraintes quelconques (Figure 5.10a). Dans ce cas, le MMI fournit une réponse dans l'espace des efforts dont les valeurs sont fonctions des CLs géométriques uniquement : les efforts requis sont produit par le MMI en chaque point de la trajectoire d'A/D sans imposer des conditions supplémentaires sur le comportement de la loi de variation des efforts entre les points de passage de la trajectoire d'A/D. Ainsi, un effort $Q_j(n)$ en un point de passage ou le dernier point de la trajectoire d'A/D peut être différent d'un effort maximal $Q_{j \max}$ à développer tout au long d'un chemin de parcours de la pièce manipulée.

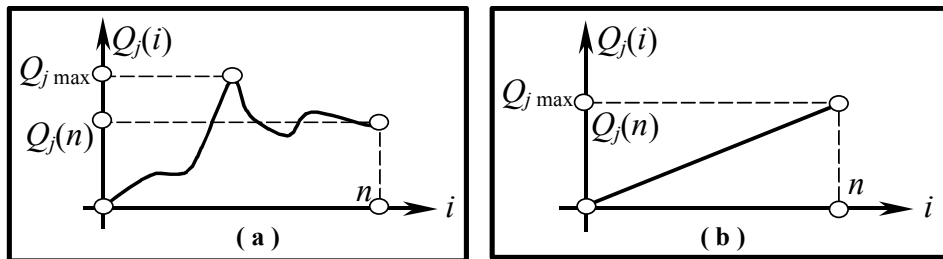


Figure 5.10. Exemples de différentes lois de variation des efforts :
 (a) loi arbitraire sans aucune contrainte, (b) loi de variation linéaire.

La Figure 5.11 illustre ce type de problème en 2D : la génération de la déformation réaliste d'une pièce flexible, dont une extrémité est déjà assemblée, dans l'espace des configurations $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{\theta})$ ainsi que l'évaluation directe des lois adéquates de variation des efforts dans l'espace des efforts-suiveurs $(\bar{Q}, \bar{N}, \bar{M})$ en chaque point de la trajectoire d'A/D. La faculté d'un être humain, manipulant une pièce virtuelle à caractère flexible, d'observer ce qui se passe lors de la déformation de cette pièce, de contrôler les efforts associés à une telle déformation, d'éviter des collisions avec des obstacles, etc. est utilisée lors de la manipulation d'A/D ou de maintenance virtuelle. La Figure 5.11a présente une trajectoire d'A/D $\{a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f\}$ réalisée par un utilisateur afin d'éviter une collision avec un obstacle dans l'espace. Cette recherche guidée de la trajectoire d'A/D génère un ensemble de points à parcourir par la pièce flexible, les points formant les CLs géométriques pour la modélisation mécanique du comportement de la pièce donnée. Par conséquent, le MMI fournit une réponse réaliste dans l'espace des efforts qui est une loi de variation des efforts-suiveurs requis afin de pouvoir réaliser la trajectoire d'A/D donnée libre des collisions (Figure 5.11b).

Pour la simulation présentée sur la Figure 5.11, l'angle de valeur constante $\bar{\theta}(1) = 0,5 \text{ rad}$, définissant l'orientation de la section manipulée de la poutre flexible dans toutes les positions intermédiaires de la trajectoire d'A/D donnée, a été spécifié avant le démarrage de la simulation. Les interactions possibles entre la pièce flexible et son obstacle lors de la manipulation d'A/D ne sont pas examinées dans ce mémoire. Cependant, il serait intéressant d'étudier le comportement particulier de la pièce souple dans le cas d'une collision avec un obstacle, i.e. l'évaluation des réactions réalistes dues à une telle collision à l'incorporation d'une déformation supplémentaire de la pièce flexible, modélisation d'un problème de contact entre la pièce et l'obstacle (contact ponctuel, phénomène de frottement,...), l'influence des collisions sur l'évaluation des lois de variation des efforts, etc.

Le tableau 5.5 contient une information concernant le temps de réponse CPU du système mécanique pour la simulation présentée. Le temps de réponse tient compte de la génération de toutes les formes déformées de la pièce flexible ainsi que le calcul des efforts requis : 10 formes intermédiaires pour chaque segment entre les points clés de passage sur la trajectoire d'A/D imposée ou 50 formes déformées au total. Cette simulation a été effectuée sur un PC Intel R Pentium 4 avec un processeur 2.8 GHz et 520 MB de RAM. Ces études montrent que le MMI de poutres flexibles répond

également à la contrainte de génération rapide des réponses dans l'espace des efforts/configurations lorsque la simulation est effectuée dans l'espace des configurations sous des CLs géométriques.

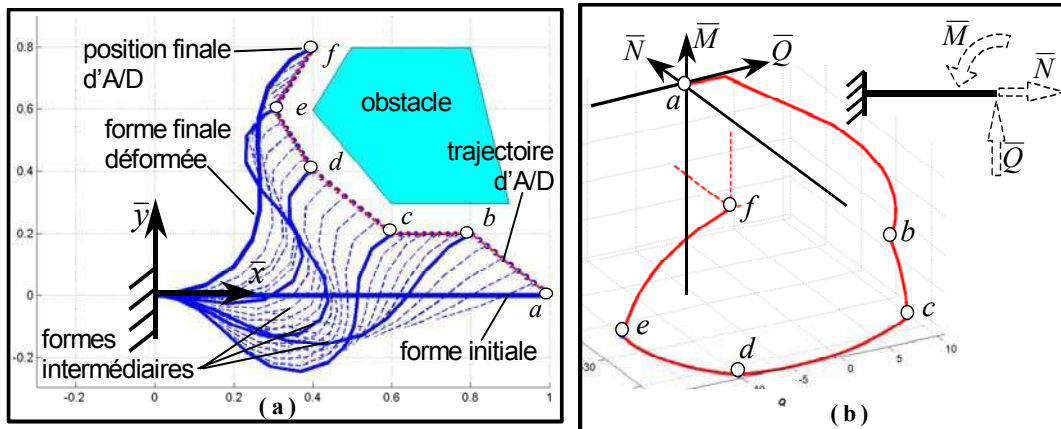


Figure 5.11. Exemple de planification de trajectoire d'A/D avec les CLs géométriques imposées :
 (a) trajectoire d'A/D définie par l'utilisateur et réponse dans l'espace des configurations,
 (b) réponse dans l'espace des efforts-suiveurs.

Points clés de passage de la trajectoire d'A/D dans l'espace des configurations $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{\theta})$	Réponse dans l'espace des efforts $(\bar{Q}, \bar{N}, \bar{M})$ aux points clés de la trajectoire d'A/D	Temps CPU de calcul des formes déformées & efforts requis par segment entre les points clés, (s)	Temps CPU moyen de calcul d'une forme déformée & efforts requis, (s)
<i>a</i> (1,0; 0,0; 0,0)	<i>a</i> (0,0; 0,0; 0,0)	-	-
<i>b</i> (0,8; 0,2; 0,5)	<i>b</i> (9,0; -33,7; -4,4)	1,547	0,155
<i>c</i> (0,6; 0,2; 0,5)	<i>c</i> (7,9; -41,1; -7,3)	1,625	0,163
<i>d</i> (0,4; 0,4; 0,5)	<i>d</i> (-9,8; -43,2; -8,2)	1,860	0,186
<i>e</i> (0,3; 0,6; 0,5)	<i>e</i> (-18,9; -34,8; -6,4)	1,718	0,172
<i>f</i> (0,4; 0,8; 0,5)	<i>f</i> (-2,7; -17,9; -4,0)	1,500	0,150

Tableau 5.6. Temps CPU de réponse pour la planification de trajectoire d'A/D de la Figure 5.11.

Lorsque l'utilisateur a besoin de planifier une trajectoire d'A/D dont la loi de variation des efforts est soumise à une contrainte entre les points clés de passage de la trajectoire, par exemple, une loi linéaire de variation des efforts (Figure 5.10b), la trajectoire d'A/D sera différente de celle générée sans contraintes. La particularité de la loi linéaire de variation des efforts est le fait qu'au point clé n de la trajectoire d'A/D l'effort $Q_f(n) = Q_{j\max}$. Par conséquent, aux points intermédiaires situés entre les points clés $(n-1)$ et n les efforts générés par le MMI ne dépasseront pas la valeur de $Q_f(n)$ correspondant à une valeur maximale sur une partie donnée de la trajectoire. Ce fait peut être intéressant du point de vue de l'optimisation de la trajectoire d'A/D, car dans ce cas l'opérateur peut être certain que les efforts aux points intermédiaires ne dépassent pas une certaine valeur limite affectée à un point clé.

La figure 5.12 présente un exemple d'une telle planification contrainte. Les points a, b, c sont les points clés définis par l'utilisateur permettant de guider la recherche de la trajectoire d'A/D. Les points intermédiaires, situés entre les points clés donnés, sont produits par le MMI de poutres flexibles et constituent une trajectoire solution contrainte, correspondant à une loi linéaire de variation des efforts entre chaque point clé.

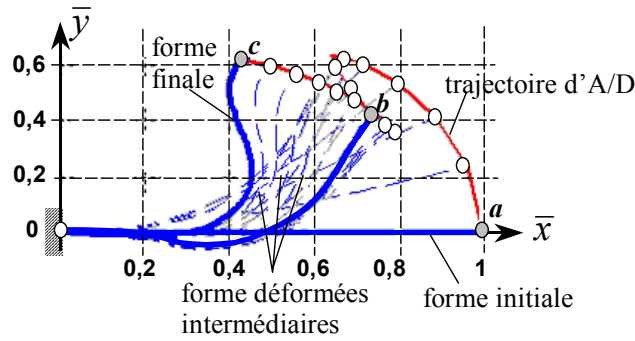


Figure 5.12. Exemple de planification de trajectoire d'A/D $\{a \rightarrow b \rightarrow c\}$ correspondant à une loi linéaire de variation des efforts.

5.4.5. Exemple de simulation 3D de poutre flexible

Jusqu'à présent, le MMI de poutres flexibles a été considéré pour des modélisations 2D dans le cas de la simulation dans l'espace des configurations. Ce modèle a été validé pour son intégration dans un système de simulation de RV compte tenu des principales contraintes de la simulation virtuelle, i.e. le temps de réponse ainsi que la génération d'une solution réaliste dans l'espace des efforts et avec une bonne précision. On peut faire l'hypothèse que certaines manipulations lors des opérations d'A/D en 3D peuvent être considérées comme un ensemble de manipulations successives 2D afin de pouvoir simplifier le problème de résolution des EDOs en 3D en réduisant cette tâche à un problème 2D et donc, en diminuant le temps de calcul. Cependant, il est également intéressant d'évaluer le comportement du MMI appliqué directement au problème 3D, i.e. MMI basé sur les équations (4.44) ou (4.51). De plus, la plupart des simulations virtuelles sont en réalité de nature tridimensionnelle avec l'utilisation de méthodes spécifiques différentes de celles appliquées en 2D, comme l'interaction avec des objets 3D ou la détection des collisions en 3D, par exemple. Ainsi, des tests numériques supplémentaires ont été effectués afin d'évaluer le MMI appliqué à un problème 3D.

Premièrement, comme dans le cas des études expérimentales en 2D, le MMI est évalué du point de vue de la simulation réaliste, i.e. la génération d'une réponse adéquate dans l'espace des efforts associé à l'espace des configurations où les CLs géométriques de référence ont été spécifiées. Ces CLs ont été produites à partir des données de référence générées par le MMI lorsque les CLs mécaniques de référence de valeur arbitraire (efforts-suiveurs de référence) $\bar{\mathbf{Q}}_{ref(\bar{s}=1)}(i)$ et $\bar{\mathbf{M}}_{ref(\bar{s}=1)}(i)$, $i = \{1, 2, 3, \dots, m\}$ avec m nombre de points sur la trajectoire d'A/D générée, sont appliquées à une extrémité libre d'une poutre flexible 3D encastée à l'autre extrémité. Dans ce cas, la réponse du système mécanique dans l'espace des configurations (trajectoire d'A/D et formes déformées de la pièce flexible) est unique. Les tests consistent donc en comparaison des efforts requis $\bar{\mathbf{Q}}_{num(\bar{s}=1)}(i)$ et $\bar{\mathbf{M}}_{num(\bar{s}=1)}(i)$ produits par le MMI, qui correspondent à une réponse mécanique du système soumis aux CLs géométriques de référence $\bar{\mathbf{X}}_{ref(\bar{s}=1)}(i)$ et $\bar{\mathbf{\Theta}}_{ref(\bar{s}=1)}(i)$ (trajectoire d'A/D de référence), avec des efforts de référence connus.

La Figure 5.13 présente une telle manipulation de poutre flexible 3D dans l'espace des configurations adimensionné $(\bar{\mathbf{X}}, \bar{\mathbf{\Theta}})$: la simulation de la pièce soumise à des CLs géométriques (trajectoire d'A/D enregistrée) de référence avec la génération des réponses correspondantes dans deux espaces associés, i.e. l'espace des efforts-suiveurs $(\bar{\mathbf{Q}}_{num}, \bar{\mathbf{M}}_{num})$ ainsi que celui des configurations (génération des formes déformées de la pièce manipulée). La trajectoire de référence, exprimée par $\bar{\mathbf{X}}_{ref(\bar{s}=1)}(i)$ et $\bar{\mathbf{\Theta}}_{ref(\bar{s}=1)}(i)$, a été enregistrée à partir de l'application des efforts-suiveurs de référence suivants : $\bar{Q}_{1ref(\bar{s}=1)} = 0$, $\bar{Q}_{2ref(\bar{s}=1)} = 2$, $\bar{Q}_{3ref(\bar{s}=1)} = 2$, $\bar{M}_{jref(\bar{s}=1)} = 0$, $j = \{1, 2, 3\}$.

Les lois de variation des efforts de référence $\bar{Q}_{ref(\bar{s}=1)}(i)$ et $\bar{M}_{ref(\bar{s}=1)}(i)$ sont linéaires (Figure 5.13c).

La Figure 5.13b illustre l'influence des erreurs numériques sur l'évaluation des lois de variation des efforts lors de la génération dynamique des réponses du système mécanique dans les espaces des efforts/configurations par le MMI de poutres flexibles. Notamment, une erreur numérique due à une approximation de la solution initiale pour la méthode de tir utilisée dans ce cas de simulation a été observée au début du processus de simulation. Toutefois, l'erreur relative maximale concernant les efforts produits par le MMI ne dépasse pas le seuil de 10% ce qui est tout à fait acceptable du point de vue de la simulation réaliste du comportement mécanique de pièces souples. Ceci montre par conséquent la stabilité numérique du MMI en 3D lorsque la simulation de poutres flexibles est effectuée dans l'espace des configurations.

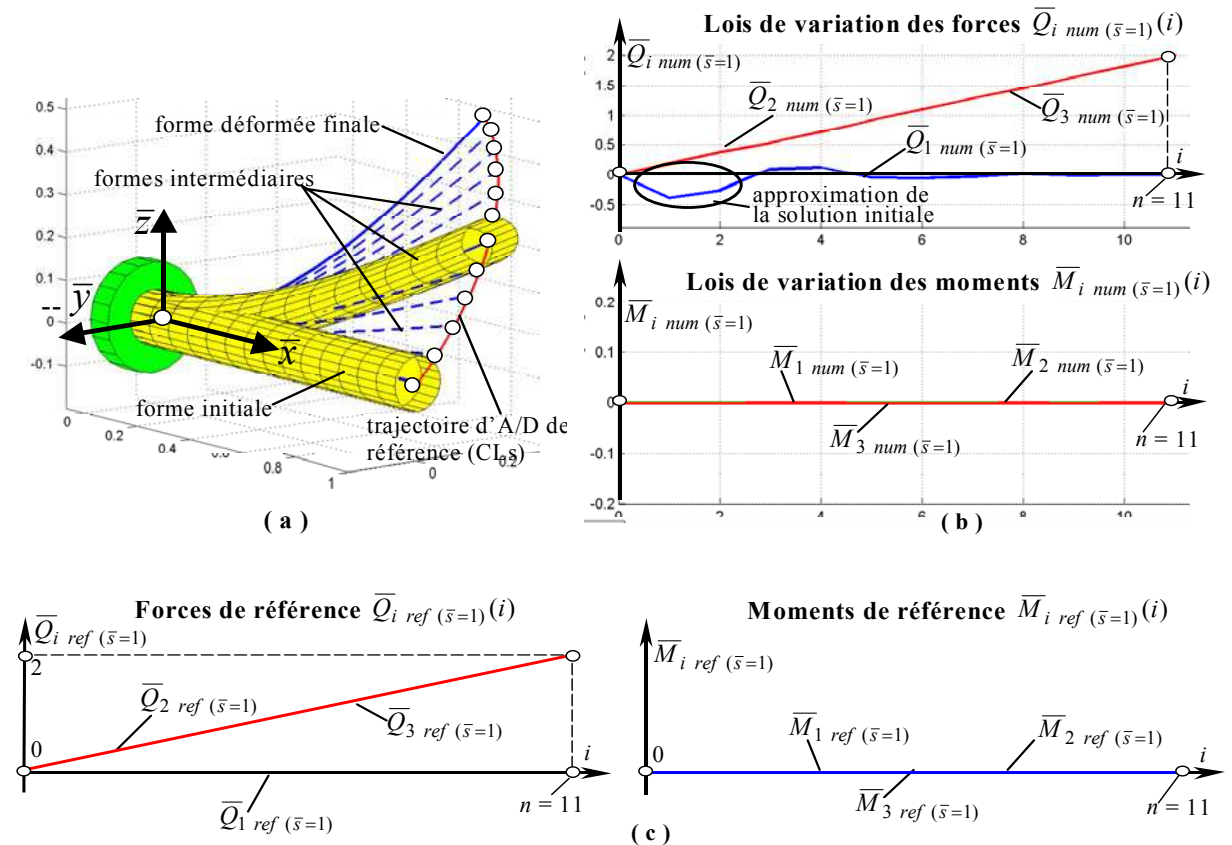


Figure 5.13. Evaluation du MMI 3D dans le cas de simulation dans l'espace des configurations :
 (a) trajectoire d'A/D de référence et formes déformées réalistes générées par le MMI,
 (b) lois réalistes de variations des efforts produits par le MMI pour les CLs donnés,
 (c) lois linéaires de variations des efforts-suiveurs de référence.

Deuxièmement, nous nous intéressons dans cette partie à l'évaluation du MMI 3D du point de vue du temps de réponse. Le test présenté ci-dessus a été réalisé sur un PC Intel Pentium 4 avec un processeur 2.8 GHz et 520 MB de RAM. Le temps CPU total de calcul de 11 formes déformées avec l'évaluation dynamique de la réponse associée dans l'espace des efforts-suiveurs est 15,45 s, ce qui correspond au temps CPU moyen 1,4 s pour générer une déformée.

Cet exemple montre que le traitement numérique du MMI de poutres flexible 3D, basé sur l'utilisation de la méthode de tir dans le cas de la simulation dans l'espace des configurations, entraîne un temps de calcul assez important vis-à-vis de la contrainte de simulation en temps réel. En conséquence, il est nécessaire d'utiliser une stratégie particulière appliquée à ce type de simulations. La première solution peut être basée sur l'interaction des modèles MMI/MTR proposée dans la méthodologie générale de simulation virtuelle de pièces déformables (chapitre 3). Rappelons qu'une

telle interaction est effectuée à partir de l'utilisation parallèle de deux modèles généraux, appelés MMI et MTR, dont la particularité se résume à la rapidité de réponse durant la simulation virtuelle. Ainsi, durant la modélisation plus lente effectuée par le MMI, le MTR, modèle plus rapide mais mécaniquement moins précis, fournit des réponses intermédiaires en terme de la déformation, afin de préserver la fluidité des images et donc, du mouvement d'une pièce flexible donnée lors de sa déformation. Concrètement, cela signifie que le MTR choisi doit être capable de produire un certain nombre d'images R entre deux réponses consécutives (données de sortie) calculées par le MMI. Ainsi, les futures études à effectuer dans le contexte d'interaction et/ou recalage possible des modèles MMI et MTR doivent fournir une réponse en termes d'influence des CLs géométriques imposées (i.e. la simulation dans l'espace des configurations) sur un paramètre R , qui est un rapport de temps moyens de calcul t_{MMI} et t_{MTR} nécessaires pour la génération d'une forme déformée 3D par les deux modèles MMI et MTR (Figure 3.4b). Cependant, lorsque la différence entre les données réalistes et celles produites par le MTR devient trop importante, le recalage du modèle MTR ou la mise à jour des données réalistes produites par le MMI n'est plus possible. Dans ce cas, il semble que l'utilisation du seul MMI est envisageable (avec la réinitialisation de la simulation) si aucun des modèles MTR disponibles ne permet de fournir une réponse approchée aux données réalistes générées par le MMI.

Une autre solution possible en ce qui concerne la réduction de temps de calcul, consiste en l'augmentation du nombre de points intermédiaires définissant la trajectoire d'A/D. Notamment, une telle augmentation peut être effectuée par :

- l'opérateur directement : ses mouvements sont ainsi plus délicats et lents, moins brusques,
- l'ajout automatique de points intermédiaires entre les points clés de passage définissant la trajectoire d'A/D et fournis par l'opérateur.

Il est clair que le temps total de planification de trajectoire d'A/D avec l'évaluation des réponses associées dans l'espace des efforts sera plus conséquent si le nombre de points intermédiaires est augmenté. Cependant, la fluidité des mouvements de la pièce virtuelle pourrait être mieux préservée. De plus, il est nécessaire de souligner que chaque manipulation virtuelle dans un contexte industriel applicatif, comme la simulation d'A/D ou de maintenance virtuels, est accompagnée par le contrôle correspondant des résultats : le contrôle visuel de la déformation, la perception des efforts de retour, l'évaluation d'un état de contraintes dans la pièce déformée, etc. Par conséquent, le contrôle multicritères nécessite un temps pour la compréhension et l'analyse des résultats par un être humain afin de pouvoir effectuer le meilleur choix parmi les solutions envisagées possibles. Ainsi, le fait d'ajouter les points intermédiaires peut être un certain compromis entre la nécessité de produire une déformation d'une pièce en question en temps réel et la nécessité d'analyse d'un phénomène modélisé ce qui requiert un certain temps.

Du point de vue du temps de calcul, l'ajout de points complémentaires signifie en réalité que l'approximation de la solution initiale requise pour la méthode de tir, utilisée dans le cas de la simulation dans l'espace des configurations, sera plus exacte. En effet, le calcul de toute forme déformée, correspondant à l'itération suivante à effectuer par la méthode de tir, est effectué à partir d'une nouvelle solution initiale qui est représentée dans notre approche par la solution exacte pour la dernière itération (dernier point courant de la trajectoire d'A/D). Cette solution est par ailleurs la réponse dans les espaces des efforts/configurations évaluée par le MMI. En conséquence, plus la solution initiale s'approche d'une solution recherchée, ce qui est équivalent à l'ajout de points complémentaires (CLs géométriques), plus le temps de réponse diminue car la méthode de tir converge plus rapidement. Par ailleurs, la même tendance peut être observée lorsque la méthode de collocation est utilisée pour les simulations dans l'espace des efforts (Tableaux 5.2 et 5.3). La Figure 5.14 montre ainsi la possibilité de réduire le temps moyen de réponse en augmentant le nombre de points de la trajectoire d'A/D. Ces tests ont été effectués sur un PC banalisé avec un processeur 800 MHz et 380 MB de RAM.

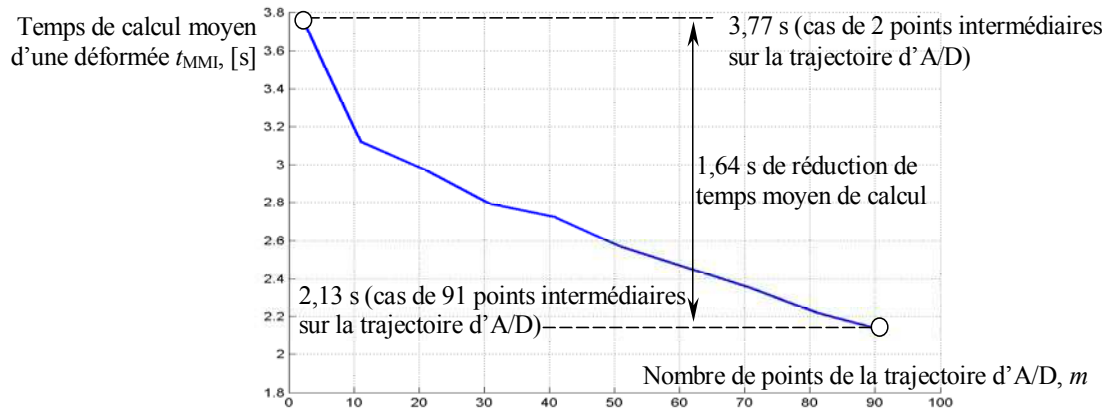


Figure 5.14. Réduction du temps moyen de calcul lors de la génération des déformées pour la simulation de la Figure 5.13.

5.4.6. Recherche d'une solution par la discrétisation de l'espace

5.4.6.1. Principe de la méthode de discrétisation de l'espace

La modélisation d'un comportement de pièces virtuelles à caractère flexible doit, d'une part, être cohérente par rapport aux contraintes de toute simulation virtuelle (temps de réponse, données réalistes de simulation,...) tout en répondant aux différents objectifs d'une étude comme l'optimisation du processus de manipulation, la prise en compte des contraintes de conception, d'A/D, d'ergonomie, etc. Dans le contexte de simulation des opérations d'A/D ou de maintenance virtuelles, l'étude et l'optimisation de ces dernières se résument notamment à :

- la planification/optimisation de trajectoires d'A/D du point de vue de la minimisation des efforts nécessaires à développer, de l'évitement des collisions avec des obstacles, de la minimisation du chemin et du temps de parcours, etc.,
- le contrôle de l'état de contraintes dans la pièce déformée lors de sa manipulation,
- la prise en compte des contraintes ergonomiques : les efforts requis ne doivent pas dépasser une certaine limite caractérisant des efforts admissibles pour un être humain, le contrôle de l'espace de travail, etc.,
- etc.

A ces contraintes, des problèmes propres à la simulation numérique et vus dans les sections précédentes s'ajoutent. Notamment, lorsqu'il s'agit de la simulation d'une pièce flexible dans l'espace des configurations, les problèmes de temps de réponse et de multiplicité de solutions sont à prendre en compte durant une manipulation virtuelle. Dans cette partie, nous nous intéressons à une autre approche proposée dans le but de tenir compte non seulement des problèmes de traitement numérique du MMI, mais aussi considérer certaines contraintes énumérées ci-dessus.

Cette approche est basée sur un principe de représentation globale de l'espace des configurations d'une pièce flexible, représentation qui est directement liée à l'espace des efforts associé. La description de l'espace des configurations est effectuée à partir de l'espace des efforts et constitue une étape préliminaire d'une simulation virtuelle. Cette étape peut être considérée comme la création d'un espace des états possibles d'une pièce flexible donnée compte tenu de certaines contraintes. La construction de cet espace est équivalente à la représentation discrétisée de tous les états possibles de la pièce, évalués sous certaines contraintes. Ainsi, chaque nœud de cet espace contient les informations nécessaires concernant l'état de la pièce, les efforts requis afin d'atteindre cet état, la géométrie de la pièce, etc.

La construction de cet espace particulier commence, dans un premier temps, par la création d'un espace des efforts déjà considéré dans les sections précédentes du présent chapitre. L'espace des efforts est créé par l'utilisateur à partir des efforts spécifiés a priori. Ces efforts peuvent représenter :

- les efforts admissibles à ne pas dépasser (effort critique de flambement,...),

- les efforts limites compte tenu des normes ergonomiques,
- les efforts indésirables à éviter (moment de torsion à éviter,...). Dans ce cas, un effort parasite peut avoir une valeur nulle, par exemple,
- etc.

Une fois les bornes de l'espace des efforts spécifiées, une technique de discrétisation de cet espace est utilisée. L'utilisateur détermine un certain pas de discrétisation de l'espace des efforts. A partir de ce pas, la discrétisation de l'espace des efforts est réalisée. Chaque nœud de cet espace est une combinaison des efforts qui peuvent être appliqués à la pièce flexible à étudier. L'espace des efforts discrétisé est une base à partir de laquelle un espace des configurations associé sera déterminé. L'espace des configurations de la pièce va représenter un domaine de travail de celle-ci également discrétisé.

L'espace des configurations est également constitué des nœuds représentant des réponses mécaniques du système donné. Ainsi, afin de pouvoir construire l'espace des configurations, i.e. trouver toutes les réponses mécaniques possibles, la simulation de la pièce flexible dans l'espace des efforts créé auparavant est effectuée : une réponse unique correspondant à chaque nœud de l'espace des efforts est trouvée dans l'espace des configurations. A l'issue de la recherche des réponses mécaniques, un ensemble de nœuds constituant donc l'espace des configurations est généré par le MMI de poutres flexibles. Chaque nœud dans l'espace des configurations correspond ainsi à une configuration géométrique caractérisant un état déformé de la pièce flexible sous une charge dont la valeur est définie au nœud correspondant de l'espace des efforts associé.

Lors du processus de construction de l'espace des configurations, où autrement dit lors de la simulation du comportement de la pièce flexible donnée sous différentes combinaisons de charges extérieures, il est également possible de stocker des informations concernant la déformation ou la courbure de la pièce, la distribution des efforts internes et l'état de contrainte dans la pièce, etc. Cette information permettra de mieux qualifier une manipulation donnée de la pièce dans un environnement de RV, la manipulation soumise aux contraintes de conception, technologiques, etc. De plus, il est préférable d'utiliser une forme adimensionnée du système d'EDOs décrivant le comportement de la poutre flexible. Dans ce cas, l'espace d'états constitué des espaces discrétisés des efforts et des configurations prend une forme généralisée, applicable à différentes pièces de type poutres flexibles ayant des caractéristiques matériau et dimensionnelles diverses.

On peut également remarquer que la construction des espaces discrétisés est une action préalable qui nécessite naturellement un temps de calcul conséquent. Donc, il est nécessaire de considérer cette technique comme un pré-calcul pour la simulation virtuelle. En effet, pour son application temps réel, il convient de créer les espaces a priori. Au cours d'une manipulation virtuelle, le champ des solutions pré-calculées sera utilisé directement, sans aucun calcul « lourd » en terme de temps de réponse. Dans ce dernier cas, il ne s'agit plus de la simulation du comportement de pièces flexibles soumises à des CLs géométriques (PL), mais simplement à une recherche temps réel des solutions possibles et/ou une solution optimale dans les espaces pré-calculés des configurations et des efforts en fonction des objectifs de simulation dans l'espace des configurations, par exemple. Ainsi, il est possible de parler de bases de données contenant les espaces pré-calculés pour les utiliser dans une manipulation virtuelle de pièces flexibles a posteriori.

L'approche proposée est particulièrement intéressante, car elle permet de :

- contribuer à une optimisation du processus A/D de pièces flexibles en amont par la création d'un espace des efforts contraint borné,
- éviter le problème de solutions multiples lorsqu'il s'agit d'une simulation de pièces flexibles dans l'espace des configurations : chaque nœud des espaces des configurations/efforts pré-calculés correspond à une solution unique,
- diminuer fortement le temps de réponse lorsque la recherche d'une solution pré-calculée est effectuée dans le contexte de simulation d'une pièce flexible soumise à des CLs géométriques.

L'utilisation des espaces pré-calculés est également possible lorsque des obstacles sont présents dans l'espace de travail de la pièce flexible. Il est nécessaire de noter que la phase préliminaire de construction des espaces correspond à l'étude du comportement de la poutre flexible

dans un espace libre d'obstacles. Ainsi, si un obstacle est présent dans l'espace de travail de la pièce en question, il convient de projeter la géométrie de cet obstacle dans l'espace pré-calculé des configurations libres de la pièce. Cela permet de savoir notamment si les CLs géométriques données, auxquelles la pièce flexible sera soumise, entraînent des collisions et quelles sont les configurations géométriques pré-calculées et visualisées assurant une trajectoire d'A/D libre de collisions.

5.4.6.2. Exemple de recherche d'une solution en 2D

Dans cette partie un exemple de simulation temps réel 2D, basée sur une recherche quasi-instantanée d'une solution à partir des espaces des efforts/configurations pré-calculées, est présenté. Une telle simulation correspond à la manipulation d'une pièce flexible encastree à une extrémité et soumise à des CLs géométriques définies dans l'espace des configurations.

L'espace des efforts contraint adimensionné $(\bar{Q}, \bar{N}, \bar{M})$ a été construit à partir des bornes suivantes spécifiées par l'utilisateur : $\bar{Q}(1) \in [-5; 5]$, $\bar{N}(1) \in [-5; 5]$, $\bar{M}(1) \in [-5; 5]$. La Figure 5.15a présente un tel espace discrétisé dont chaque nœud a sa propre couleur indiquant la variation de la norme des efforts requis. La Figure 5.15b illustre l'espace des configurations discrétisé $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{\theta})$ dont chaque nœud est une réponse mécanique unique. L'ensemble des nœuds représente une forme particulière dans l'espace des configurations ressemblant à une molécule. Ainsi, l'ensemble des réponses dans cet espace est appelé « molécule de solutions ». La Figure 5.15c est une projection de l'espace des configurations et représente un sous-espace (\bar{x}, \bar{y}) utilisé par l'utilisateur dans la recherche interactive rapide des solutions. A chaque nœud de cet espace correspond un ensemble de CLs géométriques spécifiées par l'utilisateur lors des simulations temps réel.

