



HAL
open science

Méthodologie de conception innovante intégrant la sécurité des utilisateurs : application aux liaisons tracteur-outils

Rima Ghemraoui

► **To cite this version:**

Rima Ghemraoui. Méthodologie de conception innovante intégrant la sécurité des utilisateurs : application aux liaisons tracteur-outils. Mécanique [physics.med-ph]. École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2009. Français. NNT: . tel-00506040

HAL Id: tel-00506040

<https://theses.hal.science/tel-00506040>

Submitted on 27 Jul 2010

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.

**THESE DE DOCTORAT
DE L'ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN**

Présentée par

Rima GHEMRAOUI

en vue de l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN

Domaine :

MECANIQUE - GENIE MECANIQUE – GENIE CIVIL

Sujet de la thèse :

**Méthodologie de conception innovante intégrant la sécurité des
utilisateurs : application aux liaisons tracteur-outils**

Thèse présentée et soutenue à Cachan le 17 novembre 2009 devant le jury composé de :

Alain BERNARD	P.U. - Ecole Centrale de Nantes	Rapporteur
Elie FADIER	D.R. - INRS	Rapporteur
Christopher A. BROWN	Prof. - WPI USA	Examineur
Pascal RAY	P.U. - IFMA Clermont-Ferrand	Examineur
Luc MATHIEU	P.U. - Université Paris-Sud XI	Directeur de thèse
Nicolas TRICOT	C.R. - Cemagref Antony	Co-encadrant
Jean François GOUPILLON	Responsable Technique AXEMA	Invité

Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée
(ENS CACHAN / Paris-Sud XI / EA 1385)
61, avenue du Président Wilson, 94235 CACHAN CEDEX (France)

Remerciements

Le travail de recherche exposé dans ce mémoire de thèse a été réalisé dans le cadre d'une convention entre le Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée (LURPA – EA 1385) de l'École Normale Supérieure de Cachan et L'Unité de Recherche Technologie pour la Sécurité et les Performances des Agroéquipements (TSAN) du Centre de Recherche du Cemagref d'Antony.

Je tiens tout d'abord à remercier les responsables du Cemagref qui m'ont confié et financé ce projet de recherche.

Je remercie le Professeur Luc Mathieu, de l'Université Paris-Sud XI, pour avoir assuré la direction et l'encadrement scientifique de mes travaux. Je le remercie également pour son écoute et sa sympathie.

Je remercie Monsieur Nicolas Tricot, chargé de recherche au Cemagref, pour sa confiance et sa disponibilité tout au long de ce travail.

Je remercie le Professeur Alain Bernard et le Directeur de Recherche Elie Fadier d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Je remercie également les Professeurs Christopher Brown et Pascal Ray et Monsieur Jean-François Goupillon d'avoir accepté de participer au jury.

Merci à celles et ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Je pense particulièrement au Professeur Bernard Anselmetti ainsi que Messieurs Pierre Clavel, Jean-François Billot et Emmanuel Hugo.

Merci aux membres du LURPA pour leur accueil et leur sympathie.

Merci à tous les membres de l'Unité TSAN qui m'ont côtoyée et aidée durant ces trois années. Je remercie en particulier Laure pour la collocation sympathique partagée, Emilie pour son écoute et ses conseils, Stéphanie et Sonia pour leur écoute, Wided et Sylvain pour leur gentillesse. Merci à Thierry, Lionel, Olivier, Nadjat, Marc, Bernard, Jean-Pierre et tous les autres pour leur bonne humeur. Merci à Graziella, Sarla et Gaby pour leur aide administrative.

Un grand merci à mes amis d'ici et d'ailleurs.

Merci à Sébastien pour sa patience tout au long de ces trois ans, pour avoir supporté mon humeur et pour m'avoir permis de continuer dans les moments de doute.

Enfin, je remercie ma petite famille qui m'a soutenue et encouragée sans faille au cours de toutes mes années passées et qui continue à le faire.

*A maman...
A papa...
A mes sœurs et à mon frère...
A Sébastien...
A mon Liban...*

... je dédie ce mémoire

Vous avez votre Liban avec ses dilemmes. J'ai mon Liban avec sa beauté.

Vous avez votre Liban avec tous les conflits qui y sévissent. J'ai mon Liban avec les rêves qui y vivent.

Votre Liban est un noeud politique que les années tentent de défaire. Mon Liban est fait de collines qui s'élèvent avec prestance et magnificence vers le ciel azuré.