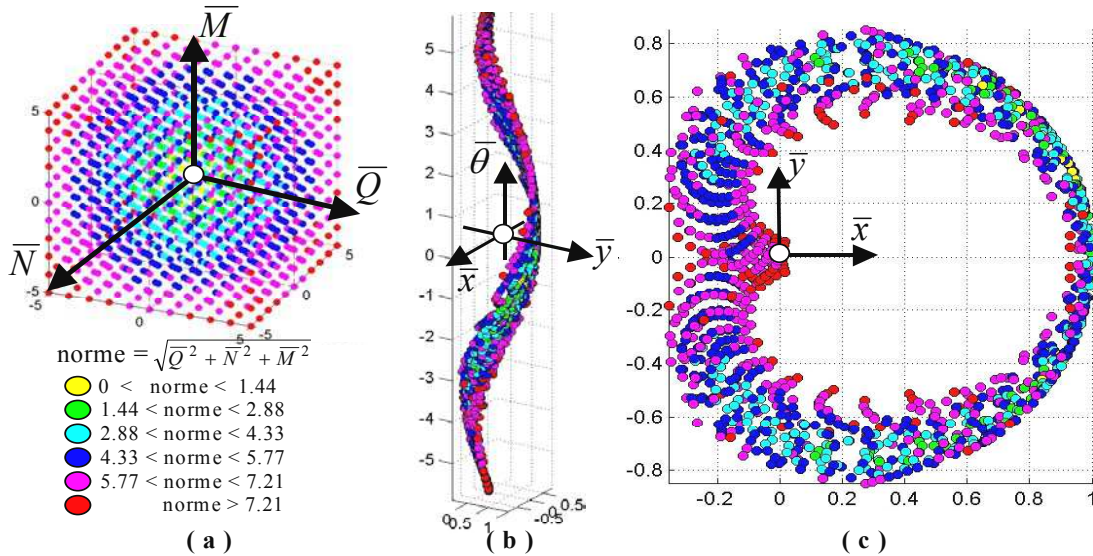


Figure 5.15. Exemple d'espaces des efforts et de configurations associés d'une poutre flexible :
 (a) espace des efforts adimensionnés dont les bornes sont spécifiées par l'utilisateur,
 (b) espace des configurations adimensionné associé,
 (c) sous-espace des configurations utilisé pour la recherche interactive des solutions.

La Figure 5.16 illustre un exemple d'utilisation des espaces pré-calculés (Figure 5.15) pour la recherche temps réel d'une solution associée à des CLs géométriques fournies par l'opérateur. En fonction des CLs fournies, une solution réaliste et adéquate, proche des CLs géométriques données, est trouvée en temps réel : la forme déformée ainsi que les efforts nécessaires à développer afin de pouvoir atteindre une position donnée sont visualisés. Cet exemple montre également une situation particulière lorsque des positions proches 1 et 2 de l'extrémité manipulée engendrent différents efforts à appliquer (les détails sont dans le Tableau 5.7). L'information affichée permet :

- d'analyser la manipulation d'A/D du point de vue de l'ergonomie : choisir la position 1 correspondant aux efforts minima à développer par un être humain au cours de l'A/D réel,
- de répondre aux problèmes de conception : définir une position/orientation d'un trou où le tube souple à manipuler sera introduit avec les efforts minima requis,
- etc.

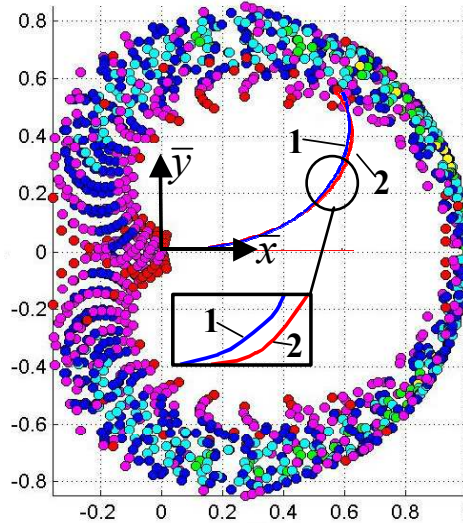


Figure 5.16. Evaluation réaliste et temps réel des déformées et des efforts requis pour la recherche d'une solution dans l'espace des configurations discrétisé pré-calculé.

CLs géométriques	Coordonnées adimensionnées $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{\theta})$	Réponse adimensionnée dans l'espace des efforts $(\bar{Q}, \bar{N}, \bar{M})$	Catégorie des efforts évalués
configuration 1	(0,59; 0,58; 2,02)	(0,0; -3,0; 3,0)	efforts-suiveurs
configuration 2	(0,57; 0,56; 2,34)	(-5,0; -5,0; 5,0)	efforts-suiveurs

Tableau 5.7. Comparaison des solutions pour la manipulation d'une poutre flexible (Figure 5.16).

5.5. Conclusions

Dans ce chapitre nous avons présenté les principaux aspects de mise en place numérique du MMI de poutres flexibles et mis en évidence différents problèmes liés aux particularités du modèle et des méthodes numériques employées. Globalement, le problème général à souligner est la nécessité de résoudre les EDOs non-linéaires soumises au PL (en deux points) ce qui nécessite la mise en œuvre de méthodes numériques particulières (méthode de tir, méthode de collocation,...). Par conséquent, ceci peut entraîner l'augmentation du temps de résolution des EDOs décrivant le comportement de pièces flexibles et donc, devenir une contrainte forte par rapport à l'objectif de toute simulation virtuelle : la génération d'une réponse du système donné en temps réel.

De plus, l'étude du comportement numérique du MMI dans les deux espaces proposés au chapitre 2 a permis d'illustrer l'influence du problème de solutions multiples sur la génération de réponses physiquement adéquates du système. Notamment, ce problème montre bien certaines limites des simulations dans l'espace des configurations qui sont les manipulations les plus répandues actuellement dans le contexte de RV. En effet, le fait qu'il est plus facile technologiquement de mesurer et de transmettre des données de nature géométrique a favorisé le développement des outils et

des interfaces permettant d'effectuer plutôt un contrôle en effort : les données d'entrée pour la simulation virtuelle sont les CLs géométriques. Une telle simulation est donc équivalente à une manipulation virtuelle dans l'espace des configurations et soulève par la suite le problème de multiplicité de solutions. En conséquence, ceci est un facteur important permettant de réorienter, de favoriser le développement d'interfaces de RV capables de fournir une information de nature mécanique (forces, moments) en entrée.

En effet, les tests dont les résultats ont été présentés dans ce chapitre montrent que la simulation effectuée à partir des CLs mécaniques définies dans l'espace des efforts est plus intéressante du point de vue :

- de la simulation adéquate de la déformation : une réponse correspondante dans l'espace des configurations est unique ce qui garantit une solution réaliste et physiquement cohérente,
- du temps de réponse : la simulation est plus rapide et répond bien à une contrainte de simulation en temps réel.

Notamment, les résultats intéressants du point de vue du temps de calcul ont été obtenus lorsque la méthode de collocation, discutée dans ce chapitre, a été utilisée pour la résolution du système d'EDOs du MMI. Par contre, le problème d'existence des solutions multiples ne permet plus d'appliquer cette méthode à la simulation d'une pièce souple dans l'espace des configurations, car la forme déformée de la pièce n'est pas connue, malgré le fait que les CLs géométriques sont fournies des deux côtés de la pièce, et il est possible d'avoir physiquement plusieurs solutions en terme de déformées satisfaisant aux CLs géométriques données. Dans ce dernier cas une méthode générale – méthode de tir – est utilisée pour la mise en place numérique du MMI. Cependant, une solution basée sur l'approximation automatique préalable d'une solution initiale et permettant de guider la recherche d'une solution, plus réaliste physiquement, dans l'espace des configurations avait été proposée. Par ailleurs, cette technique permet également de diminuer de temps de recherche d'une solution et même d'éviter des situations critiques lorsque des efforts très importants sont générés par le MMI à cause d'une mauvaise solution initiale, empêchant de converger la méthode numérique et donc, de fournir une solution.

Différentes études expérimentales ont été également effectuées afin de pouvoir comparer les solutions fournies par le MMI, analyser le comportement numérique du modèle et la stabilité des méthodes numériques employées, valider les résultats ainsi que les approches proposées pour le traitement numérique du problème dans différents espaces en fonction des CLs fournies. Des tests expérimentaux physiques et numériques, présentés dans ce chapitre, montrent la cohérence des résultats générés par le MMI du point de vue du réalisme des simulations effectuées par rapport aux mesures et données de référence. De ce fait, le modèle mécanique de poutres flexibles ainsi que les méthodes numériques utilisées sont validés et peuvent être intégrés dans un système de simulation virtuelle de pièces déformable puis exploités avec un succès lors des études/analyses/ optimisations des opérations d'A/D et de maintenance virtuelles. Notamment, des études expérimentales des opérations d'assemblage réalisées et présentées au chapitre suivant seront basées sur le fait que les résultats fournis par le MMI validé sont physiquement corrects.

Toutefois, malgré le fait que le MMI mis en place satisfait aux contraintes de la simulation virtuelle des opérations d'A/D lorsque les CLs mécaniques sont fournies, la contrainte de temps de réponse en ce qui concerne la simulation virtuelle 3D d'une pièce de type poutre flexible dans l'espace des configurations reste un problème essentiel. D'une part, ce problème peut être caractérisé par certaines limites techniques liées à la formulation du MMI ainsi qu'aux méthodes numériques utilisées malgré une procédure de guidage de la recherche de solutions. Ces limites montrent la nécessité de développement d'autres approches adaptées au contexte donné et, en particulier, au PL. Certaines propositions ont été faites comme :

- la technique d'ajout automatique des points à une trajectoire d'A/D,
- la réduction de bande passante concernant le transfert de données géométriques mesurées par une interface motrice de RV.

D'autre part, quelques solutions, basées sur le même type de traitement numérique du problème mais en utilisant des stratégies diverses concernant la recherche d'une solution, ont été proposés :

- la technique de recherche rapide d'une solution à partir de la discrétisation des espaces des efforts et des configurations,
- l'interaction des modèles MTR/MMI.

La technique de recherche d'une solution par discrétisation de l'espace est une méthode intéressante, car elle permet de trouver une réponse réaliste en temps réel à partir des solutions pré-calculées, d'éviter le problème de solutions multiples et même d'effectuer un certain nombre d'optimisations. Cependant, cette méthode a également certaines limites. Notamment, la création d'un espace des solutions nécessite des calculs préalables onéreux en terme de temps variant entre quelques minutes et quelques heures en fonction des bornes et du nombre de nœuds de l'espace des efforts. De plus, cette méthode n'est valable que pour une forme initiale donnée. Par conséquent, lorsque la forme initiale exprimée par la courbure/torsion initiales change, il est nécessaire de construire un nouvel espace des états de la pièce flexible.

Une approche plus générale, basée sur l'interaction et/ou le recalage possible des modèles MTR/MMI, est discutée au chapitre 3. Toutefois, il est difficile de l'appliquer directement, car une sélection des modèles à mettre en interaction est nécessaire. Cette sélection peut être basée sur l'analyse d'un rapport des temps moyens de génération des déformées R pour chaque paire de modèles MTR/MMI et donc, nécessite des études complémentaires. Cependant, une fois une telle étude réalisée, une sélection de modèles à faire interagir peut être faite de façon automatique à partir de ce rapport R . Ainsi, des recherches complémentaires dans ce sens sont encore nécessaires.

Il convient également de faire quelques remarques générales concernant le problème de recherche de solutions adéquates lorsque la simulation d'une pièce flexible est effectuée dans les espaces des efforts/configurations. Comme on l'a vu précédemment, le type et la valeur des données d'entrée (CLs géométriques et mécaniques) jouent un rôle important durant le processus de recherche d'une solution dans les espaces des efforts/ configurations. Notamment, si les valeurs des efforts appliqués à une pièce flexible donnée (simulation dans l'espace des efforts) ne sont pas correctes, par exemple, elles sont trop importantes, la génération d'une solution dans l'espace des configurations n'est pas toujours garantie. Ce problème est lié en effet aux hypothèses de base du MMI : les sections de la poutre avant et après la déformation restent normales, le rayon de courbure de la ligne axiale de la pièce flexible est assez grand par rapport aux dimensions de la section, les déformations sont petites, etc. Ainsi, si les efforts extérieurs appliqués à la pièce ou évalués par le MMI sont trop importants, ils peuvent provoquer des situations critiques en ce qui concerne le comportement de la pièce flexible : l'écrasement de la section, le phénomène de flambement avec la déformation de la section, le dépassement d'une contrainte admissible pour un matériau donné et donc, la création de grandes déformations dans la structure, etc. Toutes ces situations ne sont plus valides vis-à-vis des hypothèses faites lors de la formulation du MMI et ainsi, peuvent entraîner des problèmes de convergence numérique en ce qui concerne la simulation du comportement de pièces flexibles durant une manipulation virtuelle concrète dans les espaces des efforts/configurations.

Dans le cas de la simulation dans l'espace des configurations, les CLs géométriques incorrectes, par exemple, la définition de configurations géométriques inaccessibles ou difficilement atteignables, le MMI a également des problèmes de convergence numérique et, par conséquent, ne trouve pas de solution dans l'espace des efforts. Ce problème est dû à l'hypothèse que la pièce souple modélisée par une poutre flexible est inextensible, i.e. sa longueur est constante au cours de la manipulation de la pièce.

Il convient également de mentionner qu'il existe d'autres types de paramètres d'entrée pour la simulation mécaniquement correcte du comportement de pièces flexibles : la géométrie de la pièce ainsi que son matériau (modules d'Young E et de torsion G). Le problème de recherche d'une solution peut être également provoqué par une mauvaise spécification de ces paramètres et ainsi, influencer la stabilité numérique du MMI.

Par conséquent, lorsque le MMI n'est pas capable de fournir une solution durant la manipulation virtuelle d'une pièce flexible, les actions possibles du côté de l'opérateur sont :

- dans le cas de la simulation dans les espaces des efforts/configurations, il est nécessaire de corriger les valeurs des paramètres d'entrée : les CLs géométriques/mécaniques (points définissant la trajectoire d'A/D, forces/moments extérieurs), les caractéristiques géométriques

et physiques (matériau) de la pièce. Les paramètres d'entrée doivent être cohérents par rapport aux hypothèses de base du MMI,

- dans le cas de la simulation dans l'espace des configurations basée sur la méthode de recherche d'une solution par la discrétisation de l'espace, le système de simulation d'A/D doit produire un message d'erreur proposant à l'opérateur :
 - d'effectuer une extension de l'espace des efforts contraint, i.e. d'agrandir les valeurs limites des efforts définissant les bornes de l'espace des efforts afin de pouvoir augmenter la probabilité de trouver une solution,
 - d'accroître la densité de la discrétisation de l'espace des efforts, i.e. le nombre de nœuds représentant un ensemble de solutions pré-calculées.

Chapitre 6

Etude expérimentale et évaluation des opérations d'A/D

Table des matières

6.1. Introduction	200
6.2. Critères d'évaluation des opérations d'A/D dans un environnement de RV	200
6.2.1. Formulation des critères d'évaluation	200
6.2.2. Paramètres caractérisant les opérations d'A/D	201
6.2.3. Evaluation des paramètres à l'aide du modèle mécanique	202
6.2.3.1. <i>Evaluation des déplacements de la pièce flexible</i>	202
6.2.3.2. <i>Evaluation des efforts requis à développer</i>	203
6.2.3.3. <i>Evaluation de la courbure de la pièce déformée</i>	205
6.2.3.4. <i>Evaluation des efforts internes dans la pièce déformée</i>	206
6.3. Démarche expérimentale	207
6.3.1. Objectifs de l'étude expérimentale	207
6.3.2. Modélisation de l'opération d'assemblage à étudier	208
6.3.3. Système optique d'analyse de mouvement de RV	210
6.3.4. Procédure expérimentale et traitement des résultats	212
6.4. Caractérisation des opérations d'assemblage	214
6.4.1. Modélisation de l'opération d'assemblage virtuel	214
6.4.2. Utilisation de la méthodologie de simulation d'A/D de pièces flexibles dans l'étude de l'opération d'assemblage virtuel	215
6.4.2.1. <i>Détermination de caractéristiques mécaniques du matériau</i>	215
6.4.2.2. <i>Modélisation d'un environnement virtuel extérieur</i>	216
6.4.2.3. <i>Autres données d'entrée requises pour la simulation virtuelle</i>	217
6.4.3. Evaluation et caractérisation de l'opération d'assemblage	217
6.4.3.1. <i>Evaluation des déplacements 3D de la pièce flexible</i>	218
6.4.3.2. <i>Evaluation des efforts-suiveurs requis</i>	219
6.4.3.3. <i>Caractérisation de l'opération d'assemblage</i>	220
6.5. Conclusions	222

6.1. Introduction

Dans les chapitres précédents nous avons exposé les objectifs et la méthodologie de simulation des opérations d'A/D et de maintenance virtuelles des systèmes mécaniques comprenant les pièces à caractère déformable. Nous avons également présenté une approche basée sur l'utilisation d'un modèle mécanique de pièce de type poutres flexibles afin de pouvoir produire des données requises de façon réaliste et en temps réel lors d'une telle simulation virtuelle. L'adaptation de ce modèle aux besoins de la simulation virtuelle réaliste d'A/D, son intégration dans un environnement de RV, son exploitation en commun avec les interfaces comportementales de RV permettent de mieux comprendre le processus de déformation complexe de la pièce, d'étudier et d'analyser son comportement mécanique en présence de différents facteurs et contraintes d'une opération d'A/D donnée, d'optimiser le processus d'A/D, de considérer des contraintes multi-métiers, etc. Tout ceci forme donc un support d'aide à la conception dans le contexte pluridisciplinaire de développement d'un produit mécanique.

Cependant, la mise en œuvre efficace de cet outil nécessite l'utilisation de certains critères d'évaluation des opérations d'A/D et de maintenance lors de la simulation virtuelle de ces dernières. Ces critères d'évaluation permettraient, d'une part, de caractériser une opération des points de vue quantitatif et qualitatif et, d'autre part, de faciliter l'analyse et l'optimisation du processus à étudier. Ainsi, le but de ce présent chapitre est de formuler un certain nombre de critères d'évaluation des opérations d'A/D virtuelles ainsi que de donner quelques exemples de leurs applications à une tâche précise d'étude d'une opération d'assemblage. Comme nous allons le voir, les critères d'évaluation sont basés sur différents paramètres à identifier durant la simulation d'une opération virtuelle. Ces paramètres jouent ainsi un rôle important dans l'évaluation d'une opération donnée : l'estimation de leurs valeurs adéquates est un facteur déterminant pour la prise de décision durant l'analyse/optimisation de l'opération. Ainsi, nous préciserons un certain nombre de paramètres caractérisant les opérations d'A/D de pièces flexibles et présenterons quelques exemples de leur évaluation réaliste à l'aide du MMI de poutres flexibles.

Nous nous intéresserons également dans ce chapitre à une étude expérimentale d'une opération réelle d'assemblage d'une pièce flexible, l'opération que l'on peut souvent rencontrer dans la pratique industrielle : le montage d'une pièce souple modélisée par une poutre flexible. Cette opération de montage modélise une action précise courante à accomplir lors de l'assemblage ou de la maintenance d'une pièce flexible et soulève différents problèmes liés notamment à la méthodologie de simulation des opérations d'A/D de pièces déformables dont certains éléments ont été déjà discutés au chapitre 3. Par ailleurs, certains paramètres d'évaluation des opérations d'A/D de pièces déformables, en particulier, les forces et les moments réalistes fournis par le MMI, seront utilisés pour l'étude de cette opération d'assemblage. Nous exposerons également les principaux éléments de la démarche expérimentale effectuée dont les résultats complèteront notre analyse et faciliteront la caractérisation des opérations d'A/D de pièces flexibles de façon générale.

6.2. Critères d'évaluation des opérations d'A/D dans un environnement de RV

6.2.1. Formulation des critères d'évaluation

Dans cette partie, certains critères d'évaluation des opérations d'A/D virtuelles de pièces flexibles sont présentés. Ces critères résument de nombreux aspects et observations faits tout au long de ce travail de thèse ainsi que différents éléments déjà discutés dans les chapitres précédents. Les critères d'évaluation ont pour but de caractériser les opérations d'A/D et de maintenance compte tenu des particularités de pièces flexibles et, notamment, de faciliter l'analyse et l'optimisation des opérations d'A/D simulées dans un environnement de RV du point de vue du développement d'un produit mécanique.

Ainsi, les études, l'évaluation, la validation des opérations d'A/D de pièces flexibles ainsi que la prise de décision lors de leur optimisation nécessitent :

- l'évaluation de la trajectoire d'A/D ainsi que de toutes les formes déformées intermédiaires de la pièce flexible pour l'absence d'interférences (collisions) entre la pièce flexible manipulée et son environnement extérieur – critère d'absence de collisions. Cependant, une opération d'A/D peut être validée lorsqu'un contact entre la pièce flexible et son environnement existe, et qu'il n'y a plus de moyen d'éviter cette configuration particulière. Dans ce cas, une déformation complémentaire de la pièce souple due à ce contact doit être prise en compte afin de pouvoir produire la forme déformée réaliste de la pièce. Néanmoins, aucune interférence entre la pièce manipulée et son environnement n'est autorisée lors du contact,
- le choix de la trajectoire d'A/D requérant les efforts minima à développer lorsque les CLs géométriques sont prescrites – critère de minimisation des efforts,
- les études de l'opération d'A/D du point de vue de l'ergonomie des actions de l'opérateur – critère ergonomique. Ces études portent essentiellement sur le contrôle interactif de valeurs des forces/moments à ne pas dépasser, le contrôle de mouvements de l'opérateur, i.e. distances/angles formant l'espace recommandé de travail, évitant la fatigue rapide d'un monteur et défini par des normes ergonomiques,
- le choix de la trajectoire d'A/D avec la longueur minimale – critère de minimisation du chemin de parcours,
- le choix de la trajectoire d'A/D correspondant au temps minimal afin d'effectuer une opération d'A/D donnée – critère de minimisation du temps d'A/D,
- le contrôle courant de l'état de contrainte dans la pièce déformée ainsi que de la courbure maximale lors de la manipulation de la pièce virtuelle flexible – critère constructif/technologique. En particulier, ceci permet de vérifier l'état de contrainte final dans la pièce montée et donc, de garantir le fonctionnement normal de la pièce lors de son exploitation effective,
- la prise en compte d'un comportement humain différent pour des personnes diverses concernées par le processus d'A/D donné – critère d'adaptabilité générique des résultats aux différents opérateurs. En effet, l'opération d'A/D simulée par un opérateur donné et étant optimale du point de vue des différents critères n'est pas forcément optimale pour une autre personne compte tenu des particularités physiologiques ou anthropométriques des différentes personnes concernées par l'opération considérée ou par les opérations similaires à celle étudiée virtuellement,
- etc.

Les éléments énumérés ci-dessus forment donc les critères à prendre en considération lors de l'évaluation d'une opération d'A/D des systèmes mécaniques comprenant des pièces souples. Ces critères permettent d'effectuer un choix des paramètres ou des actions associés à la manipulation donnée, d'optimiser une séquence d'A/D, de valider un processus d'A/D ou même d'identifier des éléments critiques nécessitant la re-conception de la pièce manipulée ou d'un sous-ensemble connexe à cette pièce. L'information fournie par le système de simulation de RV et évaluée à partir des critères présentés contribue ainsi à la capitalisation des connaissances relatives à une famille d'opérations similaires d'A/D de pièces flexibles ou à des opérations complexes particulières de ces pièces, ce qui présente un élément important pour les industriels.

Néanmoins, l'utilisation efficace des critères d'évaluation des opérations d'A/D n'a lieu que lorsqu'une information produite par le système de simulation d'A/D virtuel est adéquate, exploitable par la suite pour l'analyse. L'ensemble de ces informations permet d'identifier différents paramètres à contrôler et à utiliser lors de l'étude/analyse de l'opération d'A/D. Dans la partie suivante, nous présentons certains de ces paramètres qui forment une base requise pour les critères d'évaluation.

6.2.2. Paramètres caractérisant les opérations d'A/D

L'analyse rapide des opérations complexes d'A/D ou de maintenance de pièces déformables soumises à des grands déplacements entraînant des transformations importantes de la forme géométrique peut être effectuée de façon efficace à partir des critères d'évaluation proposés. Dans cette partie nous présentons des principaux paramètres sur lesquels les critères caractérisant les

opérations d'A/D de pièces flexibles sont basés. Certains de ces paramètres sont intrinsèques à des manipulations de pièces souples modélisées par une poutre flexible, certains sont plus généraux et donc, applicables à d'autres familles de pièces déformables.

Ainsi, parmi de nombreux paramètres géométriques, mécaniques, etc. à contrôler lors d'une opération d'A/D de pièces flexibles, quelques-uns nous semblant importants ont été identifiés :

- les déplacements de la pièce flexible,
- la courbure courante de la pièce modélisée par une poutre flexible,
- l'orientation de la section manipulée de la poutre flexible,
- les forces/moments à développer satisfaisant des CLs géométriques données,
- les efforts internes courants dans la pièce flexible,
- les réactions dues aux contacts possibles entre la pièce flexible manipulée et son environnement extérieur,
- etc.

Il convient de mentionner qu'en fonction d'une simulation donnée (simulations dans l'espace des efforts ou des configurations) certains paramètres caractérisant des opérations d'A/D ne peuvent être déterminés qu'en étant dans tel ou tel espace, certains par contre sont communs à deux espaces. Par exemple, les déplacements, la courbure de la poutre flexible ainsi que ses efforts internes peuvent être évalués par un modèle mécanique utilisé lors que la simulation est effectuée dans deux espaces associés. Par contre, les efforts à développer seront évalués lorsque la manipulation dans l'espace des configurations est effectuée bien évidemment. Par ailleurs, il est nécessaire de rappeler que les CLs mécaniques, i.e. les forces/moments connus (fournis par l'opérateur) ou inconnus (à évaluer lors de la manipulation) sont à préciser selon un chemin de chargement (ou l'ordre d'application) ou avec une nature particulière (linéaires, non-linéaires,...).

Les paramètres caractérisant les opérations d'A/D de pièces flexibles donnent par conséquent accès à un ensemble d'informations permettant d'étudier, d'évaluer, d'optimiser ces opérations compte tenu des critères correspondants : l'état de contraintes dans la pièce, l'absence d'interférences, l'assemblabilité, l'optimisation de trajectoires d'A/D, etc. Dans le cas des simulations de pièces souples modélisées par des poutres flexibles, c'est le MMI de poutres flexibles considéré précédemment qui fournit des données nécessaires afin de pouvoir évaluer les paramètres à contrôler durant la manipulation virtuelle.

6.2.3. Evaluation des paramètres à l'aide du modèle mécanique

Dans cette partie, quelques exemples d'évaluation réaliste des paramètres requis et caractérisant les opérations d'A/D et de maintenance de pièces de type poutres flexibles sont présentés. Ces exemples sont associés à une tâche de planification de la trajectoire d'assemblage d'une poutre flexible 2D dans l'espace des configurations, i.e. une poutre soumise à des CLs géométriques fournies par un utilisateur. Il s'agit d'une trajectoire d'assemblage prescrite afin d'éviter une collision avec un obstacle et de l'orientation de la section manipulée (extrémité de la pièce) caractérisée par un angle constant en tous les points intermédiaires de la trajectoire imposée (Figure 6.1). Nous présenterons consécutivement les résultats d'évaluation réaliste de quelques paramètres principaux, fournis en temps réel par le MMI, et nous discuterons des impacts d'une telle évaluation sur l'optimisation possible de cette simulation durant l'analyse des performances de cette dernière.

6.2.3.1. Evaluation des déplacements de la pièce flexible

Cette évaluation apparaît dans le cas de l'utilisation des interfaces de contrôle en effort/configuration et consiste à produire une séquence de formes déformées de la pièce flexible au cours de sa manipulation virtuelle d'A/D. Les déplacements sont de nature linéaire (positions) et angulaire (orientations) en chaque point courant de la ligne moyenne de la poutre flexible et fournis par le MMI. Les formes déformées sont par la suite reconstruites à partir de ces déplacements afin de pouvoir contrôler l'absence d'interférences entre la pièce manipulée et son environnement extérieur, par exemple.

La Figure 6.1 présente un exemple de génération de déformées réalistes d'une poutre flexible 2D soumise à des CLs géométriques lors de la planification de la trajectoire d'assemblage spécifiée par l'opérateur au cours de la manipulation afin d'éviter une collision avec un obstacle présent dans l'espace de travail de la pièce flexible. Les CLs sont définies dans l'espace des configurations adimensionné $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{\theta})$ et représentent concrètement :

- la trajectoire d'assemblage libre de collisions et passant notamment par les points clés $\{a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d\}$ avec les coordonnées : $a(1,0 ; 0,0)$, $b(0,8 ; 0,4)$, $c(0,4 ; 0,4)$, $d(0,2 ; 0,8)$,
- l'angle $\bar{\theta}$ définissant l'orientation de la section manipulée de la poutre flexible, constant pour toutes les positions intermédiaires avec la valeur 0,5 rad et fixée à 0 pour la dernière position représentant la configuration finale avant de commencer la phase suivante de l'opération d'assemblage – l'insertion de l'extrémité manipulée dans un trou.

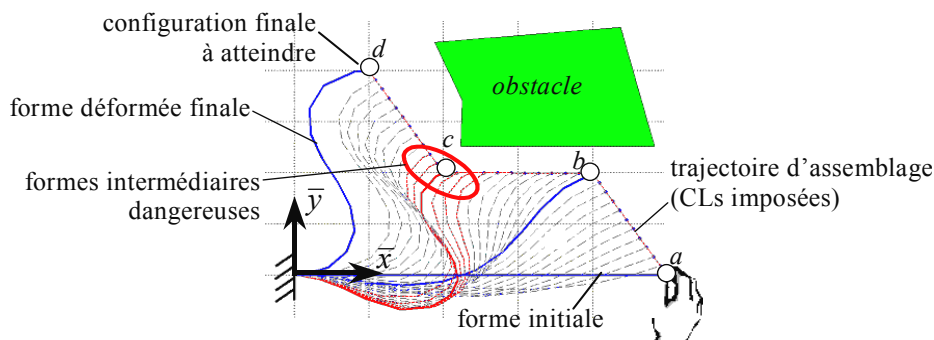


Figure 6.1. Planification de la trajectoire d'assemblage d'une poutre flexible 2D dans l'espace des configurations.

La trajectoire d'assemblage est définie en utilisant la vision globale de l'opérateur manipulant la pièce flexible. La simulation réaliste de la déformation de la pièce est basée sur le MMI. La génération des déformées (déplacements) réalistes de la pièce est importante, car elle permet d'évaluer l'opération d'A/D de façon adéquate. Notamment, les déplacements réalistes permettent de :

- contrôler l'absence des interférences réalistes entre la pièce déformée et son environnement extérieur,
- vérifier l'assemblabilité, l'accessibilité, le positionnement de la pièce flexible déformée par rapport à son environnement,
- choisir la trajectoire d'A/D optimale, i.e. libre de collisions et minimisant le chemin de parcours et donc, estimer approximativement le temps d'opération d'A/D,
- etc.

De plus, quelques formes déformées intermédiaires, appelées « dangereuses », ont été détectées au cours de la manipulation. Ces formes présentent un intérêt particulier du point de vue de l'évaluation adéquate de l'opération d'assemblage et sont analysées dans les parties suivantes de cette section.

6.2.3.2. Evaluation des efforts requis à développer

L'évaluation réaliste des efforts requis est également un facteur important caractérisant l'opération d'A/D. Dans cette partie, une telle évaluation correspondant à une réponse du système mécanique dans l'espace des efforts associé $(\bar{Q}, \bar{N}, \bar{M})$ lors de la planification de la trajectoire d'assemblage (Figure 6.1) est présentée. La Figure 6.2 illustre l'évaluation réaliste et en temps réel des efforts-suiveurs requis : les forces de flexion $\bar{Q}_{\bar{s}=1}$ et de compression $\bar{N}_{\bar{s}=1}$ ainsi que le moment de flexion $\bar{M}_{\bar{s}=1}$.

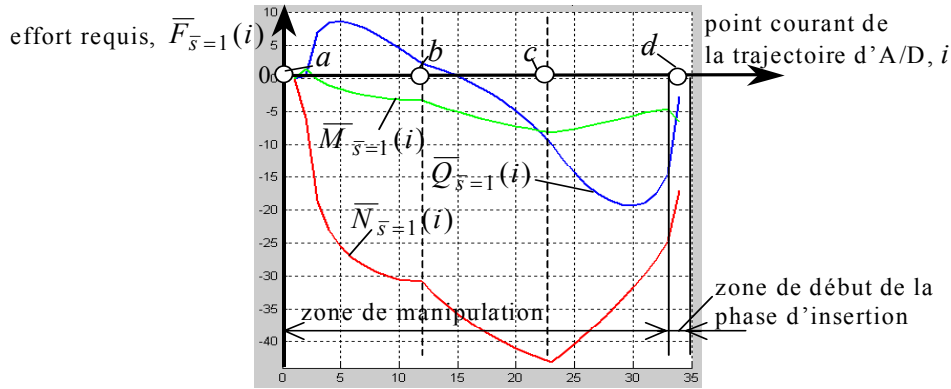


Figure 6.2. Evaluation réaliste des efforts requis à développer pour l'opération d'assemblage présentée à la Figure 6.1.

Les efforts réalistes nécessaires sont produits par le même MMI, affichés en temps réel au cours de la manipulation de la poutre virtuelle flexible et déterminent les lois de variation des efforts à développer afin d'assurer la trajectoire d'assemblage imposée. Ces paramètres sont très utiles pour :

- le contrôle des valeurs des efforts à appliquer,
- le contrôle/guidage de la trajectoire d'A/D en temps réel en fonction des lois de variation des efforts souhaités,
- l'analyse des opérations d'A/D ou de maintenance similaires sans les simulations complémentaires,
- etc.

Il est intéressant de noter que deux zones particulières le long des lois de variation des efforts ont été distinguées (Figure 6.2) : la zone de manipulation et celle d'insertion caractérisant dans le présent cas deux actions de l'opérateur. La première zone correspond à un « balayage » de la main de l'opérateur tenant la pièce flexible dans l'espace des configurations de la pièce. Cette zone de manipulation correspond à un des stades de l'opération d'A/D : ce stade est caractérisé par les très grands déplacements entraînant des changements considérables de la forme de la pièce ainsi que des variations importantes des lois des efforts.

La seconde zone de la présente opération d'assemblage est la zone d'insertion de la pièce flexible : elle correspond au moment de début d'insertion de la poutre dans un trou, i.e. le moment lorsque le stade de montage (ou la mise en place) effectif débute. Ce stade est caractérisé par :

- une faible variation de l'extrémité de la poutre manipulée : l'opérateur a atteint l'objectif de la manipulation car il est dans une zone très proche de celle définissant le positionnement de la pièce,
- la variation assez importante de la courbure de la pièce déformée ainsi que des valeurs des efforts : l'opérateur change fortement la valeur de l'angle ($\bar{\theta} = 0$ rad dans ce cas) afin de pouvoir spécifier une bonne orientation de l'extrémité manipulée, i.e. l'orientation permettant d'introduire cette extrémité dans le trou correspondant.

De plus, l'évaluation réaliste des efforts requis donne accès à d'autres types d'analyses possibles d'une opération d'A/D. Par exemple, ces données mécaniques peuvent être comparées avec les valeurs des efforts admissibles limités par des normes ergonomiques. Ainsi, des zones « critiques » caractérisées par le développement d'efforts trop importants pour un être humain peuvent être identifiées au cours de la manipulation virtuelle, visualisées et évitées à partir des modifications correspondantes de la trajectoire d'A/D. La Figure 6.3 illustre un tel contrôle des efforts en temps réel : les zones critiques sont signalées par le changement de couleur lorsqu'un effort dépasse une valeur admissible du point de vue ergonomique spécifiée avant la simulation. Cet exemple est également associé à la planification de la trajectoire d'A/D présentée sur la Figure 6.1.

Ainsi, en se basant sur les paramètres mécaniques d'évaluation des opérations d'A/D (efforts réalistes fournis par le MMI), il est également possible de :

- déterminer les efforts maxima requis permettant d'identifier un mode de processus d'A/D (manuel, robotisé) et de choisir l'outillage nécessaire (outillage spécial pour l'opération à une ou deux mains, machine pour l'assemblage automatisé,...),
- contrôler les efforts à ne pas dépasser du point de vue des aspects ergonomiques d'une tâche donnée,
- planifier une trajectoire d'A/D optimale requérant des efforts minima.

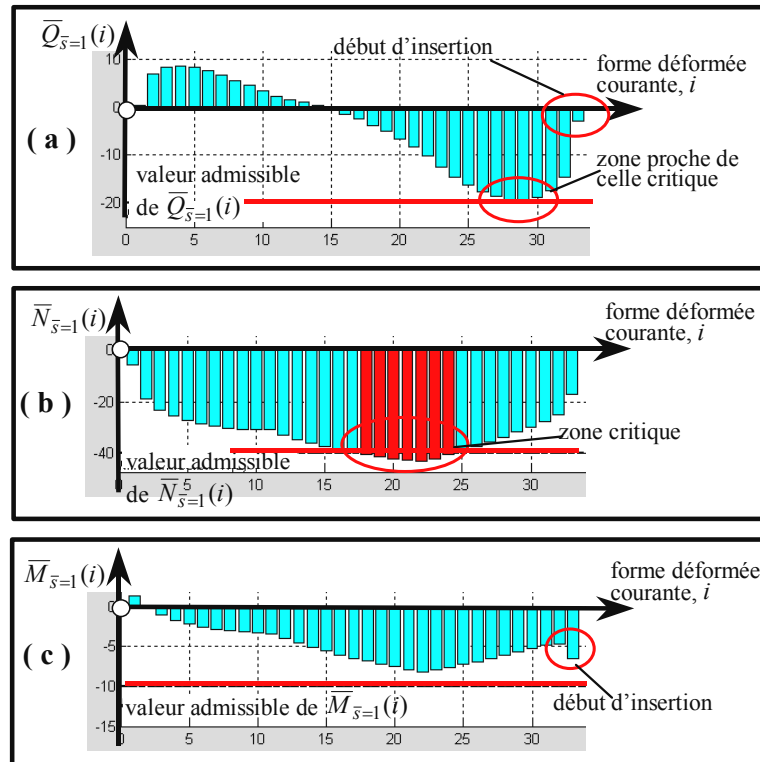


Figure 6.3. Identification rapide des zones critiques des lois de variation des efforts requis durant la planification de la trajectoire d'assemblage présentée sur la Figure 6.1 :
 (a) loi de variation de la force de flexion, (b) loi de variation de la force axiale,
 (c) loi de variation du moment de flexion.

6.2.3.3. Evaluation de la courbure de la pièce déformée

En général, la courbure de la pièce flexible déformée est un paramètre géométrique important dont l'évaluation peut être nécessaire lorsqu'une manipulation virtuelle de la pièce est effectuée dans l'espace des efforts ou des configurations. Ce paramètre caractérise l'opération d'A/D du point de vue technologique et de l'exploitation normale de la pièce flexible après sa mise en place définitive dans un système mécanique donné. En effet, la valeur de la courbure admissible (ou les bornes définissant la courbure maximale/minimale) peut être spécifiée par le concepteur afin d'éviter le phénomène d'écrasement de la section de la pièce, garantir de bonnes propriétés fonctionnelles de la pièce flexible lors de son exploitation après le processus d'assemblage ou de maintenance. Notamment, ce dernier facteur est important pour des structures à caractère souple conçues pour des transferts de fluides à haute pression, d'informations par des fibres optiques, etc. Par ailleurs, il est difficile de contrôler en pratique la courbure de la pièce déformée lors de sa manipulation réelle. La simulation virtuelle réaliste, quant à elle, permet d'effectuer un tel type de contrôle.

Dans le cas de la simulation d'opérations d'A/D ou de maintenance virtuelles de pièces souples modélisées par une poutre flexible, l'évaluation réaliste et en temps réel des valeurs critiques de la courbure de la pièce déformée est réalisée pour chaque forme intermédiaire déformée. En effet,

le MMI fournit l'orientation de la section attachée à chaque point courant situé sur la ligne moyenne de la poutre. Cette information donne ainsi accès à l'évaluation de la courbure maximale/minimale.

La Figure 6.4 présente un exemple d'une telle évaluation dans le but de contrôler la courbure de la pièce flexible durant la planification de la trajectoire d'A/D présentée sur la Figure 6.1. Pour cet exemple, une valeur adimensionnelle de courbure admissible a été fixée à ± 10 , et aucune zone critique n'a pas été identifiée au cours de la manipulation de la pièce. Ceci signifie que la manipulation donnée peut être validée du point de vue des déformations acceptables. Par contre, lorsque les zones critiques caractérisant la déformation excessive de la structure souple lors de sa manipulation existent, l'opérateur a la possibilité de corriger à tout moment la trajectoire d'A/D afin d'éviter un problème de courbure limite.

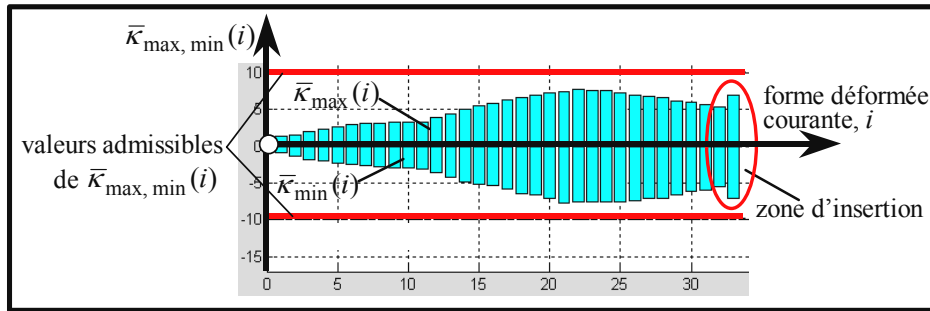


Figure 6.4. Contrôle rapide de la courbure maximale/minimale de la poutre flexible déformée durant la planification de la trajectoire d'assemblage présentée sur la Figure 6.1.

6.2.3.4. Evaluation des efforts internes dans la pièce déformée

Durant la phase de conception détaillée du système mécanique, le concepteur choisit le matériau, définit la géométrie des composants faisant partie de ce système, y compris les composants flexibles, détermine le mode de montage, etc. Ainsi, il y a des variables de conception, comme les caractéristiques du matériau ou la géométrie des pièces déformables, qui vont influencer directement le comportement mécanique de ces pièces non seulement lors de leur exploitation, mais parfois même lors du processus de fabrication ou d'assemblage. Ainsi, il pourrait être également important de pouvoir contrôler l'état intérieur dans la pièce flexible soumise à des grands déplacements lors de sa manipulation (A/D, maintenance,...).

L'étude de l'état d'équilibre de chaque élément d'une pièce souple de type poutre flexible lors de la formulation du MMI permet d'évaluer des efforts internes réalistes dans cette pièce lorsqu'elle est déformée (un exemple d'une telle évaluation est présenté sur la Figure 5.5, Section 5.3.3). Par conséquent, ces données donnent accès à l'estimation cohérente de l'état de contrainte dans la pièce déformée tout au long de sa manipulation. Cette estimation nécessite également des variables propres à la pièce. Par exemple, dans le cas de la simulation d'une pièce représentée par une poutre flexible, d'autres données d'entrée pour l'évaluation de l'état de contrainte sont la géométrie (longueur de la poutre, dimensions de la section) ainsi que les caractéristiques du matériau (module d'Young constant, équivalent, variable, coefficient de Poisson). Ces paramètres sont spécifiés avant toute simulation du comportement de pièces flexibles basée sur le MMI.

Ainsi, durant la simulation virtuelle, l'opérateur manipule la pièce flexible et contrôle l'état de contrainte dans la pièce au cours de sa déformation. En effet, ce contrôle se résume à la comparaison de la contrainte maximale σ_{max} , caractérisant la configuration la plus critique dans la pièce déformée, avec une valeur de contrainte admissible σ_{adm} , par exemple, la limite élastique spécifiée avant la simulation virtuelle. Une telle évaluation est faite pour chaque forme déformée de la pièce et les résultats sont visualisés en temps réel par le système de simulation de RV.

La Figure 6.5 illustre un exemple d'évaluation rapide d'un état de contrainte dans la pièce flexible toujours pour l'exemple de planification de trajectoire d'A/D présentée à la Figure 6.1. Pour la présente simulation, une contrainte admissible adimensionnelle $\bar{\sigma}_{adm}$ a été fixée à 30, et les

contraintes équivalentes $\bar{\sigma}_{eq,j}$ ont été calculées selon une théorie énergétique en 20 points uniformément répartis sur la ligne moyenne de la poutre flexible avec $\bar{\sigma}_{max} = \max\{\bar{\sigma}_{eq,j}\}, j = \{1, 2, \dots, 20\}$. Ce présent test montre que certaines formes déformées ne satisfont pas à la condition de résistance lors de la manipulation de la pièce et donc, représentent un risque si la trajectoire d'assemblage associée est retenue par l'opérateur.

En conclusion, une telle évaluation réaliste de l'état de contrainte, comme dans le cas des évaluations d'autres paramètres caractérisant l'opération d'A/D, aide à contrôler/optimiser une manipulation virtuelle donnée et, par conséquent, à éviter des configurations dangereuses du point de vue mécanique. Ceci permet par ailleurs de considérer l'état de contrainte dans la pièce déformée mise en place dans un système mécanique donné, de prendre en compte les contraintes résiduelles parasites s'accumulant dans la pièce flexible tout au long de l'opération d'A/D et donc, d'éviter des situations critiques lors de l'exploitation effective du système mécanique, provoquées par ces contraintes parasites.

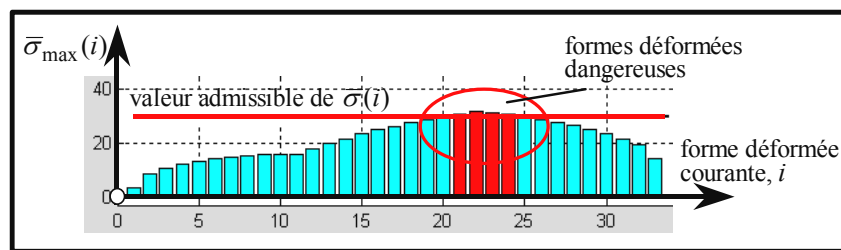


Figure 6.5. Contrôle rapide d'un état de contrainte dans la pièce flexible déformée durant la planification de la trajectoire d'assemblage présentée sur la Figure 6.1.

6.3. Démarche expérimentale

6.3.1. Objectifs de l'étude expérimentale

Les critères d'évaluation des opérations d'A/D virtuelles de pièces flexibles présentés précédemment permettent d'étudier/optimiser ces opérations de manière quantitative/qualitative. Pour cela, l'évaluation réaliste des paramètres caractérisant les opérations d'A/D est nécessaire. Dans les sections qui suivent, nous utiliserons certains paramètres, notamment, les déplacements caractérisant les déformées d'une pièce flexible donnée ainsi que les efforts fournis par le MMI de poutres flexibles, dans une étude d'opération d'assemblage virtuelle précise. Une telle étude permettra de montrer comment ces paramètres peuvent être efficacement utilisés afin de pouvoir évaluer une opération d'assemblage virtuelle donnée et même identifier certains éléments caractéristiques communs aux opérations similaires.

Une opération d'assemblage consiste en la manipulation d'une pièce souple modélisée par une poutre flexible dans l'espace des configurations. En effet, ce type de manipulation représente un intérêt particulier car les interfaces motrices couramment utilisées dans le domaine de RV ne fournissent qu'une information de nature géométrique associée aux mouvements d'un objet virtuel. Ainsi, dans le cas de la simulation des opérations d'A/D virtuelles de pièces flexibles, les CLs géométriques sont souvent requises et définies dans l'espace des configurations. Par conséquent, une interface spécifique optique de RV ne fournissant que les positions d'un objet déplacé sera utilisée dans nos tests. Une telle interface a des avantages particuliers : elle offre à l'utilisateur la possibilité de travailler de manière naturelle dans les mondes réel et virtuel (dans ce cas il s'agit de la RV appelée augmentée), permet d'enregistrer facilement les actions d'un être humain ainsi que les mouvements complexes des objets déplacés par l'opérateur, d'analyser ces mouvements par la suite dans le monde virtuel, etc. Ceci par ailleurs est un point important, car les mouvements d'un objet complexe comme un composant flexible peuvent être enregistrés et analysés par l'intermédiaire de cette interface. De

plus, il est également possible de tenir compte du comportement d'un être humain réalisant une manipulation complexe, ce qui est appréciable dans notre étude. Notamment, il semble intéressant d'étudier différents facteurs influençant la manipulation des objets de nature complexe pendant le processus d'A/D, par exemple, l'existence de différents modes d'A/D ou plusieurs trajectoires d'A/D possibles, des relations entre le comportement d'un être humain et les paramètres caractérisant l'opération d'A/D, etc. Ainsi, le processus de déformation complexe d'une pièce réelle flexible lors de sa manipulation pour l'assemblage sera réalisé, enregistré et étudié expérimentalement (physiquement) mais aussi virtuellement en modélisant dans les deux cas une manipulation de la pièce flexible soumise à des grands déplacements dans l'espace des configurations.

Un des buts de cette étude expérimentale est également de pouvoir fournir de façon adéquate et rapide une réponse mécanique dans l'espace des efforts, i.e. efforts requis, et dans l'espace des configurations, i.e. déformées de la pièce flexible soumise à des CLs géométriques. Ces dernières sont celles appliquées pendant les tests physiques et représentent la trajectoire d'assemblage, générée naturellement par l'opérateur et enregistrée par l'interface optique. Les réponses du système mécanique seront fournies par le MMI et serviront comme base (paramètres caractérisant les opérations d'A/D de pièces flexibles) pour l'évaluation de l'opération d'assemblage donnée.

Pour résumer, les principaux objectifs de l'étude expérimentale sont de :

- montrer comment certains paramètres d'évaluation des opérations d'A/D permettent de caractériser une opération d'A/D concrète,
- évaluer une opération d'assemblage donnée en se mettant dans des conditions plus cohérentes par rapport à la tendance actuelle d'utiliser des interfaces motrices de RV fournissant l'information géométrique en entrée, ce qui est équivalent à la simulation dans l'espace des configurations,
- utiliser une interface motrice de RV de type système optique d'analyse de mouvement qui ne gêne pas les actions de l'opérateur en lui permettant de réaliser les mouvements le plus naturellement possible, de contrôler ses actions de façon efficace, de travailler parallèlement dans les mondes réel et virtuel, d'enregistrer des mouvements complexes, etc.,
- modéliser la même l'opération d'assemblage physiquement (expérimentalement) et virtuellement à partir de conditions équivalentes, i.e. la manipulation de la même pièce flexible, la représentation de son environnement extérieur, des CLs géométriques similaires (sous certaines hypothèses simplificatrices qui seront discutées par la suite). Par ailleurs, les données expérimentales de l'opération d'assemblage à étudier faciliteront l'analyse comparative et permettront d'effectuer un retour vers des données de référence si nécessaire,
- valider certains aspects déjà évoqués tout au long du présent mémoire en ce qui concerne la méthodologie de simulation réaliste des opérations d'A/D de pièces flexibles dans un environnement de RV.

6.3.2. Modélisation de l'opération d'assemblage à étudier

Pour l'étude et la caractérisation des opérations d'A/D, une opération d'assemblage assez typique de la pratique industrielle avait été choisie. Le scénario d'une telle opération correspond à des manipulations d'A/D courantes : une pièce flexible est fixée à une de ces extrémités dans un premier temps et l'opérateur souhaite assembler sa deuxième extrémité libre en l'insérant dans un trou prévu dans un système mécanique associé. Afin de pouvoir réaliser cette opération, l'opérateur doit :

- choisir une stratégie à appliquer : estimation de l'espace de travail de la pièce et de sa position par rapport au système mécanique, évitement des obstacles éventuels, choix de sa propre position par rapport au système, etc.,
- générer une action spécifique à appliquer à la pièce flexible à assembler à partir d'un certain travail musculaire, i.e. développer et appliquer un certain effort à la pièce en question afin de pouvoir réaliser l'opération d'assemblage donnée. En conséquence, des grands déplacements sont générés par la pièce flexible qui subit par ailleurs de grandes transformations de sa forme géométrique lorsque la trajectoire d'assemblage associée est produite,

- contrôler ses actions lors de la manipulation d'assemblage : génération de trajectoire libre de collisions, de moindre longueur, requérant des efforts minima, etc.

Ainsi, la réalisation d'une telle opération d'assemblage peut mener à une modélisation dont les principaux éléments sont :

- la conception d'un banc d'essai représentant une partie d'un système mécanique, i.e. un objet à étudier qui est une pièce flexible, un « bâti » permettant de qualifier tous les déplacements de la pièce dans un repère global à introduire, une « cible » représentant un trou dans lequel l'extrémité libre de la pièce flexible sera insérée. De plus, ce banc d'essai est complémentaiement soumis à une contrainte d'installation rapide,
- la réalisation des liaisons mécaniques entre la pièce flexible et son environnement représenté par le bâti correspondant : encastrement d'une extrémité de la pièce, liaison reliée à l'extrémité libre de la pièce et permettant de représenter le processus d'insertion de cette extrémité dans le trou (linéaire annulaire),
- l'ajout d'un obstacle dans l'espace libre de la pièce à assembler. Cependant, l'espace de travail ne doit pas être très encombré à cause d'une contrainte due à la difficulté d'enregistrement de données géométriques produites lors de la manipulation.

Une contrainte supplémentaire est le fait que l'opération d'assemblage à étudier doit être reproduite par la suite virtuellement. En effet, une telle modélisation numérique sera basée sur l'utilisation d'un modèle mécanique de poutres flexibles qui nécessite la description des CLs pour que la simulation du comportement mécanique de la pièce soit adéquate. Ainsi, il est nécessaire de fournir des CLs similaires pour les deux manipulations (physique et numérique) et notamment, la simulation correcte de la zone d'encastrement de la pièce flexible.

La Figure 6.6 représente quelques éléments de l'équipement expérimental utilisé pour la modélisation de l'opération d'assemblage exposée ci-dessus. Premièrement, une pièce souple – tube plastique flexible – a été sélectionnée pour nos expériences. Une des extrémités de ce tube est fixée auparavant à un banc d'essai (bâti) facilement transportable et démontable. La possibilité de pouvoir tourner ce banc lors du stade préparatoire d'installation est un facteur important permettant de facilement adapter la position du banc et ainsi celle de la pièce flexible à manipuler en fonction du dispositif optique de RV utilisé.

La fixation du tube flexible modélise, d'une part, l'encastrement mécanique de cette pièce et, d'autre part, permet de s'approcher de conditions réelles représentant un processus d'A/D plus réaliste. En effet, ces conditions doivent représenter un montage rapide, simple et permettant de bloquer les mouvements de l'extrémité du tube, un montage qui simulerait la première phase du processus d'assemblage considéré, à savoir la fixation de l'extrémité du tube de manière la plus naturelle et réaliste possible par rapport à l'assemblage industriel. Dans la présente étude, la fixation de la pièce a été réalisée par l'insertion dans un manchon rigide mais suffisamment déformable, en PVC, puis dans une pièce cylindrique métallique, fixé dans cette dernière par deux vis. Le manchon permet de réaliser la fixation du tube flexible à manipuler par le blocage de la partie extérieure du tube à partir d'une déformation suffisante du manchon provoquée par les vis (Figure 6.6). Par ailleurs, un tel blocage surfacique permet d'éviter le phénomène d'écrasement de la section qui sera reliée avec un repère global de la pièce flexible.

Deuxièmement, une cible à atteindre lors de l'assemblage – trou percé dans une plaque rigide – a été défini. Afin de pouvoir modéliser correctement le processus d'insertion de l'extrémité libre du tube à assembler dans ce trou, une pièce cylindrique métallique a été attachée à cette extrémité. La plaque installée sur le bâti représente un obstacle rigide à éviter lors de la manipulation d'assemblage.

Lors de l'assemblage proprement dit, l'opérateur applique une flexion au tube en le déformant de manière importante, produit la trajectoire d'assemblage de l'extrémité manipulée du tube sans collisions et tâche d'atteindre la cible fixée en contrôlant ses actions grâce à sa vision globale des événements. Le système optique d'analyse de mouvement Optotrak utilisé permet d'enregistrer toutes les formes déformées intermédiaires de la pièce flexible ainsi que la trajectoire d'assemblage générée tout au long de la manipulation complexe de la pièce. Ce système de mesure, basé sur l'utilisation de diodes à émission infrarouge et présenté plus en détail dans la section suivante, permet à l'utilisateur de travailler parallèlement dans deux mondes :

- réel : manipulation physique de la pièce réelle,
- virtuel : visualisation temps réel du processus de déformation complexe de la pièce flexible à partir des positions localisées des points clés situés sur la pièce manipulée.

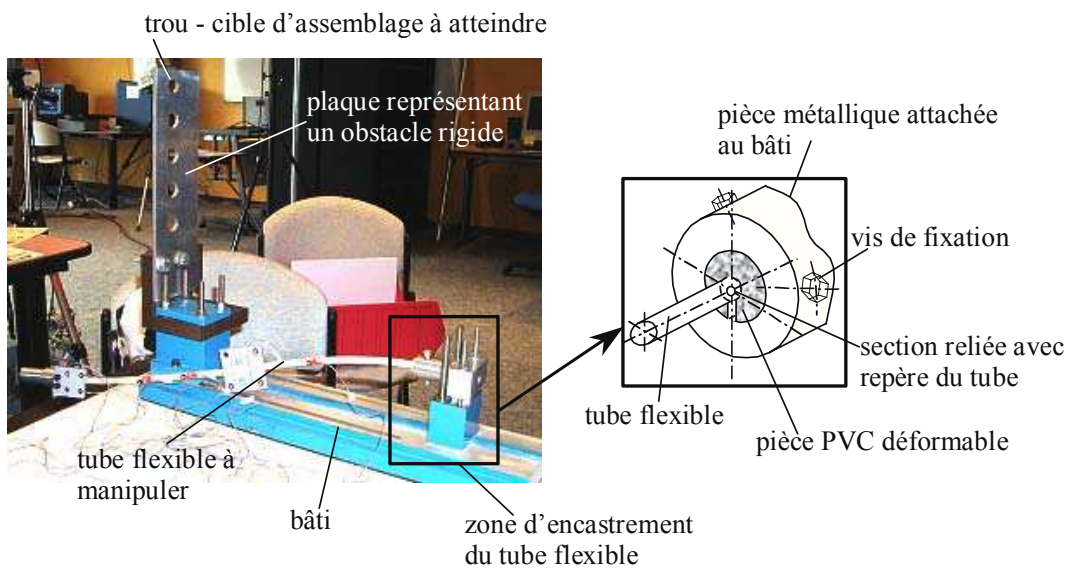


Figure 6.6. Banc d'essai comportant une pièce flexible à assembler.

La Figure 6.7 illustre quelques séquences enregistrées durant une manipulation d'assemblage de la pièce flexible. La position 1 correspond à la configuration initiale pour l'opération d'assemblage : l'opérateur maintient le tube flexible, ayant une forme initiale pratiquement rectiligne, par son extrémité associée à la pièce métallique à introduire dans le trou à atteindre. La configuration 2 représente une des formes déformées intermédiaires du tube flexible correspondant à un moment particulièrement intéressant lorsque l'opérateur tâche d'éviter la collision avec un obstacle rigide : la collision entre la pièce flexible manipulée et la plaque ainsi qu'entre la main et cette plaque à contourner. Enfin, la configuration 3 illustre la fin de l'opération d'assemblage, i.e. l'extrémité manipulée du tube est insérée dans le trou spécifié, et le tube prend sa forme déformée finale.

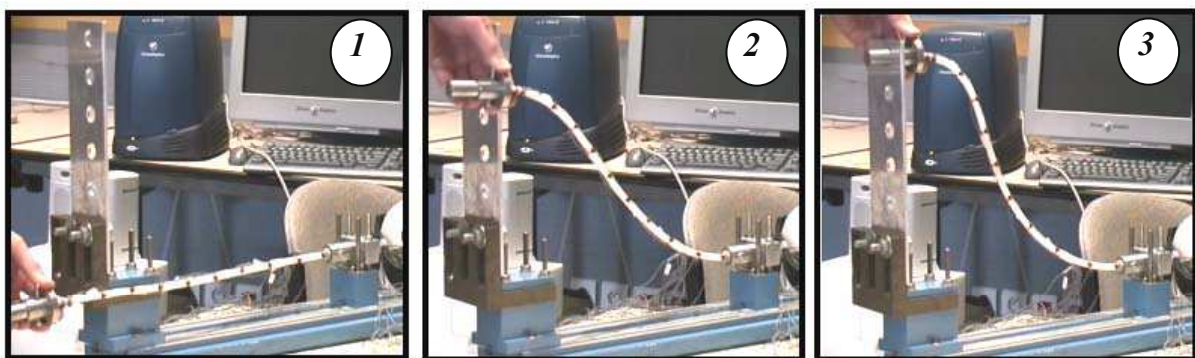


Figure 6.7. Quelques séquences d'une opération d'assemblage.

6.3.3. Système optique d'analyse de mouvement de RV

Le système optique Optotrak d'analyse de mouvement de RV installé à l'INRIA Rhône-Alpes à Montbonnot a été utilisé afin de pouvoir enregistrer toutes les formes intermédiaires déformées de la pièce flexible au cours de sa déformation complexe ainsi que la trajectoire 3D réalisée par l'opérateur pendant le processus d'assemblage présenté. Chaque déformée 3D du tube ou plutôt la ligne moyenne

déformée associée au tube est représentée en effet comme un ensemble de positions des points clés répartis sur la pièce flexible. La position 3D de chaque point est caractérisée par la position d'une diode ou IRED (Infrared-Emitting Diode) collée au tube (Figure 6.8). Ce sont les positions des IREDs qui sont localisées, visualisées et enregistrées en temps réel durant la déformation de tube flexible immergé dans un espace pré-calibré défini pour le système Optotrak.

La détection des mouvements 3D de la pièce flexible ou la localisation des positions des IRED est réalisée à l'aide d'un système de caméras fixes et définissant un certain volume de travail pré-calibré (Figure 6.9b). L'information concernant les positions 3D des IREDs détectées est transmise à un système d'acquisition et de traitement de données afin de pouvoir être enregistrée et visualisée en temps réel (Figure 6.9a). Les caractéristiques détaillées ainsi que d'autres exemples d'application du système Optotrak, notamment pour l'analyse de mouvements d'un être humain, sont exposées dans [Van Beuzekom & al. 2001], [Swindells & al. 2002], [Innsport 2003]. Par ailleurs, le fait que les mouvements puissent être localisés et analysés par ce système est un point fort pour l'étude et la caractérisation des opérations d'A/D de pièce flexibles. En effet, l'information associée aux mouvements d'une main de l'opérateur manipulant une pièce déformable permettrait d'analyser la nature de ces mouvements de façon qualitative : étude de l'orientation de la main et identification des directions d'application des forces, analyse de variation de l'orientation réelle des efforts-suiveurs appliqués à la pièce flexible lors de sa déformation, influence de la position de l'opérateur sur la recherche de la trajectoire d'A/D et la génération des efforts, etc. Dans ce type d'analyse, les diodes sont attachées directement aux endroits significatifs du corps de l'opérateur.

Donnons les principales caractéristiques du système Optotrak :

- la fréquence maximale concernant la bande passante pour l'information à enregistrer est d'environ 1000 Hz. La fréquence réelle est une fonction du nombre d'IREDs utilisés dans l'expérience (à diviser par le nombre de diodes),
- l'espace pré-calibré « visible » par les caméras est 2,6 m × 3,5 m à une distance de 6 m des caméras,
- la précision de la position localisée est de l'ordre de 0,2 mm à 6 m des caméras,
- la résolution est de 0,01 mm à 2,5 m des caméras.

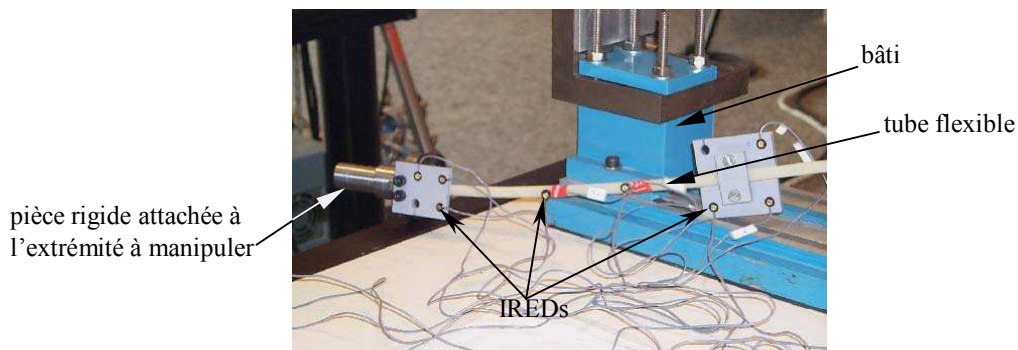


Figure 6.8. IREDs attachées au tube flexible et permettant de capturer la géométrie déformée de la pièce.

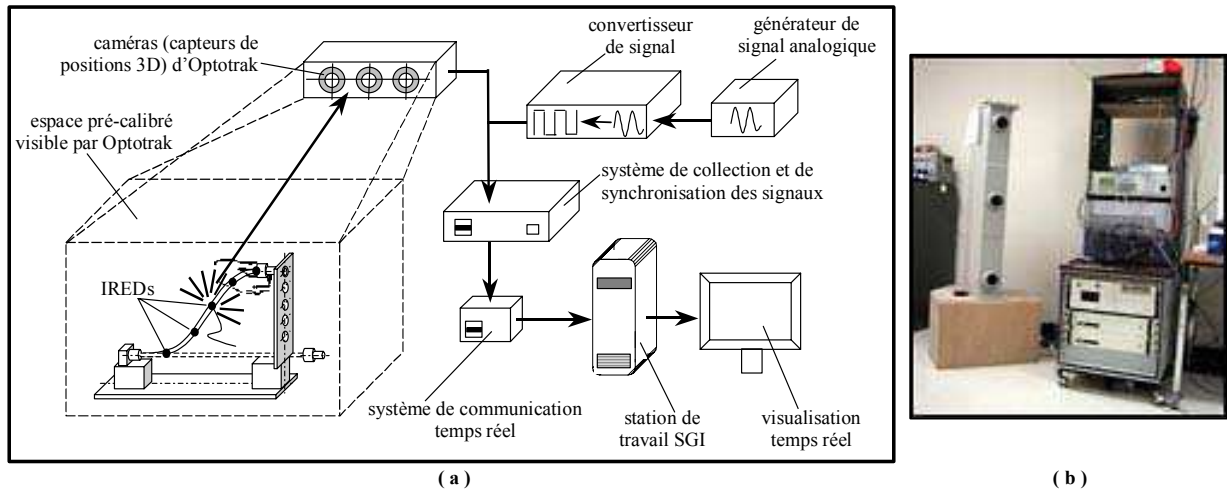


Figure 6.9. Principaux éléments du système optique Optotrak de RV :
(a) principe du fonctionnement du système Optotrak, (b) système des caméras Optotrak.

6.3.4. Procédure expérimentale et traitement des résultats

Lors de la simulation d'une opération d'assemblage, l'opérateur placé dans un endroit choisi manipule l'extrémité libre du tube flexible en appliquant à ce dernier une grande flexion. Les déplacements de l'extrémité manipulée, reliés avec les efforts extérieurs appliqués à la pièce par l'opérateur, caractérisent les CLs mécaniques non-linéaires vu le caractère flexible de la pièce. Les diodes n'ont été placées que sur le tube à cause d'un nombre restreint d'IREDs dont dispose le système d'analyse de mouvement, et le mouvement de la main de l'opérateur n'a été analysé que visuellement. Cependant, des observations faites lors des manipulations diverses ont permis de constater que la direction de la main change effectivement tout au long de la manipulation et donc, les efforts appliqués par l'opérateur ont une nature d'efforts-suiveurs, i.e. les CLs sont non-linéaires.

Lors de la manipulation de la pièce flexible dans l'espace pré-calibré représentant le monde physique, toutes les formes déformées ainsi que la trajectoire d'assemblage de la pièce générée sont réalistes car la pièce est manipulée dans le monde réel. Cette information est transmise en temps réel grâce au système d'acquisition de données de l'Optotrak, traitée, enregistrée sur une station de travail Silicon Graphics et visualisée également en temps réel dans le monde virtuel. La Figure 6.10 illustre un exemple de capture et de visualisation temps réel d'une des formes déformées du tube flexible. Les positions 3D des IREDs se trouvant dans l'espace pré-calibré et visibles par les caméras du système Optotrak sont mesurées et définies dans le repère global du système $\{O, X, Y, Z\}$. Dans nos expériences 12 IREDs uniformément réparties sur le tube flexible ont été utilisées. Les positions des diodes permettent de reconstruire une forme tridimensionnelle de la pièce flexible déformée à partir de la ligne moyenne interpolée ainsi que de déterminer les CLs géométriques associées à l'opération d'assemblage effectuée. Ces CLs à imposer pour la simulation numérique ultérieure sont la trajectoire d'assemblage ainsi que l'ensemble des angles définissant l'orientation de l'extrémité manipulée de la pièce flexible.

Toutefois, il convient de noter que toutes les positions des diodes sont définies dans le repère global du système optique $\{O, X, Y, Z\}$ qui est le repère de référence. Donc, avant l'étude et la caractérisation de l'opération d'assemblage qui sera reproduite virtuellement, il est nécessaire de représenter les données géométriques enregistrées dans le repère de la pièce flexible $\{O, x, y, z\}$ lié par exemple à l'extrémité encastree. Ainsi, le traitement de données enregistrées durant la manipulation de la pièce flexible consiste, dans un premier temps, en une composition des matrices comportant uniquement les coordonnées des positions des diodes, et ensuite en une transformation de ces matrices en utilisant des opérations de :

- translation pour ramener les coordonnées enregistrées dans le repère de la pièce flexible $\{O, x, y, z\}$,

- rotation afin de tenir compte de l'angle entre l'axe horizontal des caméras Optotrak et l'axe de symétrie du banc d'essai sur lequel la pièce flexible a été installée.

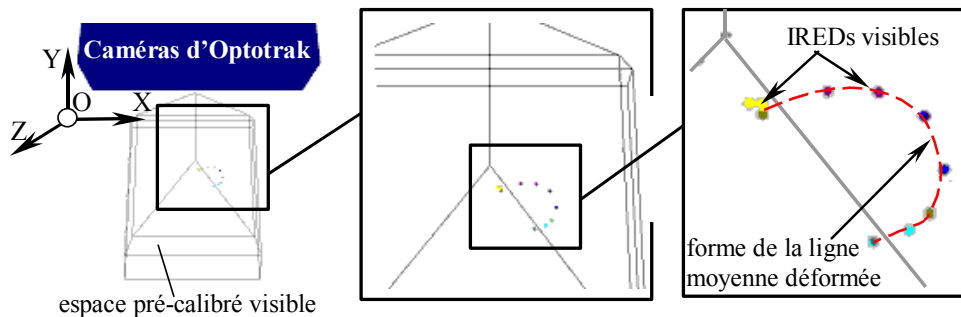


Figure 6.10. Visualisation des positions des IREDS visibles définissant la forme déformée de la ligne moyenne du tube flexible en temps réel.

En effet, le banc d'essai utilisé a été tourné d'un certain angle par rapport aux caméras du système optique car la condition de visibilité des diodes devait être respectée. La visibilité des IREDS se résume à la capacité du système de caméras à capturer les signaux produits par les IREDS en présence des « occultations » dues par exemple à l'opérateur. Par conséquent, les données enregistrées ne représentent que les positions 3D des diodes visibles. Cependant, l'absence de positions des IREDS invisibles n'est pas un handicap pour le traitement numérique ultérieur, car les données manquantes (1...3 positions) peuvent être toujours approximées, par exemple, interpolées par une fonction polynomiale. Néanmoins, il est nécessaire d'assurer la visibilité des IREDS les plus importantes tout au long de l'opération d'assemblage, à savoir les IREDS attachées aux extrémités ainsi que dans les zones poches des extrémités. En effet, la transformation des matrices de coordonnées ne peut être effectuée qu'à partir des coordonnées définissant la position des diodes extrêmes. De plus, la diode attachée à l'extrémité manipulée définit les CLs géométriques (trajectoire d'assemblage prescrite par l'opérateur).

Ainsi, les coordonnées transformées et exploitables du point de vue de la simulation numérique du comportement du tube flexible durant sa manipulation virtuelle d'assemblage donnent accès aux CLs en position (trajectoire à imposer) $\mathbf{X}(L)$, avec L – longueur du tube. Malheureusement, le système optique de RV utilisé ne fournit pas directement les orientations qui sont des paramètres importants pour la modélisation réaliste du comportement d'une pièce flexible virtuelle. Cependant, il est possible de déduire ces angles par exemple à partir de la géométrie de la ligne moyenne déformée de la poutre flexible, ce qui a été fait durant la phase de traitement des résultats expérimentaux. Les angles nous intéressants, i.e. ceux représentant l'orientation de la section extrême manipulée, peuvent être approximés à partir des formes déformées 3D de la ligne moyenne calculée par l'interpolation polynomiale des positions des IREDS enregistrées. Une autre méthode utilisée pour l'approximation des angles ainsi que pour la détermination d'une courbure initiale du tube flexible est basée sur la minimisation d'un écart entre la forme déformée mesurée expérimentalement et celle calculée numériquement à partir du MMI. Ainsi, les angles nécessaires pour la définition complète des CLs géométriques dans le cas de la simulation d'une poutre flexible dans l'espace des configurations ont été évalués et exprimés sous une forme spécifique correspondant à la représentation angulaire par les angles d'Euler θ_i , $i = \{1,2,3\}$ utilisés par le MMI. Les angles $\theta_i(L)$ forment ainsi un vecteur $\Theta(L)$ des CLs géométriques requises associées à la trajectoire d'assemblage générée durant la manipulation réelle. Une nouvelle simulation de cette opération d'assemblage, la simulation correspondant à la manipulation virtuelle à partir de CLs géométriques réelles et basée sur l'utilisation du MMI, sera présentée dans la section suivante de ce chapitre.

6.4. Caractérisation des opérations d'assemblage

6.4.1. Modélisation de l'opération d'assemblage virtuel

Dans cette section certains aspects de la méthodologie proposée pour la simulation réaliste des opérations d'A/D de pièces déformables seront abordés lors de l'étude et l'analyse de l'opération d'assemblage du tube flexible considéré précédemment. Cette fois-ci cette opération sera reproduite numériquement en se basant sur les données géométriques enregistrées lors de la manipulation réelle de la pièce flexible. Cette simulation virtuelle vise à illustrer l'application de la méthodologie proposée, montrer comment il est possible d'évaluer des paramètres caractérisant une opération d'assemblage concrète, mettre en évidence des caractéristiques particulières de l'opération considérée lors de l'évaluation de cette dernière en utilisant certains critères d'évaluation des opérations d'A/D de pièces flexibles.

Toutefois, il convient de rappeler que toute simulation virtuelle des opérations d'A/D, même si elle est basée sur le modèle mécanique afin de produire des données réalistes en ce qui concerne le comportement de pièces flexibles, est d'abord une modélisation. Alors, malgré le fait qu'une telle simulation soit effectuée à partir des données réelles, à savoir la trajectoire d'assemblage physiquement générée dans les conditions réelles sera imposée lors de la simulation virtuelle, il existe toujours un certain nombre de facteurs qui différencient un phénomène ou une action réels d'une reproduction d'un tel phénomène ou action, quel que soit la qualité de cette reproduction par rapport la réalité. Ainsi, il semble important de mentionner les principaux éléments intervenant dans la simulation numérique de cette même opération d'assemblage et dont il faut par conséquent tenir compte lors de l'interprétation et de l'exploitation éventuelle des résultats d'une telle simulation.

Parmi ces éléments, on peut par exemple citer dans notre cas :

- l'approximation des CLs géométriques concernant la loi de variation des angles $\Theta_{s=L}(i)$ définissant l'orientation de la section manipulée en chaque point courant i de la trajectoire d'assemblage générée par l'opérateur,
- la modélisation de la zone de fixation de la pièce réelle flexible (tube souple) sur le banc d'essai. En effet, une telle fixation sera modélisée par l'encastrement mécanique parfait lors de la simulation numérique, ce qui n'est pas toujours le cas en réalité. Notamment, une fixation imparfaite peut provoquer des valeurs d'angles Θ en $s = 0$ différentes de zéro qui caractérisent l'encastrement parfait,
- l'approximation des caractéristiques du matériau dont les propriétés physiques sont inconnues. Notamment, le module d'Young E constant équivalent du tube flexible plastique manipulé sera évalué et utilisé par la suite lors de la simulation virtuelle basée sur le MMI. Cependant, on sait que la valeur du module d'Young peut être différent de cette constante, même en étant dans la zone de petites déformations du matériau, car la loi de comportement d'un tel matériau est souvent non-linéaire physiquement,
- etc.

En outre, des hypothèses simplificatrices ont été faites telles que :

- les efforts à produire par le MMI lors de la simulation numérique rapide sont les efforts-suiveurs,
- la courbure initiale de la pièce flexible sera négligée car la forme initiale du tube manipulé est proche d'une forme rectiligne.

Il faut également remarquer que plusieurs manipulations d'assemblage ont été effectuées et traitées à l'aide du système optique Optotrak. Nous présenteront les résultats d'évaluation des efforts à développer pour deux manipulations similaires ayant deux trajectoires d'assemblage légèrement différentes. On étudiera l'influence d'une telle différence sur l'estimation des efforts-suiveurs dans l'espace des efforts. Dans tous les cas, les simulations reproduites correspondront à des manipulations dans l'espace des configurations lorsque les CLs géométriques sont imposées par l'opérateur. Néanmoins, il ne faut pas oublier qu'afin de reproduire l'opération d'assemblage le plus fidèlement possible par rapport à celle effectuée réellement, la trajectoire d'assemblage générée de façon naturelle

sera imposée. Donc, il n'y aura pas de manipulation directe de la pièce virtuelle flexible pendant la simulation numérique de la même opération d'assemblage.

6.4.2. Utilisation de la méthodologie de simulation d'A/D de pièces flexibles dans l'étude de l'opération d'assemblage virtuel

Afin de pouvoir réaliser la simulation d'une opération d'A/D de pièces flexibles de façon réaliste, i.e. tenir compte du comportement mécanique complexe d'une telle pièce lors de sa manipulation, nous avons vu dans les chapitres précédents que diverses données d'entrée sont nécessaires. Rappelons que ces données sont subdivisées en données « comportementales », propres à la pièce déformable à simuler (sa géométrie, son matériau, les CLs,...) et données extérieures caractérisant l'environnement extérieur dans lequel la pièce en question évoluera. Nous présenterons dans cette section quelques éléments clés permettant de définir les données les plus importantes pour la simulation d'une opération d'A/D et notamment, les données requises pour la simulation réaliste de l'opération d'assemblage virtuelle du tube flexible à partir de données expérimentales. Cela permettra d'illustrer l'application de la méthodologie de simulation d'A/D de pièces déformables dans l'étude de l'opération d'assemblage virtuel concrète de la pièce modélisée par une poutre flexible ainsi que de valider certains aspects d'une telle méthodologie.

6.4.2.1. Détermination de caractéristiques mécaniques du matériau

Dans cette partie, les résultats des tests expérimentaux réalisés pour la détermination d'une des caractéristiques du matériau du tube flexible à modéliser numériquement seront présentés. Cet aspect correspond à une des étapes de préparation de données pour la simulation virtuelle selon la méthodologie de simulation des opérations d'A/D de pièces flexibles et représente concrètement la mise en place d'une série de tests afin de pouvoir déterminer le module d'Young du matériau – un des paramètres intrinsèques de la pièce déformable (Figure 3.1, chapitre 3).

Sous certaines hypothèses, comme le fait que le matériau de la pièce donnée soit homogène et isotrope, travaille dans le domaine de petites déformations avec une approximation linéaire de la loi de comportement, la méthode de détermination rapide du module d'Young d'un matériau soumis à des grands déplacements, proposée dans la Section 3.4.2, a été utilisée pour l'évaluation d'un module d'Young équivalent, constant de la matière plastique du tube manipulé. Rappelons que cette méthode est constituée de deux parties : une partie expérimentale, comprenant des mesures, et une partie de traitement informatique, fournissant un module d'Young à partir d'un logiciel spécialisé basé sur le MMI de poutres flexibles.

Ainsi, une série de mesures de formes déformées du tube plastique flexible a été mise en place. Elle consiste en la génération et la mesure des déformées de la pièce flexible encastrée et sollicitée en flexion par l'application d'efforts conservatifs (Figure 3.9). La phase de traitement numérique permet de trouver une valeur approximative de module d'Young constant moyen à partir du recalage des déformées réelles mesurées et celles produites numériquement par le MMI. Une telle estimation du module d'Young est équivalente à un problème de minimisation avec la recherche d'une solution satisfaisant une fonction de coût selon l'équation (3.11). En effet, plusieurs modules d'Young E_j ayant des valeurs proches ont été trouvés et une valeur moyenne $E_m \approx 300$ MPa a été calculée. C'est cette dernière qui sera utilisée dans la simulation virtuelle du comportement du tube flexible lors de sa manipulation d'assemblage. Cependant, une variation faible des modules E_j au cours de leur estimation numérique montre que la loi de comportement du matériau n'est pas tout à fait linéaire dans la zone de petites déformations et qu'il y a une tendance à certaine diminution de la valeur du module d'Young lorsqu'une charge de flexion plus importante est appliquée au tube flexible.

Donc, nous n'utiliserons qu'une seule valeur moyenne du module correspondant à une certaine idéalisation de la loi de comportement de la matière plastique de la pièce considérée. Le module constant d'Young et la loi approximativement linéaire sont les paramètres requis afin de tenir compte du comportement mécanique de la pièce flexible à assembler et forment une partie des données nécessaires pour la simulation réaliste d'opérations d'assemblage virtuel.

6.4.2.2. Modélisation d'un environnement virtuel extérieur

La modélisation d'un environnement virtuel extérieur pour une pièce à manipuler est aussi une étape importante pour toute simulation d'opération d'A/D et de maintenance virtuelle. Cet aspect devient déterminant lors d'une manipulation d'une pièce à caractère flexible. En effet, l'opérateur déplaçant cette pièce flexible virtuelle est amené à contrôler également la déformation générale de la pièce flexible, vérifier l'absence d'interférences réalistes entre la pièce déformée et son environnement extérieur, analyser le positionnement relatif de la pièce déformée par rapport aux autres composants déjà assemblés lors de la génération/optimalisation de la trajectoire d'A/D ou des séquences d'assemblage, etc. Ainsi, nous utiliserons un autre élément important de la méthodologie de simulation des opérations d'A/D virtuelles : la modélisation de l'environnement statique de la pièce flexible pour l'opération d'assemblage considérée dans ce chapitre.

Malgré le fait que la plupart des environnements de RV permettent de créer des objets virtuels directement, la nécessité de transfert d'un modèle géométrique extérieur (ou des données de CAO) reste une contrainte importante à prendre en considération vis-à-vis des réalités industrielles actuelles. Par conséquent, la méthode de création d'un modèle géométrique extérieur à l'environnement de RV est une piste privilégiée dans notre simulation, car elle permettrait de modéliser le problème d'assemblage virtuel dans le contexte industriel. Pour cela, le modèleur géométrique industriel IDEAS a été utilisé afin de créer un environnement virtuel extérieur pour la pièce flexible. Dans ce cas, l'environnement extérieur représente le banc d'essai employé pendant les études expérimentales (Figure 6.6).

Le banc d'essai contient :

- des éléments de fixation de la pièce flexible à manipuler : la fixation (encastrement) d'une extrémité de la pièce ainsi qu'une cible d'assemblage à atteindre – un trou dans lequel la pièce métallique attachée à l'extrémité libre du tube flexible sera insérée,
- un obstacle à contourner représenté par une plaque rigide attachée au banc d'essai.

Donc, ce banc d'essais pourrait représenter un système mécanique d'un produit donné comprenant une pièce flexible à assembler. Cependant, un tel système ne représente qu'une modélisation simplifiée d'un produit mécanique qui est souvent beaucoup plus complexe. Par conséquent, l'hypothèse que le processus d'assemblage à étudier correspond à une phase particulière d'assemblage selon une séquence donnée du processus d'assemblage est faite.

La Figure 6.11 représente un modèle CAO du banc d'essai. Le modèle est de type B-Rep représenté par un ensemble de surfaces fermées (volume), bien connectées et sans aucune intersection afin d'éviter la génération des erreurs éventuelles lors de la phase de passage du modèle géométrique de référence à un environnement virtuel statique. Ce passage est effectué à l'aide d'un convertisseur intégré dans IDEAS et permettant de créer un environnement statique sous la forme d'un ensemble de triangles en format VRML à partir d'un modèle géométrique volumique 3D donné. Il est nécessaire alors de reconnecter les faces du polyèdre obtenu afin de tenir compte de la non-conformité du modèle VRML.

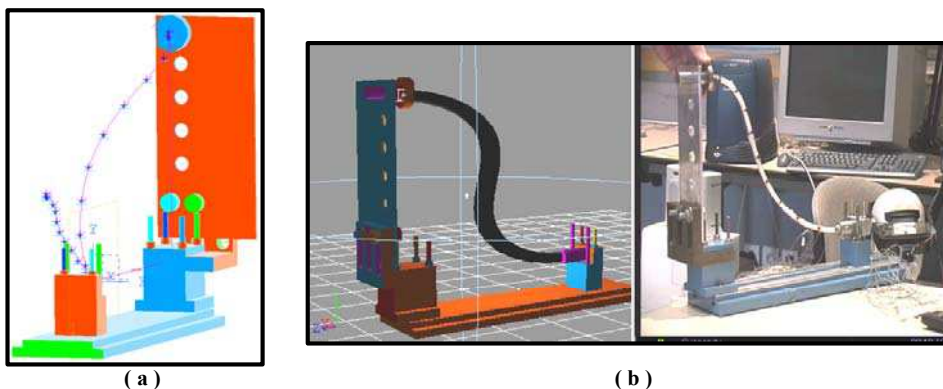


Figure 6.11. Modélisation géométrique représentant l'environnement de la pièce flexible :
 (a) modèle CAO de référence issu d'un modèleur industriel,
 (b) modèle sous le format VRML transféré dans un environnement de RV.

Ainsi, il convient de mentionner que la création d'un modèle géométrique 3D ainsi que la génération d'un modèle facettisé associé constituent une autre étape de la phase de préparation de données requises pour la simulation des opérations d'A/D virtuelles de pièces flexibles suivant la méthodologie générale proposée.

6.4.2.3. Autres données d'entrée requises pour la simulation virtuelle

Dans cette partie d'autres données d'entrée nécessaires pour la simulation réaliste du comportement de la pièce flexible au cours de sa manipulation d'assemblage donné seront brièvement énumérées. Selon la méthodologie de simulation des opérations d'A/D, d'autres informations requises sont :

- le choix d'un modèle mécanique approprié ainsi que les paramètres associés à ce modèle, notamment, les paramètres définissant la géométrie. Dans la présente étude, le MMI de poutres flexibles sera utilisé. Ainsi, les paramètres supplémentaires géométriques requis par ce modèle sont la longueur de la poutre flexible, sa géométrie initiale caractérisée par la courbure et la torsion initiales, les dimensions de la section de la pièce,
- les CLs à définir dans l'espace des efforts/configurations en fonction de la nature des données fournies par l'interface de RV utilisée. Notre étude est basée sur la trajectoire d'assemblage réaliste fournie par le système optique d'analyse de mouvement Optotrak, ainsi les CLs déterminées sont les positions 3D des points clés de la trajectoire et elles seront définies dans l'espace des configurations,
- un ensemble d'informations traitées par les métaphores d'interaction si nécessaire. La présente simulation de l'opération d'assemblage n'utilise pas directement de métaphores d'interaction, car une information manquante ou n'ayant pas la forme requise a été préparée de façon « interactive » off-line. Cependant, un tel traitement peut être réalisé par une (des) métaphore(s) d'interaction associée(s). Ce traitement consiste en :
 - l'identification automatique des données fournies par l'interface motrice de RV en fonction de la nature des données et de leur définition dans l'espace correspondant,
 - l'ajout/approximation/traduction des données manquantes ou incompréhensibles par le système de simulation de RV. Dans la présente simulation, les CLs géométriques angulaires ont été approximées, et une telle procédure peut être effectuée par une métaphore correspondante,
 - la transformation des données d'entrée sous une forme plus commode du point de vue de la simulation numérique. Dans le cas présent, une opération sera appliquée aux données d'entrée et effectuée directement par le module comportant le MMI. Une telle transformation pourrait être également réalisée par une métaphore correspondante.

En résumé, il convient de remarquer que dans cette partie de préparation de données, on retrouve également des éléments décrits par la méthodologie de simulation des opérations d'A/D virtuelles de composants déformables. Cela montre bien l'application effective de cette méthodologie à la simulation concrète d'une opération d'assemblage et valide différents aspects de la méthodologie proposée, comme la préparation des données, la caractérisation des propriétés d'un matériau inconnu, le besoin de traitement spécifique de certaines données d'entrée, etc.

6.4.3. Evaluation et caractérisation de l'opération d'assemblage

Afin de pouvoir montrer comment il est possible d'évaluer une opération concrète d'assemblage d'une pièce souple modélisée par une poutre flexible, de caractériser cette opération de manière générale à partir de paramètres d'évaluation les opérations d'A/D virtuelles, l'opération d'assemblage discutée précédemment a été simulée numériquement. Cette simulation a été effectuée en utilisant un outil logiciel, créé au cours des travaux de cette thèse, basé sur le MMI et qui sera présenté au chapitre suivant. Dans la présente section, les seuls résultats d'une telle simulation 3D seront présentés et discutés, les résultats qui permettent de déduire des paramètres d'évaluation de

l'opération d'assemblage, notamment, les efforts requis pour l'opération donnée. La caractérisation de l'opération d'assemblage sera par la suite réalisée à partir des paramètres d'évaluation fournis par le MMI.

6.4.3.1. Evaluation des déplacements 3D de la pièce flexible

Comme nous l'avons déjà vu, l'opération d'assemblage a été dans un premier temps accomplie physiquement dans l'espace des configurations : une trajectoire d'assemblage libre de collisions a été générée par l'opérateur. Ainsi, l'évaluation des formes déformées 3D de la pièce virtuelle lors de la simulation numérique de l'opération d'assemblage ne présente pas beaucoup d'intérêt dans ce cas précis parce que les CLs géométriques imposées au cours d'une telle simulation ne doivent pas provoquer la génération de déformées de la pièce virtuelle flexible en intersection avec les obstacles présents dans l'espace. Cependant, on peut vérifier si le MMI 3D de poutres flexibles produit des résultats cohérents par rapport à la réalité dans le cas de cette opération d'assemblage : formes de la pièce flexible déformée ainsi que l'absence de toute collision avec le banc d'essai.

La simulation numérique a été également effectuée dans l'espace des configurations adimensionné $(\bar{X}, \bar{\Theta})$. Au cours de cette simulation les réponses dans l'espace des efforts associé (les efforts requis) ainsi que dans l'espace des configurations (les déformées) ont été produites par le MMI 3D. Les CLs géométriques imposées ont donc été définies dans l'espace des configurations et incluaient deux vecteurs de données géométriques adimensionnées : les coordonnées $\bar{X}_{\bar{s}=1}(i)$ de chaque point courant clé i de la trajectoire d'assemblage imposée ainsi que l'ensemble des angles $\bar{\Theta}_{\bar{s}=1}(i)$ définissant l'orientation de la section de l'extrémité manipulée du tube flexible et calculés à partir d'une interpolation 3D des fonctions $\bar{X}_{int} = f(\bar{s})$, $\bar{s} = [0;1]$ caractérisant la géométrie de chaque forme déformée réelle, enregistrée par le système Optotrak. De plus, afin de simplifier la simulation numérique, le vecteur décrivant la torsion et la courbure initiales $\bar{\mathbf{K}}_0$ a été pris nul, car la forme initiale du tube flexible manipulé était quasi rectiligne lors de la manipulation physique. Ainsi, suivant cette dernière hypothèse, la forme rectiligne – première forme de la pièce flexible – a été ajoutée aux données d'entrée caractérisant les CLs géométriques.

La Figure 6.12a présente une des trajectoires d'assemblage réalisées pendant la manipulation réelle ainsi qu'un ensemble des formes déformées produites par le MMI au cours de la simulation numérique de l'opération d'assemblage du tube flexible. Aucune des déformées fournies par le MMI de poutres flexibles n'a été en intersection avec le banc d'essai virtuel. De plus, les formes déformées produites au cours de la simulation numérique ont été similaires à celles générées réellement.

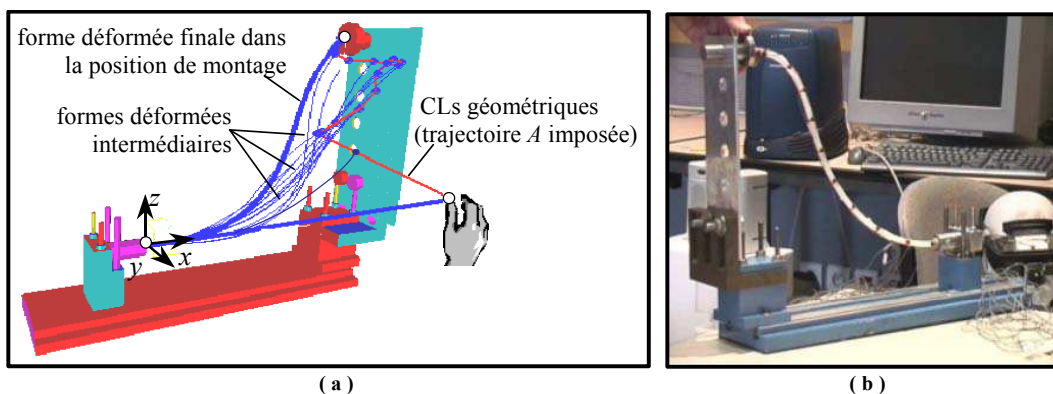


Figure 6.12. Evaluation des déplacements 3D de la pièce virtuelle flexible :
 (a) formes déformées réalistes produites par le MMI de poutres flexibles,
 (b) forme déformée finale réelle.

6.4.3.2. Evaluation des efforts-suiveurs requis

L'évaluation des efforts nécessaires à développer par un être humain afin de pouvoir réaliser une manipulation donnée est par contre très intéressante dans l'étude de cette opération d'assemblage. Cette évaluation est réalisée par le MMI 3D en même temps que le calcul des formes déformées et représente une réponse mécanique du système dans l'espace des efforts-suiveurs $(\overline{\mathbf{Q}}, \overline{\mathbf{M}})$. Une telle évaluation réaliste est par ailleurs un support intéressant pour les interfaces motrices de RV ne fournissant qu'une information géométrique lors de la manipulation virtuelle. Le modèle mécanique intégré dans le système de simulation pourrait produire les informations nécessaires relatives aux efforts à développer associés à une trajectoire imposée par l'opérateur sans faire appel à des systèmes haptiques onéreux.

Au cours de la simulation numérique d'une opération d'assemblage, des réponses réalistes sont générées, recalculées sous forme dimensionnelle, plus commode pour le concepteur, et visualisées dans deux sous-espaces : le sous-espace des forces-suiveurs (Q_1, Q_2, Q_3) et celui des moments (M_1, M_2, M_3) . Chaque effort-suiveur Q_j et $M_j, j = \{1, 2, 3\}$ évalué par le MMI représente un effort à appliquer à l'extrémité manipulée du tube flexible réel, i.e. en $s = L$, avec $L = 484$ mm.

La Figure 6.13 montre deux trajectoires d'assemblage similaires A et B , produites réellement par l'opérateur et enregistrées par le système optique Optotrak pendant la modélisation physique de l'opération d'assemblage. La Figure 6.14 présente les réponses correspondantes du système mécanique dans les sous-espaces des efforts-suiveurs pour les deux trajectoires. Ces réponses forment en effet les lois de variations des efforts $Q_{j(s=L)}(i)$ et $M_{j(s=L)}(i)$ requis en chaque point courant i de la trajectoire d'assemblage. La première analyse de ces lois montre la présence de tous les types d'efforts développés au cours de l'opération d'assemblage donné : la force axiale (force de compression dans le cas présent), les forces et les moments de flexion et même une légère variation du moment de torsion. Ceci montre bien le fait qu'il est nécessaire de considérer tous les types d'efforts lors de l'organisation d'une boucle de retour d'information (perception d'efforts) si une interface haptique à retour d'effort est utilisée dans la simulation virtuelle des opérations d'A/D ou de maintenance. Cela signifie que pour l'étude et l'analyse efficaces des opérations d'A/D virtuelles avec un retour d'information en terme d'efforts, il convient d'utiliser des dispositifs haptiques à 6 DDL.

Par ailleurs, on peut remarquer que pour les opérations considérées dans notre étude, les efforts influençant de façon importante la déformation 3D de la pièce flexible lors de sa manipulation d'assemblage sont la force de compression $Q_{1(s=L)}$, la force et les moments de flexion $Q_{2(s=L)}, M_{2(s=L)}, M_{3(s=L)}$. Cette constatation qualitative est cohérente par rapport à la manipulation réelle d'une poutre flexible : la force de compression ainsi que les efforts de flexion sont les plus importantes à appliquer pour que la pièce souple produise les déformations présentées sur les Figures 6.7, 6.12. Les valeurs des forces évaluées par le MMI varient entre -6 et 2 N, les valeurs des moments sont comprises entre $-0,2$ et $0,4$ N.m. Concernant l'évaluation de l'opération effectuée du point de vue de l'ergonomie, les valeurs de ces efforts sont acceptables. Ainsi, si cette opération d'assemblage n'était pas réalisée physiquement, il serait possible de conclure en se basant sur les efforts évalués par le MMI que l'opération donnée pourrait être accomplie par un être humain, à savoir la nature de cette opération serait manuelle avec l'application d'une seule main pour une phase de montage donnée. Le fait que l'opération donnée ait été réellement réalisée par l'opérateur confirme qualitativement les résultats de simulation numérique.

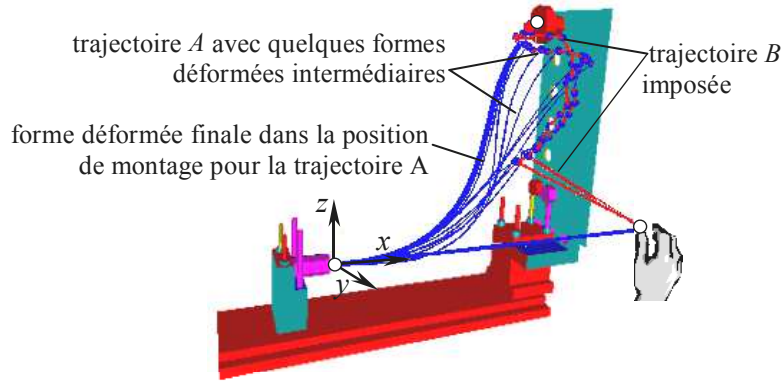


Figure 6.13. Différentes trajectoires possibles pour l'opération d'assemblage donnée.

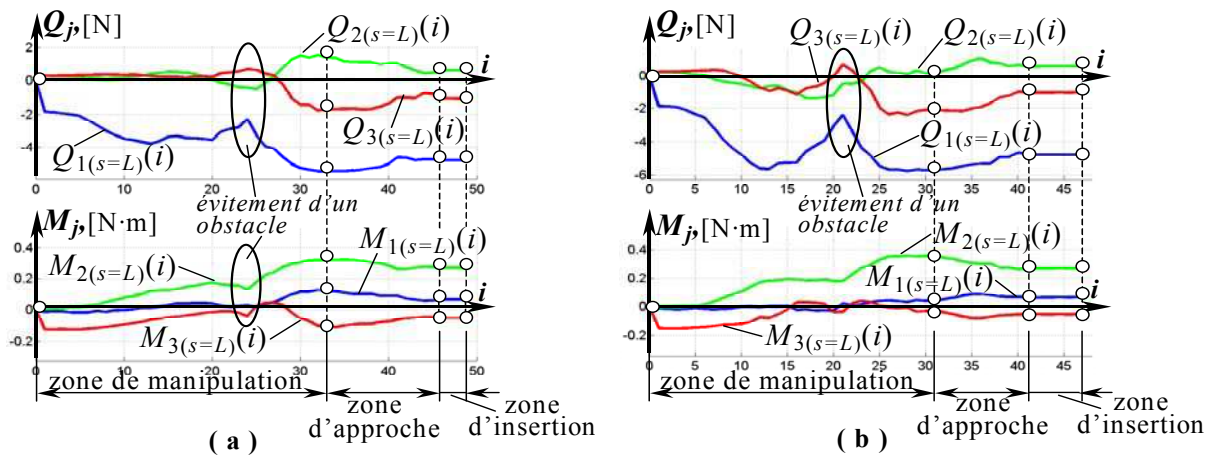


Figure 6.14. Evaluation des efforts-suiveurs réalistes pour différentes trajectoire enregistrées :
 (a) réponse dans l'espace des efforts pour la trajectoire d'assemblage A sur la Figure 6.13,
 (b) réponse dans l'espace des efforts pour la trajectoire d'assemblage B sur la Figure 6.13.

6.4.3.3. Caractérisation de l'opération d'assemblage

Dans cette partie nous allons nous intéresser à la caractérisation de l'opération d'assemblage considérée. Certains éléments d'une telle analyse pourront par ailleurs être utilisés dans l'évaluation des opérations d'assemblage ou de maintenance similaires, à savoir la manipulation d'une pièce souple modélisée par une poutre flexible partiellement montée, i.e. une des extrémités est encastée.

Tout d'abord, il est intéressant de noter le fait que le même principe de subdivision des lois de variations des efforts-suiveurs $Q_{j(s=L)}(i)$ et $M_{j(s=L)}(i)$ en différentes zones est observé (Figures 6.2, 6.14). Dans le cas présent, trois zones sont déjà distinguées :

- la zone de manipulation,
- la zone d'approche,
- la zone d'insertion (ou de montage effectif).

La zone de manipulation correspond toujours à des « balayages » de la main de l'opérateur dans l'espace de travail représentant en effet l'espace des configurations de la pièce flexible donnée. Ce stade de manipulation pour l'assemblage est caractérisé par des grands déplacements, i.e. des changements très considérables de la forme de la pièce manipulée lors de la déformation de cette dernière. Par conséquent, ce stade de manipulation entraîne la variation importante des efforts appliqués, ce qui l'on observe sur la Figure 6.14.

Dans la zone d'approche, l'opérateur s'approche de la cible d'assemblage qui est la position d'un trou dans notre cas. Donc, ce stade de manipulation d'assemblage est caractérisé par des petits

changements de positions de l'extrémité manipulée de la pièce. De ce fait, la variation des efforts à développer avant le début d'insertion de l'extrémité du tube flexible dans le trou est beaucoup moins importante que celle observée dans la zone de manipulation.

Enfin, la dernière phase – phase de montage effectif de la pièce – correspond à l'insertion d'un composant rigide attaché à l'extrémité manipulée de la pièce dans le trou. Ici, les valeurs des efforts à développer peuvent être quasi constants, mais aussi variables si les CLs angulaires varient durant le stade d'insertion. Dans le cas présent, la dernière phase de montage est caractérisée par des petits déplacements unidirectionnels au long de l'axe x uniquement. Ces déplacements s'effectuent sans aucune variation importante de l'orientation de l'extrémité du tube manipulée et donc, sans des grands changements de la courbure de la pièce. Donc, il n'y a plus de variations importantes au niveau des efforts réellement appliqués ni de ceux produits par le MMI durant la simulation numérique (Figure 6.14). Par rapport à cette manipulation, la dernière phase de la simulation présentée sur la Figure 6.2 est au contraire caractérisée par la variation importante des efforts à développer. En effet, la phase d'insertion sur la Figure 6.2 débute par le changement brusque de l'angle imposé sans passer par le stade d'approche d'une cible d'assemblage car la trajectoire d'assemblage a été contrainte, i.e. définie par un ensemble de segments de droites ou les déplacements proportionnels.

Un autre point important dans l'analyse de toute manipulation d'A/D réalisée dans l'espace des configurations est le fait que dans ce type de manipulation le problème d'existence de solutions multiples ait lieu. Comme nous l'avons déjà vu, physiquement il existe beaucoup de combinaisons de forces/moments à appliquer afin d'atteindre une configuration géométrique donnée. Cela signifie que même pour une trajectoire d'assemblage donnée, il est possible de produire plusieurs réponses dans l'espace des efforts associé. Par exemple, dans la présente étude, deux trajectoires d'assemblage similaires réelles A et B ont été générées et enregistrées au cours de l'opération d'assemblage (Figure 6.13). Notamment, ces trajectoires ont des positions de points clés très proches. Malgré une certaine similitude qualitative et quantitative au niveau des lois de variation des efforts produites par le MMI, ces lois sont assez différentes. En particulier, les variations des lois pour la force de compression Q_1 ainsi que pour les forces de flexion Q_2 , Q_3 et le moment de flexion M_3 sont différentes pour des trajectoires très similaires A et B .

Une telle différence entre des trajectoires similaires peut être expliquée notamment par l'influence du comportement d'un être humain effectuant la manipulation. En effet, ce comportement peut être caractérisé entre autre par le placement de l'opérateur dans l'espace et donc, l'orientation différente en ce qui concerne la main tenant la pièce flexible à manipuler. Ainsi, l'influence du comportement de l'opérateur peut être traduite par un des paramètres importants définissant par ailleurs les CLs requises, à savoir l'orientation de la section manipulée de la pièce flexible. Donc, pour une trajectoire d'assemblage exactement identique définie dans l'espace des configurations, la réponse dans l'espace des efforts associé ne sera pas identique car les CLs angulaires légèrement diverses influent sur la génération des efforts nécessaires, ce qui a été montré par nos expériences numériques. Ceci est un facteur important lorsqu'il s'agit notamment de généraliser et d'appliquer des résultats valables pour une opération d'assemblage donnée à des opérations similaires, mais réalisées par des opérateurs différents. Cependant, la forme des lois de variation des efforts produits par le MMI de poutres flexibles ainsi que les valeurs extrêmes pour chaque effort-suiveur Q_j ($s=L$)(i) et M_j ($s=L$)(i) permettent de dire qu'une telle généralisation des résultats peut être appliquée aux opérations similaires pour une pièce donnée sans effectuer des simulations supplémentaires, i.e. quantitativement et qualitativement ces opérations d'assemblage vont requérir des efforts acceptables du point de vue ergonomique, varier de façon similaire en fonction des stades d'assemblage (zones de manipulation, d'approche, de montage effectif), etc.

Les comparaisons de résultats produits pour des opérations similaires et présentés sur la Figure 6.14, ont été faites pour la même position de l'opérateur et donc, un type d'actions similaires. Une seule différence pour ces deux actions était la variation de l'orientation de la main, ce qui distingue en conséquence les résultats produits par le MMI en ce qui concerne les efforts requis. Cependant, si le placement de l'opérateur était différent, logiquement les efforts requis pour l'opération d'assemblage n'auraient pas été similaires même pour une trajectoire identique. De plus, comme indiqué ci-dessus, une action humaine est une fonction spécifique, propre à un être humain donné. Une action d'un opérateur « connaissant » l'espace de travail et donc, adapté à des contraintes éventuelles (les obstacles et leur position, les propriétés de la pièce flexible à assembler et notamment sa rigidité,...)

serait différente de celle d'un autre utilisateur. Ainsi, il est important de réaliser des tests complémentaires afin de pouvoir établir d'autres relations entre le comportement d'un être humain et la génération des données réalistes pour l'étude/analyse d'une opération d'A/D donnée. Notamment, différents placements de l'opérateur et les données anthropométriques variables selon des utilisateurs distincts sont de nouveaux paramètres à prendre en compte pour l'analyse ergonomique ou l'optimisation du processus d'assemblage.

Malgré une certaine différence entre les lois de variation des efforts évalués pour les trajectoires A et B (Figures 6.13, 6.14), un phénomène assez caractéristique pour les deux cas a été observé. En effet, il s'agit des changements brusques dans une zone de manipulation, à savoir des pics caractéristiques. Le retour à des données enregistrées lors des opérations d'assemblage réelles, notamment les manipulations filmées au cours de ces opérations, a permis de qualifier ces pics. En effet, ils correspondent à une phase d'évitement de collision avec un obstacle représenté par la plaque métallique attachée au banc d'essai utilisé. Ces pics sont observés pour toutes les composantes d'efforts requis. Toutefois, la phase d'évitement de collision pour les présentes opérations peut être qualifiée par des mouvements particuliers de l'opérateur caractérisés par l'évolution importante de la force de compression ainsi que des efforts de flexion. Dans tous les cas, il est nécessaire d'éviter ces zones de variations brusques des efforts. Ceci peut être un des objectifs d'optimisation d'une trajectoire d'assemblage.

6.5. Conclusions

Le but des travaux de cette thèse est de proposer, dans un premier temps, une méthodologie de simulation des opérations d'A/D de pièces déformables dans un environnement de RV ainsi que de développer par la suite un outil basé sur une telle méthodologie et permettant d'effectuer une simulation réaliste du comportement mécanique complexe de pièces flexibles, notamment, de composants modélisés par une poutre flexible soumise à des grands déplacements. Dans ce chapitre, nous avons présenté de manière générale l'utilité de la méthodologie proposée à partir d'un certain nombre de critères d'évaluation des opérations d'A/D et de maintenance virtuelles de pièces flexibles, comme la minimisation des efforts à appliquer lors de l'A/D, les optimisations diverses de trajectoires d'A/D, la prise en compte de contraintes ergonomiques, etc. Différents critères proposés sont basés sur des paramètres caractérisant les opérations d'A/D de pièces flexibles et qui doivent être évalués de façon rapide et adéquate afin de pouvoir étudier et analyser correctement une opération donnée.

Un outil logiciel, basé sur le MMI et présenté au chapitre suivant, a été créé durant les travaux de thèse et permet d'évaluer des paramètres requis pour l'évaluation des opérations d'A/D de pièces flexibles. Quelques exemples d'évaluation réaliste de tels paramètres en application de la problématique d'étude/optimisation du processus d'A/D de pièces de type poutres flexibles ont été donnés dans ce présent chapitre. En particulier, nous avons traité le problème d'évaluation réaliste des paramètres nécessaires à une manipulation dans l'espace des configurations, une manipulation intéressante et répandue compte tenu de la tendance actuelle en simulation d'A/D virtuel avec l'utilisation des interfaces fournissant des CLs géométriques mais également plus difficile à traiter du point de vue de la simulation numérique du comportement de pièces flexibles.

Une application de la méthodologie de simulation d'A/D a été également considérée vis-à-vis d'une opération d'assemblage de pièce flexible réelle. Ainsi, cet exemple a été traité de telle façon que certains aspects importants de la méthodologie apparaissent et mettent en évidence différents problèmes à prendre en compte dès la phase de définition du contexte et des objectifs de la simulation d'A/D jusqu'au moment de l'analyse des résultats d'une telle simulation. L'étude d'une opération d'assemblage a été réalisée de deux manières :

- expérimentalement, afin de pouvoir comprendre/étudier qualitativement le processus de déformation au cours d'une opération d'assemblage réelle et de modéliser une telle opération dans le contexte d'une simulation virtuelle dans l'espace des configurations. Une interface optique d'analyse de mouvement Optotrak a été utilisée pour cette modélisation ainsi que pour

l'enregistrement des données réelles mesurées et associées à la déformation et à la planification de la trajectoire d'assemblage,

- numériquement, afin de reproduire l'opération de référence dans l'espace des configurations à partir des CLs géométriques réalistes et l'étudier/caractériser qualitativement et quantitativement, i.e. l'évaluer à partir des paramètres nécessaires fournis par le MMI.

La simulation numérique a été effectuée en se plaçant dans un contexte industriel de simulation d'assemblage virtuel. Notamment, les phases importantes de préparation des données d'entrée requises pour la simulation réaliste (le choix d'un modèle mécanique, l'identification des paramètres requis par celui-ci, la modélisation de l'environnement extérieur virtuel), l'étape d'identification de certains paramètres inconnus comme les propriétés du matériau d'une pièce flexible, le problème de simulation rapide et efficace d'une opération d'assemblage virtuelle à partir de données CAO extérieures déjà existantes, l'importance des métaphores d'interaction, ont été abordés afin de valider les principaux éléments de la méthodologie de simulation des opérations d'A/D virtuel. Une telle étude a permis en conséquence d'appliquer cette méthodologie à un problème concret d'étude et d'évaluation d'une catégorie d'opérations d'assemblage de pièces de type poutres flexibles partiellement montées.

Les résultats obtenus au cours de la simulation virtuelle présentée dans ce présent chapitre sont tout à fait cohérents par rapport à la manipulation réelle et aux résultats mesurés par le système optique, intéressants du point de vue de leur utilisation dans l'étude/évaluation des opérations d'A/D virtuelles et prometteurs en vue de la caractérisation/généralisation à des opérations d'A/D similaires. Par ailleurs, l'influence de tous les types d'efforts extérieurs (traction/compression, flexion, torsion) a été montré. De ce fait, la nécessité d'utilisation des interfaces haptiques à 6 DDL pour l'organisation d'une boucle de retour d'information en terme d'efforts pour la perception/analyse adéquate a été mise en évidence. Cependant, si une telle interface haptique à retour d'effort ne peut être utilisée vu ses contraintes technologiques et/ou de coût, la simulation et l'évaluation d'une opération d'A/D virtuelle d'une pièce flexible, basée uniquement sur une interfaces de localisation spatiale (capteurs magnétiques ou optiques de mouvement ou interfaces classiques de commande) est également possible. Dans ce dernier cas, la perception, le contrôle, l'analyse de l'opération d'A/D s'effectuera par la visualisation en temps réel des résultats de la simulation réaliste du comportement d'un système mécanique donné, comme les formes déformées de la pièce, les efforts à développer. Les exemples d'affichage temps réel des résultats d'une telle évaluation réaliste sont également donnés dans ce chapitre et représentent un support intéressant pour les concepteurs de métiers différents dans le contexte pluridisciplinaire de développement d'un produit mécanique (conception mécanique, technologie et A/D, ergonomie,...).

Cependant, malgré des résultats intéressants et encourageant, obtenus lors des études présentées dans ce chapitre, il convient également de mentionner certains éléments limitant encore notre approche et nécessitant donc des études complémentaires. Parmi ces éléments on peut citer les facteurs suivants :

- la caractérisation et la prise en compte d'un comportement humain lors de la simulation réaliste des opérations d'A/D de pièces flexibles, notamment, lorsqu'il s'agit de la caractérisation/généralisation de résultats valables pour une opération d'A/D donnée et applicables à d'autres opérations d'A/D similaires. Dans ce cas, les différentes localisations de l'opérateur et les données anthropométriques d'utilisateurs distincts sont de nouveaux paramètres à prendre en compte,
- l'influence des CLs angulaires dans le cas de la manipulation virtuelle dans l'espace des configurations sur les résultats de simulation réaliste de déformation d'une pièce flexible soumise à des grands déplacements. En effet, il est nécessaire d'étudier plus en détail l'influence de la variation des angles définissant l'orientation de la section manipulée de la pièce flexible sur le réalisme de simulation du comportement mécanique, de déterminer les limites d'une telle variation ainsi que de réaliser des tests comparatifs entre les simulations numériques perturbées par des CLs angulaires moins précises et des données de références, ce qui demande par conséquent la mise en place d'une série des mesures très précises,
- la modélisation des CLs mécaniques, à savoir l'étude et la caractérisation d'autres types des CLs mécaniques différentes de celles représentant les efforts-suiveurs. Par ailleurs, il est

possible d'utiliser le même système optique à base des IREDS attachés à la main de l'opérateur afin de déduire les directions des forces appliquées réellement. Dans cette étude l'utilisation des dispositifs haptiques 6 DDL à retour d'efforts, par exemple, les bras PHANTOM ou Virtuose, est également envisageable.

Chapitre 7

Démonstrateurs de simulation de pièces flexibles

Table des matières

7.1. Introduction	226
7.2. Simulation de pièces flexibles dans le démonstrateur F3P	226
7.2.1. Présentation générale du démonstrateur	226
7.2.2. Principe de fonctionnement du démonstrateur	227
7.2.3. Principales fonctions du démonstrateur	228
7.3. Simulation de pièces flexibles dans l'environnement Virtools	231
7.3.1. Objectifs de simulation	231
7.3.2. Aspects d'intégration du MMI dans l'environnement de RV	231
7.3.3. Manipulation 2D dans l'espace des configurations	232
7.3.4. Manipulation 3D dans l'espace des efforts	233
7.3.5. Interface de manipulation à base de capteurs Polhemus	235
7.4. Conclusions	236

7.1. Introduction

Un des objectifs des travaux de cette thèse est le développement d'un outil logiciel permettant de modéliser le comportement de pièces souples de type poutres flexibles. Cet outil doit permettre de :

- prendre en compte le problème de modélisation réaliste de poutres flexibles soumises à des grands déplacements,
- simuler la déformation de poutres flexibles de façon rapide et éventuellement temps réel,
- effectuer la modélisation du comportement de pièces flexibles dans les espaces des efforts/configurations,
- valider/synthétiser certains aspects théoriques proposés et discutés dans la thèse,
- etc.

Ainsi, un démonstrateur *Flexible Part Path Planning (F3P) Version 1* a été créé au cours des travaux de cette thèse à partir de l'environnement de calcul scientifique Matlab 6.1 de MathWorks. La structure modulaire de cet outil permet de générer facilement des modules indépendants et intégrables dans un environnement de RV pour la modélisation rapide et adéquate du comportement mécanique de pièces de type poutres flexibles. Ce dernier aspect a conduit à un projet commun avec l'Institut Image/ENSAM à Chalon-sur-Saône dans le but de créer un environnement de simulation d'opérations d'A/D virtuel de pièces souples.

Ce dernier chapitre a pour objectif de présenter brièvement le démonstrateur développé, F3P, ainsi que les résultats de travail concernant la création d'un prototype de l'environnement de simulation virtuelle. Nous présenterons dans un premier temps le principe du fonctionnement ainsi que les principales fonctions du démonstrateur F3P. Un exemple de simulation interactive du comportement d'une poutre flexible 3D dans l'espace des efforts est donné dans l'annexe A. Par ailleurs, tous les tests dont les résultats sont présentés dans ce mémoire et qui concernent la modélisation du comportement de poutres flexibles, ont été effectués dans le démonstrateur F3P. Nous discuterons ensuite des principaux aspects de manipulation de pièces flexibles dans l'environnement de RV Virtools étudiés dans le cadre d'un projet commun avec l'Institut Image [Mikchevitch & al./5 2004]. La particularité de ce projet consiste en l'utilisation d'un dispositif de RV à base de capteurs Polhemus pour la manipulation à deux mains d'objets virtuels flexibles.

7.2. Simulation de pièces flexibles dans le démonstrateur F3P

7.2.1. Présentation générale du démonstrateur

Le démonstrateur F3P Version1 (Figure 7.1) a pour le but de simuler le comportement de pièces souples de type poutres flexibles soumises à des grands déplacements et à différents cas de charge durant une opération d'A/D. Ce logiciel est basé sur le MMI de poutres flexibles (chapitre 4) et peut être considéré comme un support interactif d'aide à la conception, à l'étude d'opérations d'A/D lors de la planification de trajectoires de pièces flexibles compte tenu des critères d'évaluation des opérations d'A/D proposés dans le chapitre 6. F3P nécessite l'utilisation de certaines bibliothèques spécifiques de l'environnement Matlab 6.1, et il est destiné à l'exploitation avec des PCs sous Windows.

Le démonstrateur permet de :

- simuler le comportement mécanique de pièces de type poutres flexibles en 2D/3D avec un temps de réponse extrêmement rapide et, pour certaines configurations, en temps réel (0,05...0,1 s pour la génération d'une réponse mécanique sur une station de travail performante),
- modéliser les poutres flexibles dans les espaces des efforts et des configurations,
- planifier les trajectoires d'A/D de poutres flexibles,

- simuler le comportement de poutres flexibles compte tenu des spécificités des opérations d'A/D : CLs mécaniques de type efforts-suiveurs et efforts conservatifs, assemblage à une ou à deux mains, etc.,
- évaluer/contrôler des paramètres caractérisant les opérations d'A/D de pièces flexibles : efforts, géométrie déformée, état de contraintes dans la pièce,
- évaluation d'un module d'Young constant équivalent d'une pièce souple modélisée par une poutre flexible à partir de données expérimentales (formes déformées d'une pièce flexible, Section 3.4.2).

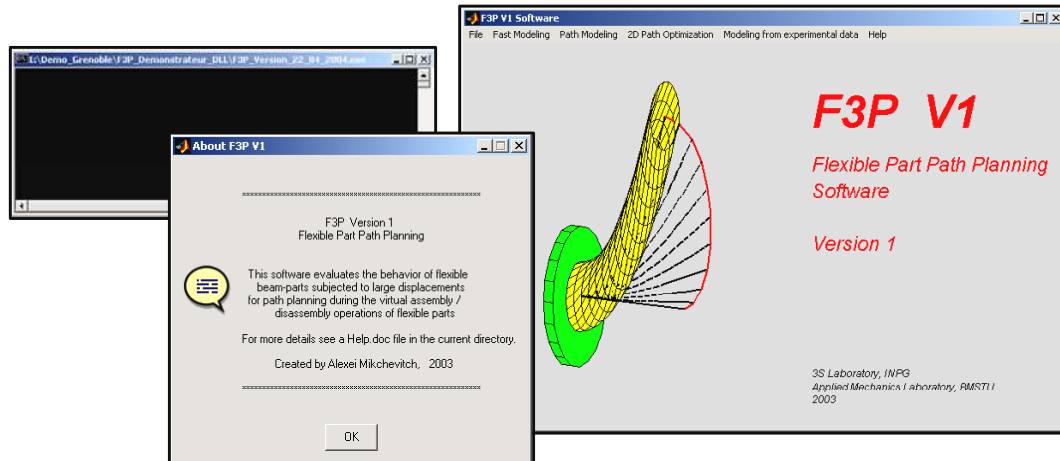


Figure 7.1. Démonstrateur F3P.

7.2.2. Principe de fonctionnement du démonstrateur

Le fonctionnement du démonstrateur est basé sur la mise en place du MMI de poutres flexibles suivant les cas de manipulation décrits dans la Section 4.2, i.e. pièces modélisées par des poutres encastées. Compte tenu de la manipulation possible d'objets virtuels dans deux espaces, la simulation de poutres flexibles dans le démonstrateur s'effectue à partir de CLs géométriques et mécaniques. Ainsi, chaque simulation de comportement mécanique de poutres flexibles peut être présentée comme une fonction de modélisation qui requiert des données d'entrée associées au MMI et produit à la sortie une réponse mécanique du système dans l'espace correspondant.

Les principaux paramètres d'entrée pour toute simulation dans le démonstrateur sont :

- la géométrie de la pièce :
 - la longueur L ,
 - les moments quadratiques de la section (flexion I , torsion I_t),
 - la courbure et/ou la torsion initiales κ_i , $i = \{1,2,3\}$,
- les caractéristiques matériaux de la pièce :
 - le module d'Young E ,
 - le module d'élasticité transversal G ,
- les CLs :
 - géométriques : dans la zone d'encastrement $\mathbf{X}(s=0)$ et $\Theta(s=0)$, la (les) configuration(s) géométrique(s) à atteindre ou la trajectoire d'A/D imposée $\mathbf{X}(s=L)$ et $\Theta(s=L)$ si la simulation s'effectue dans l'espace des configurations,
 - mécaniques : les forces $\mathbf{Q}(s=L)$ et les moments $\mathbf{M}(s=L)$ appliqués ainsi que la nature des efforts (suiveurs, conservatifs) si la simulation s'effectue dans l'espace des efforts.

En fonction des objectifs de simulation, d'autres paramètres peuvent être requis par le démonstrateur avant la simulation :

- la géométrie d'un obstacle dans l'espace des configurations si une trajectoire d'A/D libre de collisions est imposée,

- la nature d'efforts à évaluer par le démonstrateur si la simulation s'effectue dans l'espace des configurations,
- les paramètres de contrôle caractérisant l'opération d'A/D pour l'optimisation de celle-ci tout au long de la manipulation de la pièce flexible : efforts maximum et courbure maximale/minimale à ne pas dépasser, contrainte admissible dans la pièce,
- un chemin de chargement particulier.

Les données de sortie représentent des réponses du système mécanique dans les espaces des efforts et/ou configurations associés :

- la (les) forme(s) déformée(s) de la pièce flexible,
- la trajectoire d'A/D,
- les efforts à développer afin de réaliser une configuration ou une trajectoire données,
- les efforts internes/contraintes dans la pièce flexible déformée,
- etc.

Les données de sortie sont représentées sous forme :

- graphique,
- textuelle.

Généralement, chaque simulation commence par la définition interactive d'un mode de simulation (espace des efforts/configurations, une/deux mains pour la manipulation) ainsi que les paramètres d'entrée requis en fonction de l'objectif à atteindre. Une telle définition se réalise par l'activation des fonctions disponibles dans le démonstrateur à l'aide des menus. La présentation des principales fonctions sera faite ci-après. Cependant, il est parfois nécessaire de spécifier ou de valider également interactivement (suivant une requête du logiciel) un certain nombre d'éléments supplémentaires comme la géométrie d'un obstacle, l'erreur d'évaluation d'une solution, le nombre de points intermédiaires de la trajectoire d'A/D, etc. Le (les) réponse(s) du système mécanique (déformation de la pièce flexible, sa trajectoire, lois de variation d'efforts) s'affiche(ent) quasiment en temps réel au cours de la simulation. Les résultats de simulation peuvent être enregistrés dans un fichier texte à la fin de la modélisation si nécessaire.

7.2.3. Principales fonctions du démonstrateur

Les fonctions disponibles actuellement dans le démonstrateur sont accessibles à partir des options du menu principal du logiciel (Figure 7.2). Ces options sont regroupées de la manière suivante :

- *File*
- *Fast Modeling*
- *Path Modeling*
- *2D Path Optimization*
- *Modeling from experimental data*
- *Help*

Option *File* :

Cette option dispose de deux fonctions permettant d'enregistrer des données (au stade de développement) ou de quitter le démonstrateur : *Save, Exit*.

Option *Fast Modeling* :

Cette option offre à l'utilisateur des fonctionnalités de modélisation rapide avec l'évaluation d'une réponse du système mécanique (pièce souple modélisée par une poutre flexible) pour une configuration géométrique ou charge données sans la planification de trajectoire d'A/D. L'option *Fast Modeling* dispose des options *Force Space, Configuration Space, Mixed Cases* (Figure 7.2) permettant de :

- simuler le comportement mécanique d'une pièce donnée dans les espaces des efforts et des configurations selon les CLs de natures différentes fournies par l'utilisateur par l'intermédiaire des interfaces actuelles de RV : CLs géométriques (position et orientation à atteindre), CLs mécaniques (efforts-suiveurs ou efforts conservatifs), CLs mixtes, i.e. CLs à la fois géométriques et mécaniques imposées par l'utilisateur,
- modéliser le comportement de la poutre flexible pour la manipulation d'A/D de celle-ci à une ou deux mains (*one/two hands*),
- simuler la déformation de la poutre flexible en 2D ou 3D.

Les fonctions proposées par l'option *Fast Modeling* sont les fonctions de base utilisées par d'autres fonctions du démonstrateur et correspondent à la mise en place du MMI de poutres flexibles compte tenu des différents aspects discutés au chapitre 5 comme :

- l'utilisation des méthodes de collocation et de tir pour la résolution numérique des EDOs décrivant le comportement de la poutre flexible,
- l'existence des solutions multiples et l'évaluation automatique de la solution initiale,
- la recherche d'une solution dans l'espace des configurations à partir de la méthode de discrétisation de l'espace,
- etc.

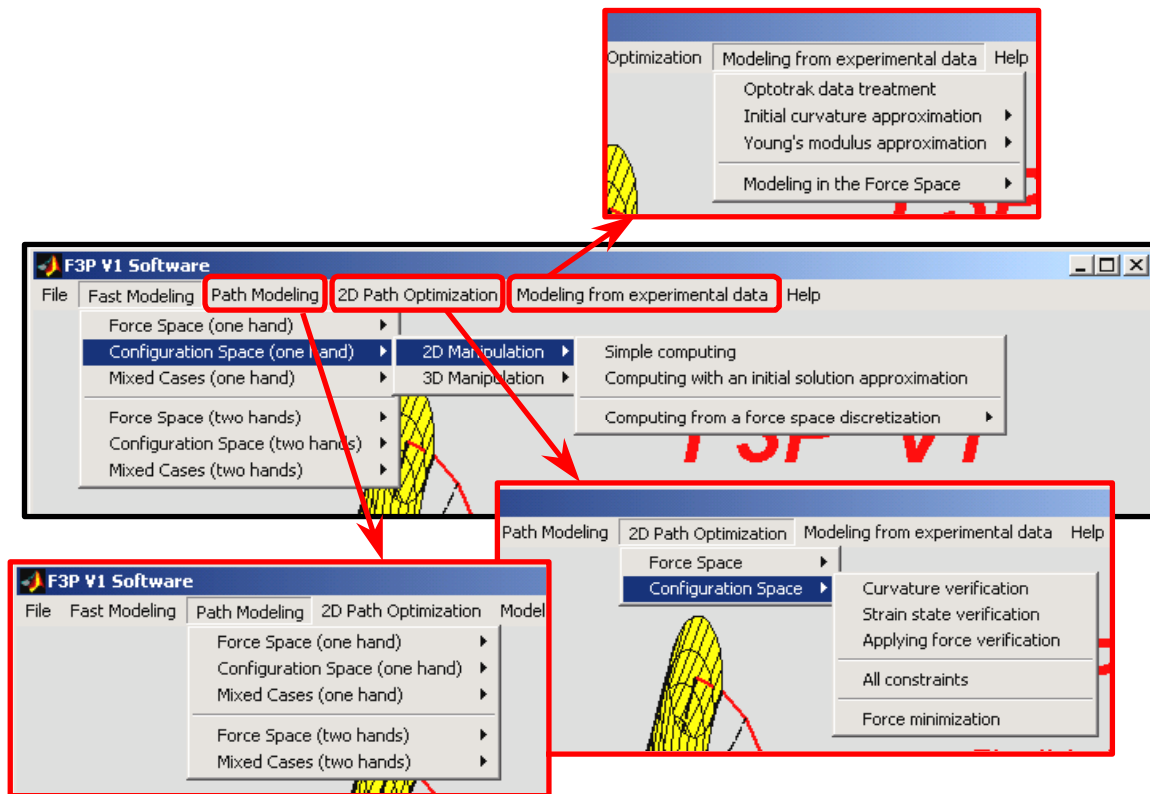


Figure 7.2. Menu principal avec les options/fonctions correspondantes du démonstrateur F3P.

Option *Path Modeling* :

La particularité de cette option (Figure 7.2) consiste en la modélisation du comportement de poutres flexibles dans les deux espaces introduits avec l'évaluation de :

- la trajectoire d'A/D pour un changement donné,
- la loi de variation d'efforts requis pour une trajectoire d'A/D donnée.

Lorsqu'il s'agit de la modélisation dans l'espace des efforts, il est également possible de spécifier différents chemins de chargement dans l'espace des efforts compte tenu de la diversité des manipulations d'A/D.

La manipulation dans l'espace de configurations permet de tenir compte d'un obstacle rigide présent dans l'espace de travail de la pièce flexible. La définition de la géométrie d'un tel obstacle, si nécessaire, s'effectue interactivement par l'utilisateur. Cet obstacle représente en effet un domaine interdit pour toute pénétration. L'existence d'un tel domaine permet de planifier (imposer) une trajectoire d'A/D libre de collisions grâce à la faculté de vision globale de l'utilisateur.

Option 2D Path Optimization :

Cette option (Figure 7.2) permet de combiner la planification de trajectoires d'A/D de poutres flexibles 2D manipulées à une main avec le contrôle des principaux paramètres caractérisant les opérations d'A/D de pièces flexibles :

- les efforts maximum à ne pas dépasser lors de la simulation d'A/D (critère de minimisation des efforts à développer du point de vue de l'ergonomie),
- l'état de contrainte dans la pièce flexible déformée tout au long de la simulation (critère de résistance du matériau, critère de minimisation des contraintes résiduelles dans la pièce déformée montée dans un mécanisme donné),
- la courbure maximale/minimale de la pièce flexible déformée au cours de la simulation (contrainte technologique).

Le contrôle s'effectue visuellement par l'affichage en temps réel des graphes de variation des paramètres concernés ou bien de tous les paramètres le cas échéant. Lorsque l'utilisateur souhaite réaliser un tel type d'optimisation de la trajectoire de la pièce, les valeurs admissibles des paramètres à contrôler sont alors requises par le démonstrateur avant le lancement de la simulation.

Option Modeling from experimental data :

Cette option permet d'évaluer la caractéristique matériau (module d'Young) d'une poutre flexible donnée à partir des données expérimentales, représentant les formes déformées mesurées et regroupées dans un fichier texte de format spécial. L'évaluation d'un module d'Young constant équivalent s'effectue par le recalage des données expérimentales avec les déformées fournies par le MMI de poutres flexibles à partir d'une charge de référence donnée. Notamment, les modules d'Young constants utilisés dans les Sections 3.4.2 et 6.4.2 du présent mémoire ont été évalués en utilisant la fonction *Young's modulus approximation* de l'option *Modeling from experimental data*.

L'option *Modeling in the Force Space* propose des fonctions permettant l'évaluation des lois de variation des efforts à partir des données expérimentales pour une pièce souple à modéliser par une poutre flexible 2D ou 3D. Les données d'entrée pour ce type d'évaluation représentent :

- la trajectoire 2D/3D réalisée et enregistrée auparavant, i.e. les CLs géométriques à imposer,
- les déformées de la pièce flexible mesurées et enregistrées.

Ainsi, la simulation consiste en la recherche d'une réponse du système mécanique dans l'espace des efforts pour chaque point courant de la trajectoire ou forme déformée intermédiaire.

De plus, une fonction spécifique *Optotrak data treatment* a été créée afin de pouvoir reproduire une opération d'assemblage réelle présentée au chapitre 6. Cette fonction effectue un traitement de données mesurées par le système optique de RV Optotrak pour que ces dernières puissent être représentées sous forme requise par le démonstrateur. Le dépouillement de résultats expérimentaux se réalise ainsi de façon automatique. Par ailleurs, la sélection/analyse des formes particulièrement intéressantes pour l'utilisateur peut être effectuée grâce à une fonction de post-traitement interactif intégrée, si nécessaire.

Option Help :

Cette option permet d'accéder à une présentation rapide du démonstrateur ainsi qu'à une aide comportant des renseignements sur le fonctionnement de F3P et des exemples de simulations. Un tel exemple est donné dans l'annexe A.

7.3. Simulation de pièces flexibles dans l'environnement Virtools

7.3.1. Objectifs de simulation

La dernière partie des travaux de cette thèse consiste en l'intégration du MMI de poutres flexibles et son exploitation dans un environnement de RV afin de pouvoir étudier différents aspects liés à des particularités de simulation du comportement mécanique de pièces virtuelles à caractère flexible. Par ailleurs, certains éléments ont été étudiés dans le cadre d'un projet commun avec l'Institut Image (projet de fin d'études de G. Lemasson).

Les principaux aspects de cette étude sont :

- l'intégration du MMI de poutres flexibles dans l'environnement de RV Virtools,
- la simulation de pièces flexibles dans l'environnement de RV compte tenu de la nature différente des CLs,
- le problème de conception des métaphores d'interaction,
- la manipulation de pièces virtuelles flexibles à deux mains à l'aide d'un dispositif à base de capteurs Polhemus conçu à l'Institut Image.

Nous résumerons dans cette partie des résultats de cette étude et indiquerons certaines pistes possibles à explorer dans les études futures.

7.3.2. Aspects d'intégration du MMI dans l'environnement de RV

La structure modulaire du démonstrateur F3P permet de générer facilement des modules en langage C/C++, modules potentiellement intégrables dans des outils ouverts, offrant la possibilité de développement de sa propre application. L'environnement de RV Virtools permet ce type de développement et intègre facilement des bibliothèques spécifiques extérieures. Ainsi, l'environnement Virtools a été choisi dans le but de créer un environnement de simulation d'opérations d'A/D virtuels souple, permettant de :

- réaliser différentes simulations nécessaires à partir des modules de base de chaque environnement de RV : manipulation d'objets rigides, détection de collisions en temps réel, création d'un monde virtuel, etc.,
- considérer le comportement physique d'objets manipulés par l'intégration directe des bibliothèques spécifiques : MMI/MTR divers de pièces déformables, modèles décrivant des problèmes de contacts entre l'objet virtuel déplacé et son environnement, etc.,
- supporter le transfert de données issues d'un modèleur extérieur CAO via des formats correspondant, par exemple, le format VRML,
- maintenir l'environnement développé par la mise à jour des modules correspondant, la prise en compte de nouvelles contraintes de simulation ou d'autres besoins industriels, etc.

Ainsi, les bibliothèques spécifiques décrivant le comportement mécanique de poutres flexibles 2D/3D dans le cas de la simulation dans l'espace des efforts/configurations ont été générées à partir du démonstrateur F3P. Ces bibliothèques ont été directement intégrées par G. Lemasson dans l'environnement Virtools puis connectées avec d'autres fonctions de cet environnement comme la manipulation temps réel de la pièce flexible avec la définition de CLs géométriques, la visualisation temps réel des résultats de calcul du MMI intégré, etc. La Figure 7.3. présente un exemple de simulation d'une pièce virtuelle flexible 3D dans l'espace des configurations dans Virtools. Cette simulation correspond une manipulation de l'extrémité libre d'une poutre flexible soumise à des CLs géométriques exprimant les grands déplacements imposés.

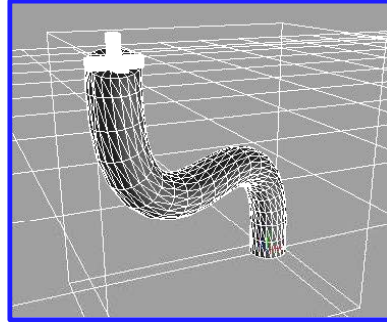


Figure 7.3. Simulation 3D d'une poutre flexible dans l'environnement de RV Virtools.

7.3.3. Manipulation 2D dans l'espace des configurations

Dans cette partie nous présentons un exemple de manipulation 2D d'une pièce souple modélisée par une poutre flexible à l'aide du MMI intégré. La poutre flexible à la Figure 7.4 est une pièce souple encastree à une extrémité et manipulée à l'autre à partir de l'application des CLs géométriques imposées par l'utilisateur. Ces CLs représentent, dans un premier temps, les mouvements d'une simple souris 2D transmis au système de simulation virtuelle en temps réel. A son tour, le système de simulation génère la déformation adéquate basée sur le MMI de poutres flexibles et affiche la forme déformée pour la perception/analyse visuelle de la déformation. La trajectoire de la pièce virtuelle n'est pas montrée sur la Figure 7.4.

Un des problèmes soulevés lors d'une telle manipulation est l'impossibilité de fournir simultanément les trois CLs géométriques requises pour le MMI 2D lors de la génération des mouvements de la souris 2D. En effet, pour que la manipulation de la pièce soit effectuée de façon naturelle, il convient d'appliquer simultanément les CLs requises. Cependant, avec un périphérique de type souris 2D, il n'est possible de fournir que deux CLs géométriques représentant des mouvements de translation. Ainsi, il est nécessaire de subdiviser les CLs géométriques en deux parties :

- la position courante de l'extrémité manipulée de la pièce, par exemple, les coordonnées x et y dans le plan $\{Oxy\}$. Dans ce cas, l'orientation de la section de cette extrémité reste inchangée,
- l'orientation θ de la section de l'extrémité manipulée. Dans ce cas, la position de cette extrémité reste inchangée.

Le type de CLs géométriques nécessaires à imposer peut être défini à l'aide d'une métaphore d'interaction dont l'activation s'effectue à partir d'une icône correspondante qui est une représentation graphique de la métaphore. Les icônes définissant la nature des mouvements de la pièce virtuelle (translation, rotation) sont disponibles dans un menu de l'environnement Virtools.

A chaque mouvement de la pièce virtuelle au cours de la manipulation de celle-ci dans l'espace des configurations, le MMI produit une réponse mécanique dans l'espace des efforts-suiveurs associé (Q, N, M) . Une telle réponse est visualisée de deux façons au cours de la manipulation (Figure 7.4) :

- quantitativement : la valeur et la direction de chaque effort-suiveur,
- qualitativement : la couleur associée à un effort, le changement de dimension de chaque flèche indiquant la diminution ou l'augmentation de la valeur de l'effort correspondant.

Il convient également de noter le problème d'intégration directe des codes issus d'un environnement extérieur (Matlab dans le présent cas) à partir duquel le démonstrateur F3P a été créé. En effet, un certain nombre de fonctions propres à Matlab ont été utilisées afin d'accélérer le développement du démonstrateur. Ainsi, malgré le fait que les bibliothèques comprenant le MMI de poutres flexibles et intégrées directement dans Virtools ont été générées à partir des codes en C/C++, l'utilisation des fonctions de Matlab a eu une certaine influence sur l'exploitation du MMI dans Virtools. Notamment, le temps de réponse a été moins performant que celui obtenu dans F3P. Par conséquent, cela conduit aux propositions suivantes à mettre en place et à tester prochainement :

- améliorer les performances du MMI en terme de portabilité, par exemple, créer des codes moins dépendants de bibliothèques extérieures,
- dissocier le MMI en terme d'équations et de méthodes numériques. Dans ce cas, les solveurs spécifiques (résolution des EDOs, ...), intégrés ou déjà disponibles dans un environnement de RV, peuvent être directement appelés par le MMI, si nécessaire, au cours de la manipulation virtuelle.

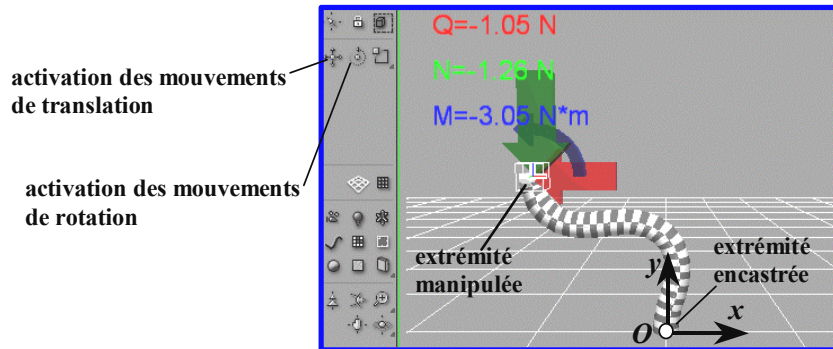


Figure 7.4. Manipulation 2D d'une poutre flexible soumise à des CLs géométrique dans l'environnement de RV Virtools.

7.3.4. Manipulation 3D dans l'espace des efforts

La manipulation dans l'espace des efforts d'un objet flexible suppose l'application des CLs mécaniques au niveau des efforts engendrant la déformation de l'objet virtuel. Malgré l'intérêt de l'exploitation du MMI dans l'espace des efforts par rapport à la manipulation dans l'espace des configurations (réponse mécanique plus rapide, pas de problème de multiplicité de solutions, manipulation physiquement plus cohérente par rapport aux actions de l'opérateur dans le monde réel,...), la mise en place du MMI est plus difficile dans ce cas car :

- il est nécessaire de mesurer et d'appliquer tous les efforts externes simultanément,
- spécifier des CLs mécaniques à partir des interfaces disponibles, ne permettant généralement de fournir qu'une information géométrique,
- concevoir des métaphores d'interaction particulières permettant de traduire correctement les informations mesurées en données d'entrée requises par le MMI pour un bon fonctionnement de celui-ci.

Dans la présente étude, l'utilisation d'une interface de contrôle de RV en position, i.e. fournissant des efforts comme données d'entrée, a été évitée en raison de :

- coût important d'une telle interface,
- problème de développement facile des efforts nécessaires des points de vue constructif et ergonomique.

En effet, les problèmes majeurs des dispositifs haptiques actuels (à part leur coût) sont liés à leur conception qui souvent ne permet pas de réaliser toutes les configurations possibles dans l'espace de travail ainsi que leurs limites de valeurs d'efforts maximum qui sont fonctions de la construction du dispositif. Afin de contourner certaines difficultés, des interfaces fournissant l'information géométrique en entrée ont été employées. Dans un premier temps, une souris 2D banalisée pour de simples tests puis un dispositif à base de capteurs Polhemus développé à l'Institut Image ont été utilisés. La présentation brève du dispositif comprenant les capteurs Polhemus sera faite dans la partie suivante. Notons toutefois que l'intérêt de l'utilisation d'un tel périphérique est une certaine souplesse pour la spécification simultanée des déplacements linéaires et angulaires représentant les CLs imposées.

Les interfaces utilisées pour la spécification des CLs dans le cas de la simulation dans l'espace des efforts, permettent d'élargir le champ des interactions possibles (par exemple, réaliser différentes configurations géométriques dans un espace de travail assez important) et surtout d'éviter un investissement financier important. Cependant, ces interfaces ne fournissent aucun effort associé à une manipulation donnée de la pièce flexible. Ainsi, la conception de métaphores d'interaction particulières est nécessaire afin de pouvoir substituer de façon conventionnelle les efforts à appliquer à la pièce virtuelle flexible par les déplacements réalisés et mesurés par la souris et le dispositif à base de capteurs Polhemus.

La conception de métaphores d'interaction est très délicate dans le cas d'une telle substitution. Par exemple, la métaphore proposée dans la présente étude et représentant l'application d'efforts à l'aide des déplacements mesurés par la souris peut éloigner l'opérateur encore plus de la réalité lors de la manipulation d'une pièce virtuelle et l'analyse des résultats de simulation (Figure 3.2, Section 3.2). Donc, il est nécessaire pour des tests à venir de mettre en place une expérimentation afin d'évaluer et valider la substitution utilisée. Les expériences vont consister en la comparaison des résultats de différentes manipulations réalisées avec et sans la métaphore :

- manipulation dans un mode réel avec une capture de mouvements et la mesure des efforts développés réellement. A titre d'exemple, une telle manipulation a été présentée au chapitre 6,
- manipulation dans un monde virtuel avec un dispositif haptique de contrôle en position, i.e. permettant de mesurer des efforts appliqués au dispositif, sans utiliser la métaphore d'interaction à évaluer,
- manipulation dans un monde virtuel avec une interface de contrôle en effort, i.e. fournissant les informations géométriques, en utilisant la métaphore d'interaction.

Ces études permettraient de qualifier la métaphore utilisée ainsi que d'identifier des relations particulières entre les efforts et les déplacements substituant ces efforts. En particulier, les tests comparatifs peuvent fournir une information sur un facteur d'échelle k caractérisant quantitativement le rapport entre le déplacement et l'effort à substituer.

Dans les manipulations effectuées à ce jour, la substitution suivante a été utilisée (sans tenir compte de facteur d'échelle) :

- les forces de type efforts-suiveurs Q_j , $j = \{1,2,3\}$ ont été substituées par les déplacements linéaires d_i suivant l'axe de coordonnée $i = \{x,y,z\}$,
- les moments de type efforts-suiveurs M_j , $j = \{1,2,3\}$ ont été substitués par les déplacements angulaires α_i par rapport à l'axe de coordonnée $i = \{x,y,z\}$.

Les études complémentaires auront donc pour objectif d'identifier les facteurs d'échelle $k_{i,Q}$ et $k_{i,M}$ afin de qualifier les relations entre les déplacements et les efforts de type :

$$Q_j = k_{i,Q} d_i \quad j = \{1,2,3\}, \quad (7.1)$$

$$M_j = k_{i,M} \alpha_i, \quad j = \{1,2,3\}. \quad (7.2)$$

L'utilisation de la souris 2D permet de spécifier simultanément deux efforts à appliquer, car le mouvement de la souris est caractérisé par deux coordonnées dans le plan (par exemple, x et y). L'utilisation du dispositif à base des traqueurs 3D (par exemple, capteurs Polhemus) permet de fournir trois déplacements linéaires et trois déplacements angulaires et donc, de spécifier les six efforts. L'exemple représenté sur la Figure 7.5 illustre une manipulation de pièce virtuelle modélisée par une poutre flexible dans l'espace des efforts-suiveurs (Q_1, Q_2, Q_3) avec la spécification simultanée de trois forces Q_j . Notamment, la Figure 7.5b présente l'espace des efforts dans lequel l'utilisateur « manipule » les forces à appliquer à la pièce virtuelle définies par les déplacements linéaires de l'interface de RV.

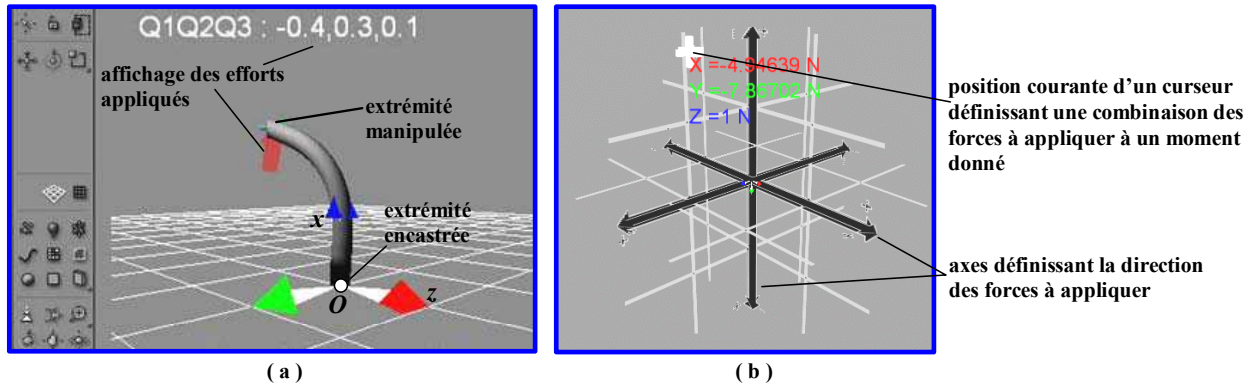


Figure 7.5. Manipulation 3D d'une poutre flexible dans l'environnement de RV Virtools :
 (a) manipulation d'une poutre soumise à des CLs mécaniques,
 (b) « manipulation » d'efforts dans l'espace des efforts (Q_1 , Q_2 , Q_3).

7.3.5. Interface de manipulation à base de capteurs Polhemus

Cette interface a été conçue à l'Institut Image pour la manipulation intuitive d'objets virtuels à deux mains [Collet & al. 2002]. Une des applications potentielles de cette interface est la manipulation de pièces pour la simulation d'opérations d'A/D et de maintenance virtuelles à deux mains. Le dispositif a été testé pour des manipulations virtuelles d'objets rigides. Un des objectifs du projet commun avec l'Institut Image est donc l'étude de manipulation de pièces déformables et, en particulier, de pièces flexibles soumises à des grands déplacements à deux mains.

Le système de manipulation est basé sur l'utilisation des capteurs Polhemus, i.e. la mesure et la spécification des informations géométriques associées à la manipulation d'objets dans un environnement virtuel sans retour d'effort. Le principe de fonctionnement de ce système est le suivant. Les capteurs électromagnétiques Polhemus utilisent une source émettrice fixe qui crée un champ magnétique variable, définissant un domaine d'action du capteur (Figure 7.6a). Un récepteur, lié à la main de l'utilisateur et donc à un objet virtuel à manipuler, mesure les variations de ce champ en temps réel en fonction de la position de la main. Selon l'interface de manipulation à deux mains, un capteur et un interrupteur sont liés à chaque main de l'utilisateur manipulant l'objet virtuel (Figure 7.6b). Toutefois, il faut noter qu'une contrainte de ce type de capteur est l'impossibilité de fonctionner correctement dans un environnement comportant des objets métalliques : le champ magnétique variable crée des courants de Foucault dans les pièces conductrices ce qui génère des champs magnétiques complémentaires perturbant le repérage de la main tenant le capteur.

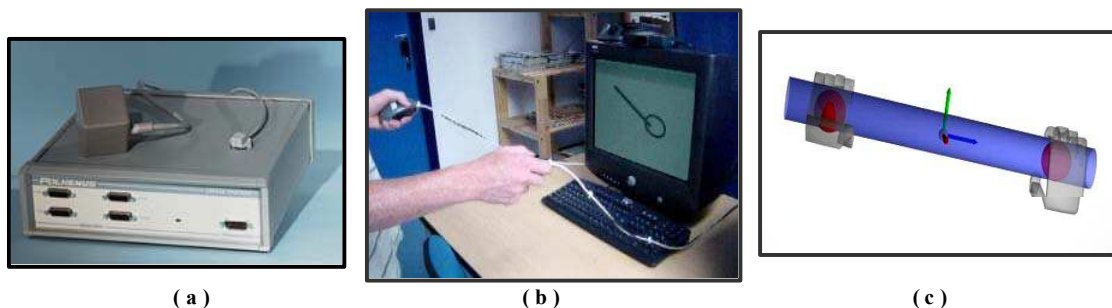


Figure 7.6. Interface de manipulation d'objets virtuels à base des capteurs Polhemus :
 (a) dispositif moteur de Polhemus [Polhemus 2003],
 (b) manipulation d'objets virtuels à l'aide des capteurs Polhemus [Collet & al. 2002],
 (c) manipulation d'un objet virtuel rigide à deux mains.

Concrètement, l'utilisation du dispositif présenté a apporté ou apporterait (car les études ne sont pas encore terminées à ce jour) certaines améliorations en ce qui concerne la manipulation d'une pièce virtuelle flexible en 3D. Les principaux avantages de son utilisation sont :

- la spécification simultanée des CLs géométriques (déplacements de translation et de rotation) en temps réel,
- la possibilité de réalisation de toutes les configurations dans l'espace de travail assez important (quelques mètres cubes) sans gêner les mouvements de l'opérateur,
- le faible coût,
- la prise en compte d'un comportement de l'opérateur effectuant la manipulation d'une pièce virtuelle de façon intuitive.

Notamment, la spécification simultanée des déplacements linéaires et angulaires dans le cas de la simulation d'une pièce flexible dans l'espace des configurations correspond à la définition des CLs géométriques de façon adéquate. En effet, dans ce cas, la trajectoire d'A/D de la pièce et les rotations associées sont imposées en même temps sans subdiviser l'action naturelle d'un être humain en mouvements de translations et de rotations appliqués séparément. Par conséquent, cela influence la convergence numérique du MMI et le temps de réponse, car il y a une tendance de fournir les CLs géométriques plus réalistes et donc moins contraignantes du point de vue de la recherche d'une solution dans l'espace des efforts lorsque les déplacements linéaires et angulaires ne sont pas séparés.

De plus, comme l'on a vu précédemment, il est nécessaire d'appliquer généralement les forces de traction/compression et de flexion ainsi que les moments de flexion sans les séparer non plus dans le cas de simulation dans l'espace des efforts. Ce type de manipulation reflète le comportement naturel de l'opérateur lorsqu'il travaille dans la zone de manipulation caractérisée par des variations considérables des lois de ces efforts ainsi que par des changements importants de la forme d'une pièce flexible lors de l'opération d'A/D. Ainsi, sous l'hypothèse de substitution correcte des efforts à appliquer par les déplacements compte tenu d'un certain facteur d'échelle, l'interface à base de capteurs Polhemus permettrait également de spécifier simultanément des CLs mécaniques.

7.4. Conclusions

Dans ce chapitre nous avons présenté de manière synthétique deux démonstrateurs de simulation rapide de pièces de type poutres flexibles développés au cours des travaux de cette thèse. Le démonstrateur F3P créé à partir de l'environnement Matlab permet d'effectuer interactivement la modélisation rapide du comportement mécanique de pièces de type poutres flexibles soumises à des grands déplacements. Ce démonstrateur est basé sur le concept d'espaces dans lesquels la manipulation d'une pièce flexible donnée se réalise compte tenu de la nature des différentes CLs prescrites par les interfaces actuelles de contrôle de RV. F3P représente la mise en place de MMI de poutres flexibles ainsi que résume la validation expérimentale de différentes méthodes numériques pour traiter ce modèle mécanique. Le principe de fonctionnement et les principales fonctions du démonstrateur ont été présentés. Notamment, les fonctions offrant la planification de trajectoire d'A/D de pièces souples modélisées par une poutre flexible partiellement montée, la modélisation de déformation d'une pièce souple à deux mains, l'évaluation et l'optimisation des paramètres caractérisant les opérations d'A/D de pièces flexibles, etc. sont brièvement décrites.

Le second démonstrateur réalisé en étroite collaboration avec G. Lemasson dans le cadre d'un projet commun avec l'Institut Image se base sur le MMI intégré directement dans l'environnement de RV Virtools. L'exploitation du MMI dans l'environnement de RV a permis d'étudier :

- différents aspects de l'intégration de modules extérieurs comportant des modèles physiques complexes,
- le problème de conception des métaphores d'interaction traduisant les informations fournies par les interfaces de contrôle de RV en données d'entrée requises par un modèle physique donné,

- le comportement du MMI dans les conditions de manipulation virtuelle dans l'espace des efforts et des configurations.

A l'issue des tests effectués, la viabilité du système développé a été démontrée. Cependant, l'intégration des modules extérieurs contenant des codes du MMI dans Virtools, codes couplés avec les méthodes numériques associées (en fonction de l'espace), ne permet pas d'utiliser pleinement la déformation de la pièce flexible pour l'analyse d'A/D à cause d'un problème de temps de calcul. Par conséquent, la séparation des codes du MMI et des méthodes de traitement numérique est envisagée. L'utilisation de méthodes numériques performantes extérieures (solveurs des ODEs non-linéaires, solveurs des systèmes soumis au PL,...) intégrées indépendamment des codes du MMI ou celles déjà disponibles dans un environnement de RV donné permettra de diminuer le temps de réponse du système mécanique lors de simulations basées sur le MMI. Ainsi, les performances du système de simulation, notamment, les performances en ce qui concerne la manipulation virtuelle dans l'espace des configurations peuvent être considérablement améliorées.

L'intégration des modules contenant le MMI sous forme adimensionnée représente une certaine souplesse du point de vue de leur exploitation dans un environnement de RV dans un contexte industriel. En effet, dans ce cas il est facile de modéliser le comportement mécanique d'une pièce flexible dont les caractéristiques matériaux et géométriques sont à faire varier au cours d'une étude/optimisation d'une manipulation virtuelle donnée. Ainsi, il est tout à fait possible de créer des bibliothèques de matériaux, de sections de pièces, etc. dans un prototype de l'environnement de simulation d'A/D virtuel, bibliothèques qui forment un support intéressant pour le concepteur. De même, il est également possible d'intégrer dans le prototype d'environnement d'A/D virtuel d'autres modules extérieurs permettant de corriger les modèles CAO, d'adapter le modèle de pièce flexible à manipuler à la modélisation mécanique correspondante compte tenu des particularités de tel ou tel MMI, etc. Cependant, une étude complémentaire des besoins spécifiques auprès des industriels est nécessaire afin de prendre en considération de nombreuses contraintes industrielles.

De plus, le problème important de conception adéquate des métaphores d'interaction a été également soulevé. En effet, en fonction de l'espace dans lequel la manipulation virtuelle s'effectue ainsi que de l'interface de contrôle de RV utilisée, différentes métaphores traduisant les informations fournies par de telles interfaces en données d'entrée requises par le MMI, sont souvent nécessaires. Les études effectuées montrent qu'il convient de spécifier simultanément toutes les CLs pour la simulation de pièces de type poutres flexibles. Ainsi, l'utilisation de périphériques 2D banalisés ne suffit plus pour la manipulation réaliste de la pièce à caractère flexible. En effet, le problème consiste en l'impossibilité de spécifier plus que deux CLs (géométriques ou mécaniques) si une interface 2D est utilisée. Cela peut provoquer l'imposition des CLs inadéquates, incohérentes par rapport à ce que l'on imposerait réellement lorsque les charges et les mouvements transmis à un objet réel manipulé sont souvent combinés (par exemple, mouvements en translation et en rotation). Par conséquent, les configurations définies par les CLs géométriques incohérentes sont souvent « difficiles » à traiter numériquement, i.e. le temps de recherche d'une solution est important, les efforts requis évalués par le MMI sont importants.

Les interfaces 3D de RV, basées par exemple sur les traqueurs 3D de mouvements de l'opérateur, comme celui utilisé à l'Institut Image, permettent d'éviter le problème des CLs géométriques. Dans ce cas, les déplacements en translation et en rotation sont spécifiés simultanément. De plus, les traqueurs de mouvements sont ergonomiquement intéressants, car généralement ils ne gênent pas les mouvements de l'opérateur, ce qui permet de fournir des CLs encore plus adéquates de façon naturelle et intuitive. Cependant, lorsqu'il s'agit de la manipulation dans l'espace des efforts, les interfaces ne fournissant que les informations géométriques ne sont plus utilisables directement. Les tests effectués ont montré qu'il est possible de contourner cette difficulté en employant des métaphores d'interactions, par exemple, une métaphore substituant les efforts à appliquer à une pièce virtuelle donnée par les déplacements. Toutefois, il convient d'effectuer des tests complémentaires afin d'évaluer quantitativement une telle métaphore, i.e. :

- estimer expérimentalement un facteur d'échelle entre les déplacements et les efforts substitués,
- étudier l'ergonomie de la manipulation virtuelle basée sur une telle métaphore,

- étudier l'impact sur la qualité des résultats de simulation en général en se plaçant dans un environnement immersif de type CAVE ou MOVE.

Conclusions et perspectives

Conclusions

Dans cette thèse nous avons présenté dans un premier temps les principales méthodes de conception utilisées pour les systèmes mécaniques et constaté qu'il est important de tenir compte des différents points de vue des métiers divers intervenant dans le cycle de développement du produit dès les premières phases de conception. Notamment, l'importance des métiers de la fabrication, de l'assemblage, de la maintenance a été discutée afin de mettre en avant la nécessité de prise en compte des contraintes de ces métiers lors du processus de développement du produit dans un contexte de compétitivité mondiale. Par conséquent, les méthodes (semi-) automatiques de conception de type DFX couramment employées dans l'industrie et, en particulier, les méthodes DFA/DFMA permettant de considérer certaines contraintes d'A/D et de maintenance pour la conception ont été présentées et analysées de façon critique. Notamment, les inconvénients de ces approches comme la difficulté de produire les informations relatives à l'évaluation qualitative du produit, la nécessité d'un avis d'un (des) expert(s) souvent requise, le processus généralement caché d'évaluation du produit, l'impossibilité de tenir compte de la déformation des pièces, le besoin de représentation géométrique du produit fini, etc. limitent encore leur utilisation dans l'étude et l'optimisation des systèmes mécaniques.

Afin d'éviter de nombreux retours vers la re-conception, de favoriser les échanges entre les acteurs de différents métiers, de permettre aux concepteurs d'étudier/analyser/optimiser le produit ou un phénomène donné de manière quantitative mais aussi qualitative tout en visualisant le processus d'évaluation du produit, du phénomène ou du process à simuler et même de devenir un acteur de ce process, l'intérêt d'un outil puissant comme la RV pour l'étude et l'évaluation du produit au cours de son développement ou de son process (usinage, A/D, maintenance, planification des tâches ou des ateliers,...) a été montré. Notamment, en ce qui concerne l'étude et l'optimisation des opérations d'A/D et de maintenance, l'apport de la RV vis-à-vis de la diversité des opérations et des composants, la considération d'un comportement physique de ces derniers, la possibilité de prendre en compte des facteurs humains au cours de la manipulation d'A/D, etc. ont été illustrés à travers des discussions et de nombreux exemples. Par ailleurs, une classification des méthodes de simulation des opérations d'A/D virtuel a été proposée.

Malgré des avantages évidents de l'utilisation de la RV dans le processus de développement de produit et notamment, lors des études d'opérations d'A/D, de maintenance, etc., les informations produites par un système de simulation de RV doivent être réalistes afin d'être vraiment exploitables dans l'analyse et l'optimisation d'une tâche donnée. Ainsi, la symbiose des fonctionnalités proposées par la RV et de la modélisation adéquate des phénomènes physiques à étudier pourrait porter ses fruits si l'application des outils de RV à l'analyse d'un produit et, en particulier, à son processus d'assemblage est envisagée. Nonobstant l'exploitation directe des modèles physiques dans un environnement de RV pour l'A/D et la maintenance, l'intégration de ces modèles soumis à des contraintes de simulation réaliste et temps réel ne sont pas évidentes.

Nous avons adapté un modèle mécanique continu de poutres flexibles soumises à des grands déplacements aux besoins de simulation des opérations d'A/D et de maintenance de pièces souples de type poutre dans un environnement de RV. Après de nombreux tests effectués au cours des travaux de cette thèse, nous avons montré le côté intéressant de ce modèle. En effet, ce modèle répond à deux contraintes principales de toute simulation virtuelle : le calcul rapide et réaliste de la déformation d'une pièce modélisée par une poutre flexible.

De plus, le modèle décrivant le comportement mécanique de pièces de type poutres flexibles est tout à fait utilisable pour les manipulations dans un environnement de RV à l'aide des interfaces actuelles de RV, i.e. les interfaces de contrôle en effort et en position. Par ailleurs, la généralisation de différents types de manipulations possibles en fonction de données d'entrée de nature géométrique ou mécanique fournies les interfaces de RV est effectuée. Ceci s'exprime par l'introduction de deux espaces associés : espaces des efforts et des configurations dans lesquels les informations fournies par un dispositif de RV donné sont prescrites. Ainsi, les CLs de nature géométrique (déplacements linéaires et angulaires) ou mécaniques (forces et moments), requises par le modèle mécanique mis en œuvre, sont définies dans un de ces espaces généralisés lors d'une manipulation d'A/D d'une pièce virtuelle flexible. La définition des CLs à imposer correspond à la description d'une trajectoire d'A/D dans l'espace des configurations ou d'un chemin de chargement dans l'espace des efforts.

Du côté de la mise en place numérique du modèle mécanique adapté, deux méthodes permettant de traiter le PL correspondant ont été employées : méthode générale de « tir » et méthode de collocation apparue récemment. La particularité de la première méthode est sa souplesse d'utilisation pour la manipulation de la poutre flexible dans les deux espaces associés. La méthode de collocation, adaptée pour la première fois aux calculs du comportement de poutres flexibles, ne peut être utilisée que lors de la manipulation virtuelle dans l'espace des efforts. Cependant, son avantage est sa rapidité par rapport à la méthode de tir. Ainsi, cette méthode a été intégrée dans un logiciel pour la manipulation de pièces virtuelles dans l'espace des efforts.

En outre, des tests de validation et des études de comportement numérique du modèle de poutres flexibles ont été également réalisés. Premièrement, une série de mesures expérimentales a été mise place et leurs résultats ont servi de référence pour la simulation numérique. Ainsi, à partir des études comparatives des données de référence et de celles fournies par le modèle mécanique, le modèle ainsi que les méthodes numériques utilisées ont été validés du point de vue du réalisme des résultats de simulation. En ce qui concerne la stabilité numérique du modèle, cet aspect est lié, d'une part, à la convergence et, d'autre part, au problème de l'existence de solutions multiples. Le problème de multiplicité de solutions, mis en évidence dans cette thèse, influe sur la convergence numérique et surtout sur la génération de résultats numériques mécaniquement adéquats mais physiquement différents éventuellement par rapport à ceux que produiraient réellement un être humain lorsqu'il s'agit de la manipulation dans l'espace des configurations. Nous avons proposé deux techniques afin d'éviter ce type de problème. La première consiste en l'approximation de la solution initiale par la méthode de gradient pour la méthode de tir, approximation qualitative et peu coûteuse en terme de temps de calcul. Une telle approximation a permis de guider la recherche d'une réponse mécanique réaliste dans l'espace des efforts, ce qui a été démontré par les études du comportement numérique du modèle ainsi que des comparaisons des résultats de référence avec ceux produits lors de la simulation numérique. La deuxième technique, basée sur la discrétisation de l'espace, propose une recherche temps réel d'une solution unique dans l'espace des efforts à partir de solutions pré-calculées et regroupées dans les deux espaces adimensionnés associés. Par ailleurs, cette technique permet d'effectuer une certaine optimisation en ce qui concerne la planification de trajectoires d'A/D avec la contrainte de minimisation des efforts requis.

Les études réalisées durant cette thèse ont donc permis de valider l'utilisation directe du modèle de poutres flexibles pour les manipulations de pièces souples 2D/3D dans l'espace des efforts. Concernant les manipulations de pièces souples dans l'espace des configurations, une telle utilisation directe n'est possible que pour les pièces 2D sur des PC conventionnels sans calculs parallèles. Par contre, le temps de réponse du système mécanique 3D lors des manipulations dans l'espace des configurations est assez important (à partir d'une seconde) vis-à-vis de la contrainte de temps réel (moins de 0,1 s). On peut bien évidemment noter le fait que le temps réel défini par les informaticiens pour les animations pré-calculées n'est pas tout à fait le même que ce dont on a besoin pour l'étude/analyse/optimisation des systèmes mécaniques comportant des pièces déformables soumises à des grands déplacements. En effet, lors d'une manipulation d'A/D de telles pièces, un temps opérateur plus important est requis pour le contrôle simultané de la déformation complexe de la pièce, des efforts associés, d'autres paramètres caractérisant l'opération d'A/D, pour l'analyse et la prise de décision, etc. Cependant, il est toujours intéressant du point de vue de la préservation de la fluidité des images de diminuer le temps de calcul. Ainsi, nous avons proposé une stratégie basée sur l'interaction/recalage possible de MTR, modèles mécaniquement simplifiés et fournissant une réponse

temps réel dans le cas de la simulation dans l'espace des configurations, et de MMI, modèles plus complexes, fournissant des informations complètes et réalistes concernant la déformation d'une pièce flexible. Dans le cas d'une telle interaction, le paramètre caractérisant le rapport des temps de calculs d'une forme déformée de la pièce produite par chacun des modèles MTR et MMI est un facteur important, déterminant la qualité d'affichage des résultats de simulation. Par exemple, avec l'utilisation d'un modèle « dual » comme MTR, ce facteur est de l'ordre de 10. Toutefois, d'autres tests sont encore nécessaires afin de pouvoir évaluer quantitativement ce type d'interaction MMI/MTR ou de recalage possible du MTR.

La validation du MMI de pièces de type poutres flexibles des points de vue réalisme et rapidité de modélisation de leur comportement physique n'entraîne pas l'exploitation directe de ce modèle, une fois le MMI intégré dans un environnement de simulation d'A/D virtuel. En effet, les CLs ne représentent qu'une partie des données d'entrée requises par le modèle mécanique. Pour la simulation réaliste complète de déformation de pièces flexibles dans le contexte d'A/D virtuel (sous réserve d'hypothèses sur lesquelles le MMI donné est basé), d'autres paramètres importants caractérisant la géométrie et le matériau constitutif interviennent. Notamment, en ce qui concerne les pièces modélisées par une poutre flexible, la spécification des paramètres comme la longueur et la section de la pièce, la géométrie initiale décrite par la courbure et/ou la torsion initiales, les modules d'élasticité du matériau et la loi de comportement parfois inconnus, la représentation géométrique de l'environnement extérieur de la pièce virtuelle sont nécessaires. Ainsi, l'élaboration d'une méthodologie pour la simulation des opérations d'A/D et de maintenance virtuelles de pièces déformables est indispensable.

Nous avons proposé dans cette thèse une méthodologie générale pour la simulation des opérations d'A/D de telles pièces, méthodologie qui contient des étapes importantes à suivre par le concepteur dès la phase de définition des objectifs de simulation d'A/D jusqu'à la phase d'analyse des résultats et l'optimisation du processus d'A/D dans le contexte de développement de produits. En particulier, les étapes importantes comme la caractérisation des propriétés d'un matériau, l'extraction des informations géométriques nécessaires depuis les modèles CAO, le problème de structuration et de préparation de données CAO, l'importance de l'identification des modèles mécaniques adaptés à utiliser lors de la simulation d'A/D virtuel, etc. sont mises en évidence au cours de travaux de cette thèse. Par ailleurs, une technique d'estimation expérimentale d'un module d'Young équivalent du matériau d'une pièce flexible subissant une modification importante de sa forme sous les charges de flexion, technique simple et peu onéreuse à mettre en place et qui tient compte des particularités des pièces flexibles soumises à des grands déplacements. Les tests numériques réalisés ont montré que les données produites par le MMI, basées sur une telle technique d'évaluation de module d'Young équivalent constant, sont cohérentes par rapport aux mesures effectuées physiquement sur un certain type de pièces souples (gaine flexible, tube plastique souple).

Le problème du choix des interfaces de contrôle de RV pour une simulation adéquate de pièces flexibles dans un environnement de RV a été également abordé dans la thèse. D'une part, ces interfaces jouent un rôle de « paramètres » à définir selon la méthodologie de simulation des opérations d'A/D proposée : le coût des interfaces, leur appropriation/adéquation aux objectifs et aux types de manipulations virtuelles, les données d'entrée/sortie fournies par ces interfaces, leurs caractéristiques constructives, etc. sont des éléments importants mis en jeu lors des premières phases d'étude des opérations d'A/D virtuel, i.e. les phases préliminaires avant toute simulation virtuelle. D'autre part, nous avons montré que la tendance actuelle à utiliser des interfaces motrices fournissant les informations géométriques en entrée, dans le domaine d'A/D virtuel, peut conduire à des difficultés non seulement au niveau de la simulation réaliste du comportement physique d'objets virtuels manipulés (notamment, la déformation réaliste de pièces flexibles compte tenu du problème de solutions multiples et de temps de réponse parfois excessive), mais aussi au niveau de la spécification de CLs appropriées et de la perception/analyse des résultats de la simulation virtuelle. Ce dernier aspect se résume à la nécessité de spécification de CLs mécaniques plutôt que géométriques, car un être humain génère physiquement des efforts dans un premier temps et les déplacements souvent imposés par les interfaces de capture de mouvement ne sont que fonction de ces efforts. De ce fait, il est nécessaire de favoriser le développement d'interfaces motrices haptiques, ce qui ouvre par conséquent de nouveaux horizons pour des recherches futures. Par ailleurs, les aspects importants liés à la modélisation correcte des CLs mécaniques à appliquer à la pièce virtuelle flexible, CLs modélisant

une (deux) main(s) de l'opérateur, les problèmes liés à la conception adéquate des métaphores d'interaction requises ont été mis en évidence. De plus, l'importance d'utiliser des dispositifs haptiques à 6 DDL a été montrée à travers d'évaluation des lois de variation des efforts décrites dans la partie expérimentale de la thèse. Naturellement, malgré le développement d'efforts privilégiés comme les forces de traction/compression et de flexion ainsi que les moments de flexion, tous les efforts doivent être appliqués ou ressentis (en cas de retour) pour une modélisation plus adéquate de la déformation ainsi que pour une perception/analyse plus correcte des résultats de modélisation.

Une partie importante de cette thèse a été consacrée aux études expérimentales physiques et numériques de pièces souples modélisées par une poutre flexible dans un contexte d'A/D virtuel. Notamment, les expériences physiques de simulation d'une opération d'assemblage ont été effectuées afin de pouvoir appréhender les caractéristiques d'une telle manipulation et de l'analyser de manière qualitative et quantitative. En même temps, un certain nombre de critères d'évaluation basés sur des paramètres caractéristiques des opérations d'A/D de pièces flexibles est proposé. Au cours de la simulation numérique de la même opération d'assemblage nous avons montré qu'il est possible d'évaluer des valeurs réalistes de ces paramètres si une telle simulation est basée sur la modélisation adéquate du comportement de pièces flexibles. Nous avons également illustré comment ces paramètres peuvent être utilisés dans l'évaluation qualitative/quantitative d'une opération d'assemblage donnée, et quelles sont les optimisations de l'opération d'A/D et les généralisations possibles en terme d'utilisation des résultats d'analyse dans l'étude d'opérations similaires. Ces derniers aspects sont importants car ils répondent à des certains besoins industriels relatifs à un problème général d'étude/optimisation des opérations d'A/D des systèmes mécaniques contenant des pièces flexibles : comment quantifier de manière adéquate la déformation de ces composants durant l'opération d'A/D virtuel, comment évaluer rapidement et correctement différents paramètres mis en jeu lors de telles manipulations, comment permettre d'extraire et d'exploiter efficacement une information réaliste issue de ces manipulations dans l'étude/optimisation du processus d'A/D. Par ailleurs, les études et les évaluations présentées dans ce présent mémoire ont été réalisées de telle manière que les principaux éléments de la méthodologie de simulation des opérations d'A/D virtuelles apparaissent et soient mis en évidence, notamment certains éléments relatifs à la phase préliminaire de simulation virtuelle d'une pièce déformable dans un contexte industriel. De ce fait, un certain nombre d'aspects évoqués dans la méthodologie proposée a été validé. De plus, ceci a permis de montrer le caractère à la fois général et applicatif de cette méthodologie à partir d'un cas d'étude précis.

Enfin, un outil logiciel F3P offrant aux concepteurs la possibilité d'étudier/analyser de manière adéquate et rapide une manipulation d'A/D donnée à partir de paramètres fournis par le MMI pour une poutre flexible partiellement montée a été développé. Par ailleurs, ce démonstrateur a permis de valider un certain nombre de concepts liés aux aspects numériques de mise en place du MMI, concepts proposés et étudiés dans la thèse. Le démonstrateur est de nature interactive, en ce qui concerne son fonctionnement, et tient compte de certains éléments de la méthodologie de simulation d'A/D de pièces flexibles. Il permet de considérer une certaine diversité d'opérations d'A/D (manipulation à une ou deux mains) ainsi que la nature de différentes données d'entrée générées par les interfaces de RV, etc. Afin de tester certaines capacités du MMI de poutres flexibles, un module logiciel concernant les manipulations 2D/3D dans les espaces des efforts/configuration a été intégré dans un environnement de RV Virtools dans le cadre d'un projet commun entre le laboratoire 3S de Grenoble et l'Institut d'Image/ENSAM à Chalon-sur-Saône. Ces derniers tests ont permis de valider en partie des questions d'intégrations des modèles physiques, d'élaborer un concept de dissociation des codes de différents MMI et des méthodes numériques particulières pour atteindre de meilleures performances en terme de temps de calcul, d'analyser la complexité du problème de conception d'un environnement de simulation des opérations d'A/D virtuel compte tenu de besoins industriels particuliers, d'étudier le problème de conception adéquate de métaphores d'interaction lorsque la contrainte de coût d'une interface motrice est un paramètre important.

Perspectives

Au terme des travaux de cette thèse, plusieurs prolongements se dessinent. Vu le contexte multidisciplinaire des travaux réalisés, différentes pistes de recherche sont possibles. Ci-dessus, nous ne résumons que les principales.

Premièrement, différents concepts proposés, étudiés, testés au cours de la thèse s'inscrivent dans le contexte industriel d'étude/optimisation des opérations d'A/D et de maintenance et, notamment, d'opérations d'A/D simulées et analysées virtuellement. Selon des besoins industriels généraux, de nombreuses observations et discussions avec les industriels, nous sommes tentés de proposer une méthodologie générale de simulation des opérations d'A/D virtuels de pièces déformables testée sur le cas des pièces de type poutres flexibles soumises à des grands déplacements, pièces souvent rencontrées dans la pratique industrielle. Des expériences effectuées représentaient une simulation/analyse d'une opération d'assemblage également assez courante. Il est clair qu'il est pratiquement très difficile de considérer tous les types de pièces déformables, notamment, les pièces flexibles soumises à des grands déplacements et/ou à des petites ou grandes déformations, tous les scénarios d'opérations d'A/D, de maintenance, etc. vu leurs diversité et complexité importantes. Cependant, il serait intéressant de tester la méthodologie proposée pour l'étude/évaluation d'une opération d'A/D ou de maintenance dont le scénario et les informations associées (modèle CAO, pièce réelle flexible ou son prototype,...) sont fournis par l'industriel. Cela permettrait de tenir compte d'autres contraintes industrielles, de compléter différents éléments de la méthodologie proposée et donc, de l'enrichir.

Au niveau de l'interfaçage et l'interaction entre les modèles physiques intégrés dans un environnement de RV et des dispositifs de contrôle en effort/position, il serait intéressant d'exploiter le MMI dans des conditions où l'interface motrice de contrôle en position est utilisée, i.e. l'interface haptique permettant de mesurer des efforts développés par l'opérateur et appliqués à cette interface. Cela permettrait de tester le comportement du MMI dans des conditions plus favorables pour la simulation mécanique (pas de problème de solutions multiples, temps de recherche d'une réponse dans l'espace des configurations est très intéressant) ainsi qu'évaluer la performance réelle du système de simulation en ce qui concerne le contrôle intuitif des résultats de simulation temps réel (contrôle de paramètres caractérisant les opérations d'A/D, contrôle de collisions, perception des informations diverses, etc.). En effet, le MMI a surtout été évalué lorsque la manipulation s'effectue dans l'espace des configurations, en suivant la tendance actuelle d'utilisation d'interfaces motrices de RV fournissant des informations géométriques. Cependant, nous avons montré qu'il est plus adéquat de mesurer et d'appliquer à un objet virtuel les efforts développés par l'opérateur plutôt que les déplacements. Ce fait inciterait par ailleurs des chercheurs à développer des dispositifs haptiques s'approchant plus de la réalité.

Par ailleurs, malgré la validation du MMI du point de vue du réalisme des résultats produits lors des manipulations dans les espaces des efforts/configurations, il serait intéressant de comparer les résultats au niveau des efforts requis générés par le MMI et les efforts réellement appliqués et mesurés à l'aide des capteurs de force 6 DDL indépendants ou disponibles sur des dispositifs haptiques (dispositif *Virtuose d'Haption*, par exemple) lors de la manipulation dans l'espace des configurations.

Concernant l'exploitation pratique du MMI considéré dans cette thèse, il est préférable de continuer à développer de nouvelles méthodes numériques, traitant le PL et performantes du point de vue du temps de calcul. Toutefois, il est nécessaire de tester/enrichir et d'exploiter plus avant les concepts proposés au cours de cette thèse et, notamment, le concept d'interaction de MMI/MTR ainsi que la technique de discrétisation de l'espace. Par ailleurs, une piste intéressante de calcul parallèle n'a pas été encore suivie et donc, reste à explorer.

Se pose un nouveau problème lorsque l'on simule le comportement mécanique d'une pièce flexible ne suivant plus la loi de Hooke. Dans cette thèse, nous avons proposé une approche permettant de prendre en compte la non-linéarité de la loi de comportement du matériau tout en restant dans le domaine de petites déformations. Une fois cette loi de comportement approximée linéairement par morceaux, il est possible d'appliquer de façon locale le MMI sous sa forme actuelle au problème de non-linéarité physique du matériau, en contrôlant par exemple l'état de contraintes dans la pièce flexible au cours de sa déformation, tout en préservant un temps de calcul faible. Toutefois, cette approche n'est testée que pour un seul matériau plastique et n'est encore pas intégrée dans le

démonstrateur F3P. Donc, il serait intéressant d'explorer cette piste. De même, le MMI considéré dans le présent mémoire est soumis à l'hypothèse de petites déformations. Ainsi, il serait intéressant de développer un modèle enrichi et même de proposer un nouveau modèle qui tiendrait compte du problème de grandes déformations dans la structure flexible.

Au niveau de la caractérisation des opérations d'A/D et notamment, d'opérations d'A/D de pièces déformables/flexibles compte tenu de leur diversité forte, il est souhaitable d'enrichir la liste des critères et des paramètres permettant l'évaluation plus complète de telles opérations. Cependant, il faut toujours tenir compte du problème d'évaluation réaliste et temps réel de ces paramètres.

En ce qui concerne la modélisation des CLs mécaniques, nous avons considéré dans la thèse principalement deux types d'efforts : efforts-suiveurs et efforts conservatifs. Il serait également intéressant d'étudier d'autres types de CLs mécaniques, notamment, les CLs représentant les actions mécaniques dues à un contact entre la pièce flexible manipulée et un obstacle rigide. Par ailleurs, ce type de contact provoquera une déformation supplémentaire de la forme de la pièce, ce qu'il faudrait étudier complémentirement. En outre, une étude plus précise de l'influence de l'orientation de la main de l'opérateur manipulant le composant flexible sur la modélisation plus adéquate des CLs mécaniques à appliquer, en particulier les efforts-suiveurs, est nécessaire. En effet, la position de l'opérateur dans l'espace de travail, sa manière de tenir et de manipuler une pièce flexible définissent la direction d'application des efforts suivants la trajectoire d'A/D. Ainsi, en se basant sur une technique de capture de mouvement par l'attachement des capteurs à la main et au corps de l'opérateur, il est possible de qualifier de manière plus adéquate la nature des efforts-suiveurs ainsi que d'identifier d'autres types d'efforts. De plus, il serait intéressant d'appliquer le MMI à l'A/D à deux mains avec la manipulation dans l'espace des efforts/configurations, manipulation basée sur l'utilisation de deux interfaces haptiques 6 DDL mesurant des efforts (voir une simulation d'A/D au sein du CEA, chapitre 1) ou de deux capteurs de mouvement 6 DDL (par exemple, le dispositif disponible à l'Institut Image). Une telle étude donnerait une nouvelle dimension en terme d'application potentielle du MMI à la simulation et à l'analyse d'une plus grande diversité d'opérations d'A/D.

Enfin, il serait aussi très intéressant d'effectuer des tests afin de pouvoir qualifier le facteur d'échelle requis pour une métaphore lorsque l'utilisation d'interfaces haptiques très onéreuses semble impossible. Une telle métaphore propose de remplacer les efforts à appliquer à une pièce virtuelle flexible par les déplacements réalisés à l'aide d'une interface motrice fournissant des informations de nature géométrique lors de la « manipulation » des efforts dans l'espace des efforts correspondant. Ainsi, l'évaluation qualitative/quantitative de cette métaphore est indispensable du point de vue de l'adéquation de la relation entre le déplacement de la main et l'effort déterminé à l'aide du facteur d'échelle, du point de vue de l'ergonomie et de la perception adéquate des informations de retour.

Annexe A

Exemple de simulation dans le démonstrateur F3P

Dans cette annexe, un exemple de simulations rapides d'une pièce souple 3D modélisée par une poutre flexible soumise à des grands déplacements dans l'espace des efforts, est présenté. Une simulation consiste en la modélisation du comportement mécanique d'une poutre flexible sous une charge donnée, i.e. la recherche rapide d'une réponse du système mécanique dans l'espace des configurations sans le calcul de la trajectoire d'A/D. La charge modélise une manipulation de la pièce flexible avec une main qui est appliquée à l'extrémité libre de cette pièce et qui suit la trajectoire d'A/D.

Une telle simulation s'effectue à partir du menu principal du démonstrateur F3P suivant les fonctions suivantes (Figure A.1) :

Fast Modeling* → *Force Space (one hand)* → *3D Manipulation

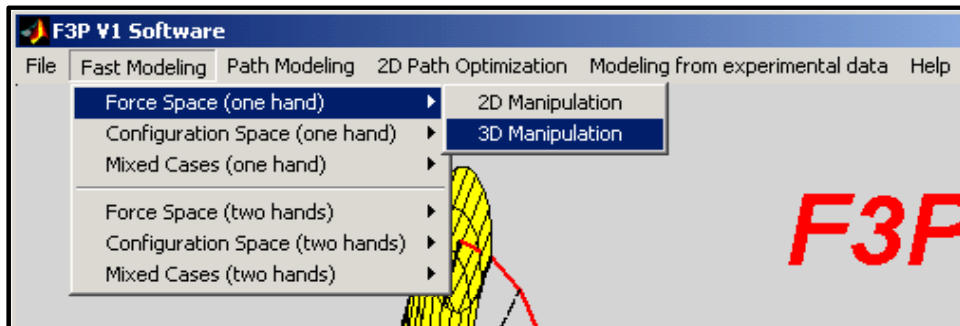


Figure A.1. Fonctions proposées par l'option *Fast Modeling*.

L'algorithme de calcul rapide de la réponse du système dans l'espace des configurations est le suivant (Figure A.2) :

① Définition des paramètres d'entrée pour la simulation du comportement mécanique basée sur le MMI de poutres flexibles :

- longueur de la pièce flexible L ,
- moments quadratiques de la section I (flexion) et I_t (torsion),
- torsion κ_1 et courbures κ_2, κ_3 initiales constantes,
- modules d'Young E et d'élasticité transversal G constants :

Definition of the part parameters

② Définition des CLs géométriques dans la zone d'encastrement de la pièce :

- les coordonnées $\mathbf{X} = [x, y, z]^T$,
- l'orientation de la section $\mathbf{\Theta} = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$:

Geometric boundary conditions in the fixation zone

- ③ Définition des CLs mécaniques dans l'espace des efforts-suiveurs (\mathbf{Q} , \mathbf{M}) :
- forces appliquées : $\mathbf{Q} = [Q_1, Q_2, Q_3]^T$,
 - moments appliqués : $\mathbf{M} = [M_1, M_2, M_3]^T$:

Boundary conditions in the force space ($Q_1, Q_2, Q_3, M_1, M_2, M_3$)

- ④ Définition d'un nombre de points sur l'axe de la poutre flexible auxquels les valeurs de la déformée ainsi que des efforts internes seront estimées et affichées :

Definition of the point number on the beam axial line

- ⑤ Affichage automatique des résultats de simulation sous forme graphique. Les graphes présentent :
- les formes initiale et déformée de l'axe de la poutre flexible 3D ainsi que toutes les projections de la forme déformée sur les trois plans de l'espace 3D afin de simplifier la compréhension et l'analyse des résultats de simulation,
 - les composantes du torseur d'efforts internes dans la pièce déformée en fonction de l'abscisse curviligne $s \in [0, L]^T$.

Il est également possible d'afficher la représentation surfacique 3D de la pièce flexible par la reconstruction de la forme 3D de celle-ci à partir de la géométrie de la ligne moyenne déformée.

- ⑥ Affichage automatique des résultats de calcul sous forme textuelle dans la fenêtre de messages DOS. Les résultats de simulation peuvent être enregistrés sur le disque dur de l'ordinateur dans un fichier de type texte.

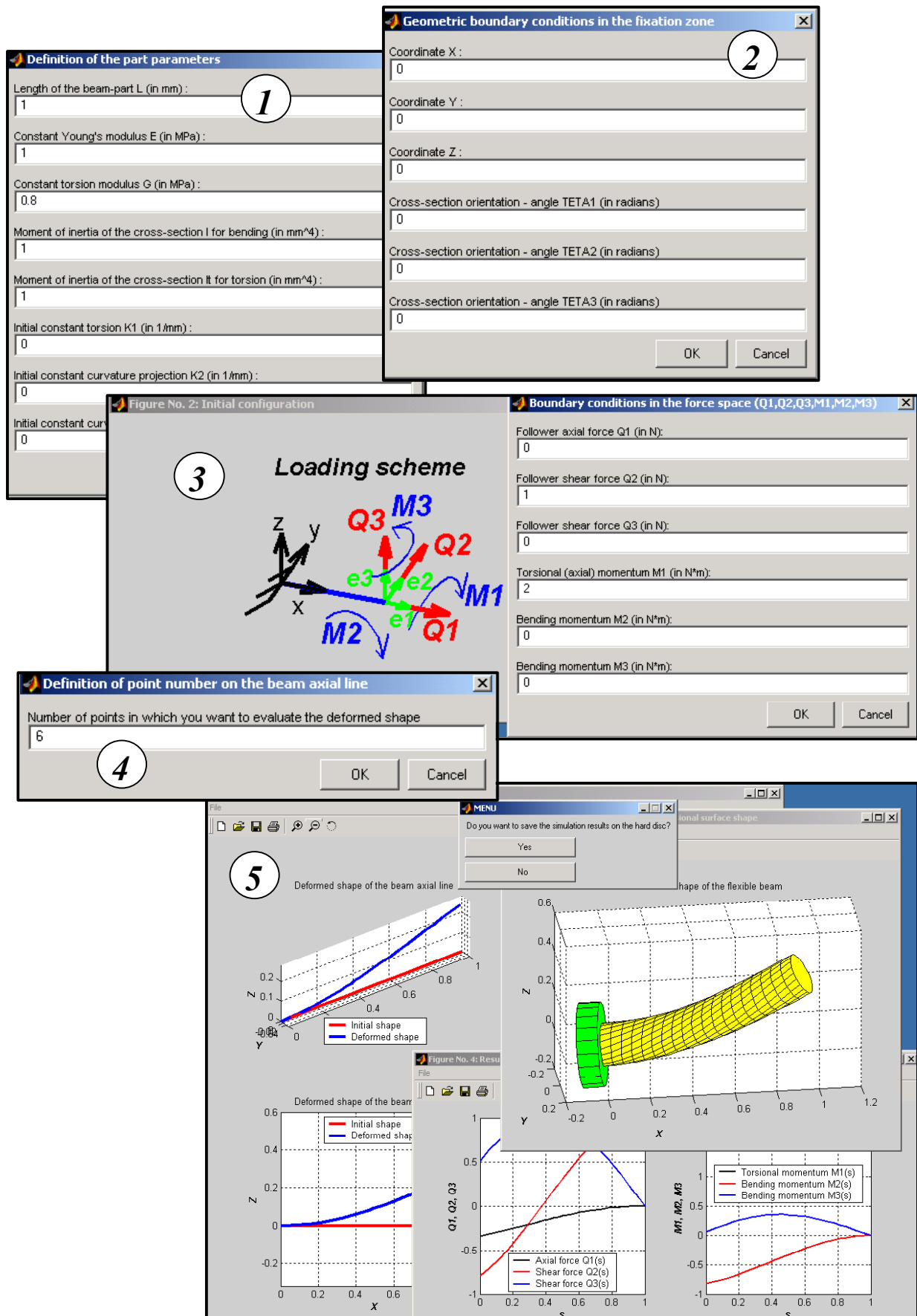


Figure A.2. Exemple de simulation rapide de la déformation d'une poutre flexible 3D soumise à des CLs mécaniques dans le démonstrateur F3P.

Bibliographie

[Adams 1999] R. J. Adams, « Stable Haptic Interaction with Virtual Environments », Ph.D. Thesis, University of Washington, Department of Electrical Engineering, Washington, USA, 1999.

[Allen 1987] D. K. Allen, « Processing alternatives for cost reduction », *Annals of the CIRP*, vol. 41/2/, 1992.

[Allenby & al.1994] B. R. Allenby, D. J. Richards, « The Greening of Industrial Ecosystems », National Academy Press, Washington, USA, 1994.

[Amundarain & al. 2002] A. Amundarain, D. Borro, A. Garcia-Alonso, J. J. Gil, L. Matey Munoz, J. Savall, « Virtual Reality for aircraft engines maintainability », *Proc. of International Conference Virtual Concept 2002*, Biarritz, France, pp. 60-65, October 2002.

[Amundarain & al. 2003] A. Amundarain, D. Borro, A. Garcia-Alonso, J. Gil, L. Matey, J. Savall, « Virtual Reality for Aircraft Engines Maintainability », *Proc. of International Conference Virtual Concept 2003*, Biarritz, France, pp. 60-65, November 2003.

[Anshelevich & al. 2000] E. Anshelevich, S. Owens, F. Lamiroux, L. E. Kavraki, « Deformable Volumes in Path Planning Applications », *Proc. of IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, 2000.

[Antman 1995] S. S. Antman, « Non-linear Problems of Elasticity », Eds. Springer, Berlin, 1995.

[Aoussat & al./1 1998] A. Aoussat, M. Le Coq, « Méthodes globales de conception de produits », Chapitre 2 en « Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils » sous la direction de M. Tollenaere, Edition HERMES, Paris, 1998.

[Aoussat & al./2 1998] A. Aoussat, M. Le Coq, « DFA : contraintes d'assemblage », Chapitre 8 en « Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils » sous la direction de M. Tollenaere, Edition HERMES, Paris, 1998.

[Armstrong & al. 2002] C. G. Armstrong, D. J. Monaghan, M. A. Price, H. Ou, J. Lamont, « Integrating CAE Concepts with CAD Geometry », *Engineering Computational Technology*, Saxe-Coburg Publications, pp. 75-104, 2002.

[Arnaldi 1988] B. Arnaldi, « Conception du noyau d'un système d'animation de scènes tridimensionnelles intégrant les lois de la mécanique », Thèse de doctorat, Université Rennes 1, Rennes, France, 1988.

[Ascher & al. 1995] U. M. Ascher, R. M. M. Mattheij, R. D. Russell, « Numerical Solution of Boundary Value Problems for Ordinary Differential Equations », Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, USA, 1995.

[Baxter & al. 2002] W. V. Baxter, A. Sud, N. K. Govindaraju, D. Manocha, « GigaWalk: Interactive Walkthrough of Complex Environments », *Eurographics Workshop on Rendering*, 2002.

- [Beitz & al. 1994] W. Beitz, K. H. Kuttner, « Handbook of Mechanical Engineering », Springer-Verlag Eds., Berlin, 1994.
- [BDI 1995] Boothroyd Dewhurst Inc., « Design for Manufacture and Assembly Software. User Guide: Assembly », Version 2, 1995.
- [Blanchard & al. 1995] B. S. Blanchard, D. Verma, E. L. Peterson, « Maintainability: A Key to Effective Serviceability and Maintenance Management », Published by John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [Blanco 1998] E. Blanco, « L'émergence du produit dans la conception distribuée », Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, France, 1998.
- [Blondaz 1999] L. Blondaz, « Prise en compte de la fabricabilité en conception intégrée de produits mécaniques », Thèse de doctorat, Université Grenoble 1, Grenoble, France, 1999.
- [Boothroyd & al. 1992] G. Boothroyd, L. Alting, « Design for assembly and disassembly », Annals of the CIRP, vol. 41/2/, 1992.
- [Boothroyd & al. 1983] G. Boothroyd, P. Dewhurst, « Design for Assembly », A designer's handbook, Department of mechanical engineering, University of Massachusetts, Amherst, Massachusetts, 1983.
- [Bouatouch & al. 1996] K. Bouatouch, P. Guitton, B. Péroche, F. Sillion « Simulation de la lumière en synthèse d'images : aspects algorithmiques », TSI, 14(10), 1996.
- [Boyer 1997] R. Boyer, « L'usine Boeing d'Everett », La Lettre du GERPISA, 113, Université d'Évry Val d'Essonne, 1997.
- [Brissaud & al. 1996] D. Brissaud, O. Garro, « An Approach to Concurrent Engineering Using Distributed Design Methodology », J. Concurrent Engineering: Research and Applications, vol. 4, 1996.
- [Brissaud & al. 1998] D. Brissaud, O. Garro, « Conception distribuée, émergence », Chapitre 4 en « Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils » sous la direction de M. Tollenaere, Edition HERMES, Paris, 1998.
- [Bro-Nielsen & al. 1996] M. Bro-Nielsen, S. Cotin, « Real-time volumetric deformable models for surgery simulation using finite elements and condensation », Proc. of Eurographics'96, pp. 21-30, 1996.
- [Burdea 1996] G. C. Burdea, « Force and Touch Feedback for Virtual Reality », Eds. John Wiley and Sons, New York, USA, 1996.
- [Burdea 1999] G. C. Burdea, « Haptic feedback for virtual reality », Proc. Int. Workshop on Virtual Prototyping, Laval, France, pp. 87-96, May 1999.
- [Burdea 2000] G. C. Burdea, « Keynote Address: The Challenge of Large-Volume Haptics », Proc. of Int. Conference VRIC'2000, Laval, France, pp. 101-111, 2000.
- [Burkhardt & al. 1999] J.-M. Burkhardt, D. Lourdeaux, P. Fuchs, « Conception d'un système de RV pour la formation des agents de conduites aux opérations en milieu ferroviaire », A. Grumbach et N. Richard Eds., Journées Réalité Virtuelle et Cognition, ENST, Paris, pp. 123-132, 1999.

- [Buttolo & al. 1995] P. Buttolo, B. Hannaford, « Pen-Based Force Display for Precision Manipulation in Virtual Environment », Proc. of IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, North Carolina, USA, pp. 217-224, 1995.
- [Buttolo & al. 2002] P. Buttolo, P. Stewart, A. Marsan, « A Haptic Hybrid Controller for Virtual Prototyping of Vehicle Mechanisms », Proc. of IEEE Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems HAPTICS'02, Orlando, USA, pp. 249-254, 2002.
- [Cambridge 1992] Textbook « Numerical Recipes in C : The Art of Scientific Computing », ISBN 0-521-43108-5, Cambridge University Press, 1992, http://www.ulib.org/webRoot/Books/Numerical_Recipes/bookcpdf/
- [Carrillo & al. 2003] A. R. Carrillo, O. Beloki, S. Casado, T. Gutiérrez, J. I. Barbero, «Virtual Assembly and Disassembly Simulation on a Distributed Environment», Proc. of International Conference Virtual Concept 2003, Biarritz, France, pp. 50-55, November 2003.
- [Cash 1988] J. R. Cash, « On the numerical integration of nonlinear two-point boundary value problems using iterated deferred corrections, Part 2: The development and analysis of highly stable deferred correction formula », SIAM J. Numer. Anal., 25, pp. 862-882, 1988.
- [Casiez & al./1 2003] G. Casiez, P. Plénacoste, C. Chaillou, B. Semail, « The digihaptic, a new three degrees of freedom multi-finger haptic device », Proc. of Int. Conference VRIC'03, France, pp. 35-39, 2003.
- [Casiez & al./2 2003] G. Casiez, P. Meseure, « Interface Homme-Machine. Le retour haptique », Université des Sciences et Technologies de Lille 1, Lille, France, 2003.
- [Chablat & al. 2002] D. Chablat, F. Bennis, B. Hoessler, M. Guilbert, « Périphériques haptiques et simulation d'objets, de robots et de mannequins dans un environnement de CAO-Robotique : eM-Virtual Desktop », Proc. of International Conference Virtual Concept 2002, Biarritz, France, pp. 51-56, October 2002.
- [Chadwick & al. 1989] J. E. Chadwick, D. R. Haumann, R. E. Parent, « Layered construction for deformable animated characters », Computer Graphics, 23(3), pp. 243-252, 1989.
- [Chandrana 1997] H. Chandrana, « Assembly Path Planning Using Virtual Reality Techniques », MS thesis, School of Mechanical and Materials Engineering, Washington State University, 1997.
- [Chedmail & al. 1998] P. Chedmail, E. Dombre, P. Wenger, « La CAO en robotique : outils et méthodologie », Eds. Hermès, Paris, France, 1998.
- [Chedmail & al. 1999] P. Chedmail, C. Le Roy, « A Distributed Approach for Accessibility and Maintainability Check with a Manikin », Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conferences DETC'99, Las Vegas, Nevada, USA, DAC-8677, September 1999.
- [Chedmail & al. 2001] P. Chedmail, B. Maille, E. Ramstein, « Etat de l'art sur l'accessibilité en réalité virtuelle, application à l'étude de l'ergonomie », Conférence PRIMECA 2001, La Plagne, France, Avril 2001.
- [Chipperfield & al. 2002] K. Chipperfield, J. M. Vance, « Modeling of Hydraulic Hose Path », Proc. of ASME DETC'02 Design Automation Conference, Montreal, Canada, DETC2002-DAC34152, 2002.
- [Ciarlet 1985] Ciarlet, « Elasticité Tridimensionnelle », Masson Eds., 1985.

- [Clarte 2003] Site Internet <http://www.clarte.asso.fr>
- [Clautrier 1991] M. Clautrier, « Difficultés de nouvelles approches de conception dans le spatial », Séminaire GSIP La conduite de projet pour méthodes et outils, Grenoble, 1991.
- [Clover & al. 1997] C. L. Clover, G. R. Luecke, J. J. Troy, W. A. McNeely, « Dynamic Simulation of Virtual Mechanisms with Haptic Feedback using Industrial Robotics Equipment », Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Albuquerque, USA, 1997.
- [Collet & al. 2002] M. Collet, F. Philippe, M. Chevaldonné, D. Rigaudière, F. Mérienne, F. Guillaume, N. Chevassus, « Manipulation intuitive d'objets virtuels à l'aide d'une interface à deux mains », International Conference Virtual Concept 2002, Biarritz, France, pp. 13-19, October 2002.
- [Concept 3D 2004] Site Internet <http://www.concept3d.ch/4606.html>
- [Convvard & al. 2003] T. Convvard, P. Bourdot, « A Multimodal Approach for Computer Aided Design in Immersive Environments », Proc. of International Conference Virtual Concept 2003, Biarritz, France, pp. 6-12, November 2003.
- [Cozot 1996] R. Cozot, « Environnement de simulation des systèmes physiques », Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, Rennes, France, 1996.
- [Craig 1981] R. R. Craig, « Structural Dynamics », John Wiley & Sons Eds., 1981.
- [Dartus 1995] D. Dartus, « Elasticité linéaire », Cepadues Eds., 1995.
- [Debunne 2000] G. Debunne, « Animation multirésolution d'objets déformables en temps-réel, Application à la simulation chirurgicale », Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, France, 2000.
- [Defaux 1989] M. Defaux, « Conception des produits : simplifiez l'assemblage », TECHNOLOGIES, 61, 1989.
- [Delbressine 1989] F. L. Delbressine, « On the integration of design and manufacture », Ph.D. thesis, University of Technology Eindhoven, 1989.
- [Deussen & al. 1995] O. Deussen, L. Kobbelt, P. Tucke, « Using simulated annealing to obtain good nodal approximations of deformable objects », Proc. of the 6th Eurographics Workshop on Animation and Simulation, Springer-Verlag Eds., pp. 30-43, 1995.
- [Dewar & al. 1997] R. G. Dewar, I. D. Carpenter, J. M. Ritchie, J. E. Simmons, « Assembly planning in a Virtual Environment », Proceedings of PICMET, Portland, 1997.
- [Dill 1992] E. H. Dill, « Kirchoff's theory of rods », Arch. Hist. Exact Sci., 44 (1), pp. 1-23, 1992.
- [Dini & al. 1999] G. Dini, F. Failli, B. Lazzerini, F. Marcelloni, « Generation of optimized assembly sequences using genetic algorithms », Annals of the CIRP, vol. 48/1/, 1999.
- [Drieux & al./1 2003] G. Drieux, J.-C. Léon, F. Guillaume, N. Chevassus, « Tools and criteria for data transfer CAD to VR environments », Proc. of International Conference Virtual Concept 2003, Biarritz, France, pp. 296-303, November 2003.
- [Drieux & al./2 2003] G. Drieux, J.-C. Léon, L. Fine, « Shell or Plate Idealization on a Polyhedral Model for Finite Element Analyses », Proc. of ASME DETC'03 Computers and Information in Engineering Conference, Chicago, Illinois, USA, DETC2003/CIE-48208, September 2003.

- [Dumont 1990] G. Dumont, « Animation de scènes tridimensionnelles : la mécanique des solides comme modèle de synthèse du mouvement », Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, Rennes, France, 1990.
- [Eck & al. 1995] M. Eck, T. De Rose, T. Duchamp, H. Hoppe, M. Lounsbery, W. Stuetzle, « Multiresolution Analysis of Arbitrary Meshes », Proc. of Int. Conf. SIGGRAPH'95, 1995.
- [Ellis & al. 1996] R. E. Ellis, O. M. Ismaeil, M. G. Lipsett, « Design and Evaluation of a High-Performance Haptic Interface », Int. Journal Robotica, 14, pp. 321-327, 1996.
- [Enright & al. 1993] W. H. Enright, P. H. Muir, « A Runge-Kutta type boundary value ODE solver with defect control », Tech. Rep. 267/93, University of Toronto, Dept. of Computer Science, Toronto, Canada, 1993.
- [ESI Group 2003] Site Internet http://www.esi-group.com/Members/mmi/SYSWELD2003_fr
- [Fabricius 1994] F. Fabricius, « Design For Manufacture : a case study », Revue d'automatique et de productique appliqués, 7(1), pp. 95-98, 1994.
- [Fanchon 2001] J.-L. Fanchon, « Guide des sciences et technologies industrielles », AFNOR, Eds. Nathan, 2001.
- [Feng 1995] C. Feng, « Constraint-based. Design of part », J. Computer Aided Design, 27, 1995.
- [Filonenko-Boroditch & al. 1955] M. M. Filonenko-Boroditch, C. M. Izumov, B. A. Olisov, I. N. Koudrayvtcev, L. I. Malguinov, « Cours de résistance des matériaux », Partie 1, sous la direction générale de M. M. Filonenko-Boroditch, Eds. de littérature technico-théorique, Moscou, 1955, (en russe).
- [Filonenko-Boroditch & al. 1956] M. M. Filonenko-Boroditch, C. M. Izumov, B. A. Olisov, I. N. Koudrayvtcev, L. I. Malguinov, « Cours de résistance des matériaux », Partie 2, sous la direction générale de M. M. Filonenko-Boroditch, Eds. de littérature technico-théorique, Moscou, 1956, (en russe).
- [Fine 2001] L. Fine, « Processus et méthodes d'adaptation et d'idéalisation de modèles dédiés à l'analyse de structures mécaniques », Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, France, 2001.
- [Fine & al. 2002] L. Fine, J.-C. Léon, G. P. Bonneau, A. Gérussi, « Control Parameters for the Analysis and Visualization of FE Results into a Collaborative Engineering Environment », Conférence Internationale WCCM V, Vienne, Autriche, Juillet 2002.
- [Florez 1989] J. Florez, « Elasticité couplée à l'endommagement : Formulation, analyse théorique et approximation numérique », Thèse de doctorat, Université Paris 6, Paris, France, 1989.
- [Fuchs & al. 2001] P. Fuchs, G. Moreau, J.-P. Papin, « Le traité de la réalité virtuelle », sous direction de P. Fuchs, Volumes 1 et 2, Edition les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, Paris, 2001.
- [Gilchrist & al. 1999] A. C. Gilchrist, J. C. Suhling, T. J. Urbanik, « Nonlinear finite element modeling of corrugated board », ASME Joint Applied Mechanicals and Materials Division Meeting, AMD-Vol. 231/MD-Vol. 85, New York, USA, pp. 101-106, June 1999.
- [Goldstein 1950] H. Goldstein, « Classical Mechanics », Eds. Addison-Wesley, Reading, MA, 1950.

- [Gomes & al. 1998] A. Gomes de Sa, G. Zachmann, « Integrating Virtual Reality for Virtual Prototyping », Proc. of ASME Design Engineering Technical Conference DETC'98, Atlanta, USA, September 1998.
- [Gourret & al. 1989] J.-P. Gourret, N. Magnenat-Thalmann, D. Thalmann, « Simulation of object and human skin deformation in a grasping task », Proc. of SIGGRAPH'89, Boston, USA, pp. 21-30, July 1989.
- [Gu & al. 2001] H. Gu, T. R. Chase, D. C. Cheney, T. Bailey, D. Johnson, « Identifying, Correcting and Avoiding Errors in Computer-Aided Design Models with Affect Interoperability », Transactions of the ASME, 1, pp. 156-166, 2001.
- [Guillet 1999] S. Guillet, « Modification et construction de formes gauches soumises à des contraintes de conception », Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, France, 1999.
- [Guillet & al. 2000] S. Guillet, J.-C. Léon, « Deformation criteria for the direct manipulation of free form surfaces », dans « Curves and Surfaces », Editions L. L. Schumaker, 2000.
- [Gupta 1985] S. Gupta, « An adaptive boundary value Runge-Kutta solver for first order boundary value problems », SIAM J. Numer. Anal., 22, pp. 114-126, 1985.
- [Hanke & al. 1985] M. Hanke, R. Lamour, R. Winkler, « Program system "RWA" for the solution of two-point boundary value problems - foundations, algorithms, comparisons », Seminarbericht nr. 67, Sektion Mathematik der Humboldt-Universit. at zu Berlin, Berlin, Germany, 1985.
- [Haption 2003] Site Internet <http://www.haption.com>
- [Hergenrother & al. 2000] E. Hergenrother, P. Dahne, « Real-time virtual cables based on kinematic simulation », Proc. of the WSCG 2000, 2000.
- [Hergenrother & al. 2001] E. Hergenrother, C. Knopfle, « Cable Installation in Virtual Environments », Proc. of IASTED Conference Modelling and Simulation, Anaheim, USA, pp. 276-280, 2001.
- [Hoogen & al. 2002] J. Hoogen, R. Rieners, G. Schmidt, « Control aspects of a robotic haptic display for kinesthetic knee joint simulation », IFAC Journal on Control Engineering Practice, 10(11), pp. 1301-1308, 2002.
- [Hoppe 1996] H. Hoppe, « Progressive Meshes », Computer Graphics, Annual Conference Series, 30, pp. 99-108, 1996.
- [Hsu & al. 1999] D. Hsu, L. Kavraki, J.-C. Latombe, R. Motwani, « Capturing the connectivity of high-dimensional geometric spaces by parallelizable random sampling techniques » dans « Advances in randomized parallel computing », P. M. Pardalos and S. Rajasekaran Editions, Combinatorial Optimization Series, Kluwer Academic Publishers, Boston, pp. 159-182, 1999.
- [Hughes 1987] T. J. R. Hughes, « The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis », Prentice-Hall Eds., 1987.
- [Hutchinson & al. 1996] D. Hutchinson, M. Preston, T. Hewitt, « Adaptive refinement for mass/spring simulations », Proc. of the Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation, pp. 31-45, Poitiers, France, 1996.
- [Immersion 2003] Site Internet <http://www.immersion.fr>
- [Innsport 2003] Site Internet <http://www.innsport.com/optotrak.html>

- [IPD 1994] Institute for Product Development, « Design For Manufacture Approach: Guide for improving the manufacturability of industrial product », Eureka, Denmark, 1994.
- [I3D 2002] Interaction 3D, Rapport d'activité de l'équipe i3D, Thème 3A, INRIA, Rocquencourt, France, 2002.
- [James & al. 1999] D. James, D. Pai, « ArtDefo – accurate real time deformable objects », Proc. of SIGGRAPH'99, Los Angeles, USA, pp. 65-72, August 1999.
- [Jayaram & al. 1997] S. Jayaram, H. Connacher, K. Lyons, « Virtual Assembly using Virtual Reality Techniques », J. Computer Aided Design, 29(8), 1997.
- [Jayaram & al. 1999] S. Jayaram, Y. Wang, U. Jayaram, K. Lyons, P. Hart, « A Virtual Assembly Design Environment », IEEE Computer Graphics and Applications, 19(6), 1999, Site Internet <http://www.computer.org/cga/cg1999/g6044xabs.htm>
- [Jo & al. 1993] H. H. Jo, H. R. Parsaei, W. G. Sullivan, « Principles of concurrent engineering », Extract of Concurrent Engineering: Contemporary issues and modern design tools, Edited by H. R. Parsaei and W. G. Sullivan, Chapman & Hall, 1993.
- [Karhu & al. 1995] O. Karhu, P. Kansu, I. Kuorinka, « Correcting Working Postures in Industry: a Practical Method for Analysis », J. Applied Ergonomics, 8, pp. 199-201, 1995.
- [Kavraki & al. 1996] L. Kavraki, P. Svestka, J.-C. Latombe, M. H. Overmars, « Probabilistic roadmap for path planning in high-dimensional configuration spaces », IEEE Trans. on Robotics and Automation, 12(4), pp. 566-580, 1996.
- [Kavraki & al. 1998] L. E. Kavraki, F. Lamiroux, C. Holleman, « Towards Planning for Elastic Objects », Robotics: The Algorithmic Perspective, P. Agarwal, L. E. Kavraki, M. Mason Editors, AK Peters, Natick, MA, pp. 313-326, 1998.
- [Keller 1992] H. Keller, « Numerical Methods for Two-Point Boundary-Value Problems », Eds. Dover, New York, USA, 1992.
- [Khatib & al. 2002] O. Khatib et al., « Efficient Algorithms for Robots with Human-Like Structures and Interactive Haptic Simulation », Proc. of Advances in Robot Kinematics, pp. 89-98, 2002.
- [Kierzenka 1998] J. Kierzenka, « Studies in the Numerical Solution of Ordinary Differential Equations », Thèse de doctorat, Southern Methodist University, Dallas, USA, 1998.
- [Kierzenka 2000] J. Kierzenka, L. F. Shampine, « A BVP Solver based on Residual Control and the Matlab PSE », Proc. ACM, Publications Dept. ACM Inc., New York, USA, 2000.
- [Kuehne & al. 1995] R. P. Kuehne, J. Oliver, « A Virtual Environment for Interactive Assembly Planning and Evaluation », Proc. of ASME DETC'95 Design and Automation Conference, Boston, USA, DETC'95/DAC, 1995.
- [Ladeveze 1996] P. Ladeveze, « Mécanique non linéaire des structures », Eds. HERMES, 1996.
- [Lallemant & al. 1994] J.-P. Lallemant, S. Zeghloul, « Robotique. Aspects fondamentaux : Modélisation mécanique, CAO robotique, Commande », Editions MASSON, Paris, 1994.
- [Lamiroux & al. 1999] F. Lamiroux, L. E. Kavraki, « Path Planning for Elastic Plates under Manipulation Constraints », Proc. of IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, Detroit, MI, USA, 1999.

- [Landau & al. 1959] L. D. Landau, E. M. Lifshitz, « Theory of Elasticity », Eds. Pergamon Press, New York, 1959.
- [Landau & al. 1970] L. D. Landau, E. M. Lifshitz, « Theory of Elasticity », Eds. Pergamon Press, New York, 1970.
- [Laroze 1988] S. Laroze, « Mécanique des structures », Tome 2 Poutres, Eds. Eyrolles Masson, Paris, 1988.
- [Lécuyer & al. 2003] A. Lécuyer, C. Andriot, A. Crosnier, « Interfaces Haptiques et Pseudo-Haptiques », Proc. of JNRR'03 4^{ème} Journées Nationales de la Recherche en Robotique, 2003.
- [Legardeur 1998] J. Legardeur, « Prise en compte des contraintes d'assemblage dans une logique de conception intégrée : l'approche Design For Assembly », Mémoire de DEA, INPG, Grenoble, France, 1998.
- [Léon 1991] J.-C. Léon, « Modélisation et construction de surfaces pour la CFAO », Eds. Hermès, Paris, 1991.
- [Léon & al. 1999] J.-C. Léon., U. Gangiaga, « Setting up models for flexible parts simulation into a virtual reality environment, Task 4.2 Virtual reality environment and interaction », Research Report Brite Euram Project BRPR-CT97-0449, Grenoble, France, 1999.
- [Léon & al. 2001] J.-C. Léon, U. Gangiaga, D. Dupont, « Modelling Flexible Parts for Virtual Reality Assembly Simulations which Interact with Their Environment », IEEE International Conference on Shape Modeling, Genova, Italy, pp. 335-344, 2001.
- [Le Roy 1999] C. Le Roy, « Accessibilité et aptitude au montage : Réalité virtuelle et approche multi-agent », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, Nantes, France, 1999.
- [Linde & al. 2003] R. Q. van der Linde, P. Lammertse, « HapticMaster – a generic force controlled robot for human interaction », Int. Journal on Industrial Robot, 30(6), pp. 515–524, 2003.
- [LIST CEA 2003] Site Internet <http://www.cea-technologies.com/ceahtml/infocom/>
- [LNP 1992] LNP Engineering Plastics, « Design with Engineering Plastics », Bulletin of the LNP Engineering Plastics Inc., 1992. Site Internet: http://www.lnp.com/LNP/Markets/PDF/Eng_Plastics_Final.pdf
- [Logicad 2003] Site Internet <http://www.logicad3d.com>
- [Logitech 2003] Site Internet <http://www.logitech.com>
- [Loock & al. 2001] A. Loock, E. Schomer, « A Virtual Environment for Interactive Assembly Simulation: From Rigid Bodies to Deformable Cables », Proc. of Conference SCI 2001, Orlando, USA, 2001.
- [Lorensen & al. 1987] W. E. Lorensen, H. E. Cline, « Marching cubes : a high resolution 3D surface construction algorithm », Proc. of SIGGRAPH'87, Computer Graphics, 21(4), Anaheim, California, USA, pp. 163-169, 1987.
- [Louchet & al. 1995] J. Louchet, X. Provot, D. Crochemore, « Evolutionary identification of cloth animation models », Proc. of the 6th Eurographics Workshop on Animation and Simulation, Springer-Verlag Eds., pp. 44-54, 1995.

[Love 1944] A. E. H. Love, « A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity », Eds. Dover, New York, 1944.

[Lovinfosse & al. 2002] D. Lovinfosse, L. Fine, J-C. Léon, X. Rogovitz, T. Truong-Trung, « A collaborative tool for the visualisation of scientific simulation results », International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering IDMMME'02, Clermont-Ferrand, France, May 2002.

[Luciani 1985] A. Luciani, « Un outil informatique de création d'images animées », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France, 1985.

[Massie & al. 1994] T. H. Massie, J. K. Salisbury, « The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects », Proc. ASME Winter Annual Meeting Dynamic Systems and Control Division, Chicago, USA, Vol. 55, pp. 295-301, 1994.

[Mathworks 2002] Site Internet <http://www.mathworks.com>

[Meade & al. 1998] D. B. Meade, B. S. Haran, R. E. White, « The Shooting Technique for the Solution of Two-Point Boundary Value Problems », University of South Carolina, SC 29208, USA, 1998.

[Mencl & al. 1998] R. Mencl, H. Muller, « Interpolation and approximation of surfaces from three-dimensional scattered data points », Eurographics State of The Art Report, Lisbonne, Portugal, 1998.

[Mer 1998] S. Mer, « Les mondes et outils de la conception. Pour une approche socio-technique de la conception de produit », Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, France, 1998.

[MGIT 1998] Groupe de travail du Pôle Productique Rhône-Alpes (sous la direction de J.-C. Léon), « Multi-views and multi-representations design framework applied to a preliminary design phase », International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering IDMMME'98, Compiègne, France, May 1998.

[Mikchevitch 2000] A. Mikchevitch, « Génération de trajectoires d'assemblage et de désassemblage de composants », Mémoire de DEA, Université Grenoble 1, Grenoble, France, 2000.

[Mikchevitch & al. 2001] A. Mikchevitch, N. Rejneri, J.-C. Léon, G. Débarbouillé, « Un processus de génération de trajectoires pour la simulation du processus d'assemblage », Conférence PRIMECA 2001, La Plagne, France, Avril 2001.

[Mikchevitch & al. 2002] A. Mikchevitch, J.-C. Léon, A. Gousskov, « A Proposal of Simulation Environment for Assembly Operations involving Flexible Parts », International Conference Virtual Concept 2002, Biarritz, France, pp. 104-109, October 2002.

[Mikchevitch & al./1 2003] A. Mikchevitch, J.-C. Léon, A. Gousskov, « Numerical Modeling of Flexible Components for Assembly Path Planning using a Virtual Reality », Proc. of ASME DETC'03 Computers and Information in Engineering Conference, Chicago, Illinois, USA, DETC2003/CIE-48293, September 2003.

[Mikchevitch & al./2 2003] A. Mikchevitch, J.-C. Léon, A. Gousskov, « Realistic force simulation in path planning for virtual assembly of flexible beam parts », International Conference Virtual Concept 2003, Biarritz, France, pp. 179-186, November 2003.

[Mikchevitch & al./3 2003] A. Mikchevitch, J.-C. Léon, A. Gousskov, « Planification de trajectoires de composants flexibles pour la simulation rapide du processus d'assemblage/ désassemblage dans un environnement de réalité virtuelle », Conférence PRIMECA 2003, La Plagne, France, 2003.

[Mikchevitch & al./1 2004] A. Mikchevitch, J.-C. Léon, A. Gousskov, « A Simulation Environment for Assembly Operations involving Flexible Parts », *International Journal Mécaniques & Industries*, EDP Sciences Eds., 5(2), pp. 213-219, 2004.

[Mikchevitch & al./2 2004] A. Mikchevitch, J.-C. Léon, A. Gousskov, « Flexible Beam Part Manipulation for Assembly Operation Simulation in a Virtual Reality Environment », *ASME JCISE International Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 4(2), pp. 114-123, 2004.

[Mikchevitch & al./3 2004] A. Mikchevitch, J.-C. Léon, A. Gousskov, « Experimental behaviour Study of Flexible Beam Parts for Design and Assembly/Disassembly Process Analysis using a Virtual Environment », 5th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering IDMME'04, Bath, UK, April 2004.

[Mikchevitch & al./4 2004] A. Mikchevitch, J.-C. Léon, A. Gousskov, « Proposal of Criteria Characterizing Assembly Operations of Flexible Beam Parts for Virtual Reality Applications », Proc. of ASME DETC'04 Design for Manufacturing Conference, Salt Lake City, Utah, USA, DETC2004-57757, October 2004.

[Mikchevitch & al./5 2004] A. Mikchevitch, J.-C. Léon, A. Gousskov, G. Lemasson, F. Mérienne, « Réalisme dans la simulation virtuelle des pièces déformables : application à l'assemblage virtuel », Site Internet <http://gsc11.cemif.univ-evry.fr/~ashaptics/>, Journée de l'Action Spécifique Haptique, INRIA, Montbonnot, France, Juin 2004.

[Miller & al. 1989] G. Miller, A. Pearce, , « A connected particle system for animating viscous fluids », *Int. Journal Computers and Graphics*, 13(3), pp.305-309, 1989.

[Moreau 2003] G. Moreau, « Interaction in Virtual Environments », *International Conference Virtual Concept 2003*, Biarritz, France, pp. 264-270, November 2003.

[Newman & al. 2002] W. S. Newman, M. Branicky, Y.-H. Pao, C. Birkhimer, S. Chhatpar, J. Wei, Y. Zhao, « Intelligent Strategies for Compliant Robotic Assembly », Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2002.

[Ogden 1984] R. W. Ogden, « Non-linear Elastic Deformation », Ellis-Horwood, Chichester, UK, 1984.

[Oliver & al. 1995] J. Oliver, R. Kuehne, « A Virtual Environment for Interactive Assembly Planning and Evaluation », ASME DETC'95 Design Automation Conference, USA, DETC1995-DAC, 1995.

[O'Shea & al. 1998] B. O'Shea, S. S. Grewal, H. Kaebernick, « State of the art literature survey on disassembly planning », *Concurrent Engineering: Research and Application*, 6(4), pp.345-357, 1998.

[Pahl & al. 1986] G. Pahl, W. Beitz, « Fundamentals of Systematic Approach », W. Konstruktionslehre, Editions Springle, Berlin, Germany, 1986.

[Pai & al. 1996] P. F. Pai, A. N. Palazotto, « Large-deformation analysis of flexible beams », *Int. J. Journal of Solids Structures*, 33(9), pp. 1335-1353, 1996.

[Paillot & al. 2002] D. Paillot, F. Mérienne, J.-P. Frachet, M. Neveu, S. Thivent, L. Fine, « Revue de projet immersive pour le style automobile », Proc. of International Conference Virtual Concept 2002, Biarritz, France, pp. 60-65, October 2002.

[Père & al. 2003] C. Père, D. Paillot, « From Digital Mock-up to Virtual Mock-up », Proc. of International Conference Virtual Concept 2003, Biarritz, France, pp. 42-49, November 2003.

[Perf-RV 2003] Plate-forme française de réalité virtuelle : INRIA, LIST/CEA, Ecole des Mines de Paris, Institut Image/ENSAM, LABRI, LIMSI/CNRS, ADEPA, EADS CCR, IFP, CLARTE, Dassault Aviation, EDF, Giat Industrie, PSA Peugeot Citroën, Renault, Site Internet <http://www.perfrv.org>, 2003.

[Pernot & al. 2003] J. P. Pernot, B. Falcidieno, F. Giannini, S. Guillet, J.-C. Léon, « A new approach to minimisations for shape control during free-form surface deformation », Proc. of ASME DETC'2003 Design and Automation Conference, Chicago, Illinois, USA, DETC2003-DAC48777, 2003.

[Peroche & al. 1998] P. Peroche, D. Ghazanfarpour, D. Michelucci, M. Roelens, « Informatique graphique », 2^{ème} édition, Eds. HERMES, France, 1998.

[Polhemus 2003] Site Internet www.polhemus.com

[PSA 2004] Site Internet <http://evariste.org/yolin/2004/4-3-3-3.html>

[Raboud & al. 1996] D. Raboud, M. G. Faulkner, A. W. Lipsett, « A segmental approach for large three-dimensional rod deformations », Int. Journal of Solids Structures, 33(8), pp. 1137-1155, 1996.

[Raboud & al. 1997] D. Raboud, M. G. Faulkner, A. W. Lipsett, D. L. Haberstock, « Three dimensional effects in retraction appliance design », Journal of Orthodon. Dentofacial Orthop., 112(4), pp. 378-392, 1997.

[Raboud & al. 2001] D. W. Raboud, A. W. Lipsett, M. G. Faulkner, J. Diep, « Stability evaluation of very flexible cantilever beams », Int. Journal of Non-Linear Mechanics, Eds. Elsevier, 36, pp. 1109-1122, 2001.

[Rejneri 2000] N. Rejneri, « Détermination et simulation des opérations d'assemblage lors de la conception de systèmes mécaniques », Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, France, 2000.

[Ronfard & al. 1996] J. R. Ronfard, P. Rossignac, « Full-range approximation of triangulated polyhedra », Technical Report RC 20423, IBM Research Division, T. J. Watson Research Center. Paru aussi dans Proc. of Int. Conf. Eurographics'96, 1996.

[Roucoules 1999] L. Roucoules, « Méthodes et connaissances : contribution au développement d'un environnement de conception intégrée », Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, France, 1999.

[Rubin 1990] I. Rubin, « Handbook of Plastic Materials and Technology », Eds. Wiley USA, 1990.

[Salisbury & al. 1995] K. Salisbury, D. Brock, T. Massie, N. Swatup, C. Zilles, « Rendering: Programming Touch Interaction with Virtual Objects », Proc. of the Symposium on Interactive 3D Graphics, Monterey, California, USA, pp. 123-130, 1995.

[Schek 1974] H. J. Schek, « The force density method for form finding and computation of general networks », J. Comp. Meth. in App. Mech. and Eng., 3(2), pp.115-134,1974.

[Schepacz 1991] C. Schepacz, « Des méthodes pour un assemblage-montage rationnel », CETIM - Informations, 23, 1991.

[Segrestin 1992] D. Segrestin, « Sociologie de l'entreprise », Editions Armand Colin, France, 1992.

[Sensible 2002] Site Internet www.sensible.com

- [Shampine & al. 1997] L. F. Shampine, M. W. Reichelt, « The Matlab ODE Suite », *SIAM J. Sci. Comput.*, 18, pp. 1-22, 1997.
- [Steketee 1985] S. N. Steketee, N. I. Badler. « Parametric key frame interpolation incorporating kinetic adjustment and phrasing control », *Proc. of SIGGRAPH'85, Computer Graphics*, 19(3), pp. 255-262, 1985.
- [Stevenson 1998] M. Stevenson, « Using the 3-Dimensional Static Strength Prediction Program, Version 4.0 in the Study of a Patient Lifting Task », *Ergonomics Australia On-Line*, 12(5), pp. 26-35, 1998.
- [Struik 1988] D. J. Struik, « Lectures on Classical Differential Geometry », Eds. Dover Publications, Inc., New York, 1988.
- [Suh 1989] N. P. Suh, « The principles of design », Oxford University Press, New York, USA, 1989.
- [Sutcliffe & al. 2003] A. Sutcliffe, B. Gault, « Presence, Memory and Interaction in Virtual Environments », Site Internet http://www.co.umist.ac.uk/hci_design/PresPpr-IJHCS.doc, 2003.
- [Sutherland 1963] I. E. Sutherland, « Sketchpad, a man-machine graphical communication system », *Proc. of AFIPS'63*, pp. 329-346, 1963.
- [Svetlitsky/1 1987] V. A. Svetlitsky, « Mécanique des tiges », Partie 1 Statique, Eds. « Ecole supérieure », Moscou, 1987, (en russe).
- [Svetlitsky/2 1987] V. A. Svetlitsky, « Mécanique des tiges », Partie 2 Dynamique, Eds. « Ecole supérieure », Moscou, 1987, (en russe).
- [Svetlitsky 2000] V. A. Svetlitsky, « Statics of Rods », Eds. Springer, Berlin, 2000.
- [Swindells & al. 2002], C. Swindells, J. C. Dill, K. S. Booth « System Lag Tests for Augmented and Virtual Environments », Simon Fraser University & University of British Columbia, Canada, 2002.
- [Taylor 1902] F. W. Taylor, « Shop Management », *ASME Transactions*, 24, USA, 1902.
- [Terzopoulos & al. 1989] D. Terzopoulos, J. Platt, K. Fleisher, « Heating and melting deformable models (from goop to glop) », *Graphics Interface'89*, London, pp. 219-226, 1989.
- [Thalmann & al. 1999] N. Thalmann, D. Thalmann, « Virtual Reality Software and Technology », Site Internet <http://www.miralab.unige.ch/papers/100.pdf>, 1999.
- [Tichkiewitch 1992] S. Tichkiewitch, « Modélisation pour la conception et processus d'intégration », *Conférence La conception en l'an 2000 et au-delà*, CNES, Strasbourg, France, 1992.
- [Tichkiewitch 1996] S. Tichkiewitch, « Specification on integrated design methodology using a multi-view product model », *ESDA Proceedings of Systems Design and Analysis Conference*, 1996.
- [Tichkiewitch 1997] S. Tichkiewitch, « Relecture de l'estampage à la lumière de la mécanique », *Connaissances et savoir-faire en entreprise*, Edition HERMES, Paris, France, 1997.
- [Timoshenko & al. 1959] S. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger, « Théorie des plaques et coques », Dunod Eds., 1959.
- [Timoshenko & al. 1970] S. P. Timoshenko, J. N. Goodier, « Theory of Elasticity », McGraw-Hill Eds., 1970.

- [Timoshenko 1972] S. Timoshenko, « Résistance des matériaux », Volumes 1 et 2, Dunod Eds., 1972.
- [Trompette 1992] P. Trompette, « Mécanique des structures par la méthode des éléments finis », Masson Eds., Paris, 1992.
- [UW 2004] Université de Washington, Site Internet http://brl.ee.washington.edu/Research_Active/Haptics/Device_04_LHD/LHD.html
- [Van Beuzekom & al. 2001] A. D. Van Beuzekom, W. P. Medendorp, J.A.M. Van Gisbergen, « The subjective vertical and the sense of self orientation during active body tilt », *Journal of Vision Research*, 41, Eds. Elsevier, pp. 3229-3242, 2001.
- [Véron & al. 2001] P. Véron, J.-C. Léon, « Using polyhedral models to automatically sketch idealized geometry for structural analysis », *Engineering with Computers*, 17, pp. 373-385, 2001.
- [VirtTech 2002] Site Internet <http://www.virtex.com>
- [VMG 2001] The Virtual Manufacturing Group; « Designing and Planning Cable Harnesses in Virtual Environments », Heriot-Watt University, Edinburgh, UK, 2001, Site Internet http://www.hw.ac.uk/mecWWW/research/vmg/r_vcr.htm
- [Vuskovic & al. 2000] V. Vuskovic, M. Kauer, G. Szekely, M. Reidy, « Realistic Force Feedback for Virtual Reality Based Diagnostic Surgery Simulators », *Proc. of IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, USA, pp. 1592-1598, April 2000.
- [Wada & al. 2000] T. Wada, J. B. McCarragher, H. Wakamatsu, S. Hirai, T. Yonezawa, S. Tokumoto, « Modeling of Hysteresis in Deformation of Rodlike Objects Toward Their Manipulation », *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2000.
- [Wakamatsu & al. 1995] H. Wakamatsu, S. Hirai, K. Iwata, « Modeling of Linear Objects Considering Bend, Twist, and Extensional Deformation », *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 433-438, 1995.
- [Waters & al. 1994] T. R. Waters, V. Putz-Anderson, A. Garg, « Application Manual for the Revised NIOSH Lifting Equation », U. S. Department of Health and Human Services, DHHS NIOSH Publication N 94-110, 1994.
- [Watt 2000] A. Watt, « 3D Computer Graphics », Addison-Wesley Eds., 2000.
- [Wu & al. 2001] X. Wu, M. Downes, T. Goktekin, F. Tendick, « Adaptive Nonlinear Finite Elements for Deformable Body Simulation Using Dynamic Progressive Meshes », *Annals of EUROGRAPHICS 2001*, Blackwell Publishers, 20(3), 2001.
- [Yokoi & al. 1994] H. Yokoi et al., « Development of the Virtual Shape manipulating System », *Proc. of 4th International Conference on Artificial Reality and Tele-Existence*, Tokyo, Japan, pp. 43-48, 1994.
- [Zha & al. 1998] X. F. Zha, S. Y. E. Lim, S. C. Fok, « Integrated Knowledge-Based Assembly Sequence Planning », *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14, pp.50-64, 1998.
- [3Dconnexion 2003] Site Internet <http://www.3dconnexion.com>