Votre Liban est un gouvernement-pieuvre à nombreux tentacules. Mon Liban est un mont quiet et révérend, assis entre mers et plaines, tel un poète à mi-chemin entre Création et Eternité.

Votre Liban est un échiquier entre un chef religieux et un chef militaire. Mon Liban est un temple que je visite dans mon esprit, lorsque mon regard se lasse du visage de cette civilisation qui marche sur des roues.

Votre Liban est un homme qui paie tribut et un autre qui le perçoit. Mon Liban est un seul homme, la tête appuyée sur le bras, se prélassant à l'ombre du Cèdre, oublieux de tout, hormis de Dieu et de la lumière du soleil.

Extrait de « Vous avez votre Liban, j'ai le mien » de Gibran Khalil Gibran

A la mémoire de Pascal...

Table des matières

Introduction

Chapitre I :

Contexte et problématique industriels – Les liaisons tracteurs-outils

Introduction.....	7
1. Accidentologie importante	7
2. Réglementation pauvre.....	10
3. Présentation des liaisons tracteur-outils	11
3.1. Liaisons d'accrochage mécaniques.....	11
3.1.1. Modes d'attelage.....	11
3.1.2. Identification des caractéristiques des différentes liaisons d'accrochage.....	12
3.1.3. Configurations possibles entre modes d'attelage et liaisons	14
3.2. Liaisons de transmission de puissances	16
3.2.1. Transmission mécanique de puissance	16
3.2.2. Transmission hydraulique et pneumatique de puissance	16
3.2.3. Transmission électrique de puissance	17
3.2.4. Spécificités des liaisons de transmission d'énergie	17
3.3. Liaisons mécaniques non commercialisées	18
Synthèse du chapitre I et objectifs industriels.....	19

Chapitre II :

Etat de l'art – Sécurité et Conception

Introduction.....	23
1. Risque	23
1.1. Identification du risque	24
1.2. Evaluation du risque	25
1.2.1. Evaluation de la gravité	25
1.2.2. Evaluation de la probabilité d'occurrence.....	26
1.2.3. Matrice du risque	27
2. Evaluation des risques d'un système technique : la Sûreté de fonctionnement	28
2.1. Méthodes de Sûreté de Fonctionnement	28
2.1.1. Méthodes inductives	29
2.1.2. Méthodes déductives.....	30

2.2.	Indicateurs de la sûreté de fonctionnement.....	33
3.	Prise en compte de l'humain dans l'évaluation des risques	35
3.1.	Ergonomie.....	35
3.1.1.	Dimensions corporelles.....	35
3.1.2.	Postures possibles	36
3.1.3.	Mouvements du corps	36
3.1.4.	Force physique	37
3.1.5.	Capacités mentales.....	38
3.2.	Analyse du retour d'expérience.....	39
3.2.1.	Modélisation de la situation de travail	39
3.2.2.	Analyse de l'écart entre le prescrit et le réel	40
3.3.	Mesures de sécurité – Notion de barrières.....	42
3.3.1.	Classification des fonctions des barrières	42
3.3.2.	Classification des systèmes de barrières	43
3.3.3.	Critères de performance des barrières.....	44
3.3.4.	Analyse des barrières assistée par ordinateur	46
4.	Intégration de la sécurité dans les approches de conception	47
4.1.	Point de vue ergonomique	47
4.1.1.	Intégration de la sécurité par voies "directes".....	47
4.1.2.	Intégration de la sécurité par voies "indirectes"	47
4.1.3.	Préconisations des résultats de travaux de recherche sur l'intégration de la sécurité	48
4.1.3.1.	Aller au delà du savoir technique.....	48
4.1.3.2.	Favoriser la conception participative	48
4.1.3.3.	Enrichir les phases de la conception en introduisant des critères et des objectifs de sécurité et de santé	48
4.1.3.4.	Intégrer la sécurité portée par l'organisation des retours d'expériences	49
4.2.	Point de vue mécanique	49
4.2.1.	Point de vue de l'Analyse Fonctionnelle du Besoin.....	49
4.2.1.1.	Description de l'Analyse Fonctionnelle du Besoin	49
4.2.1.2.	Sécurité et Analyse Fonctionnelle du Besoin	51
4.2.2.	Point de vue de la Théorie de Résolution des Problèmes Inventifs (TRIZ)	52
4.2.2.1.	Description de TRIZ	52
4.2.2.2.	Sécurité et TRIZ.....	56
4.2.3.	Point de vue du Quality Function Deployment (QFD).....	58
4.2.3.1.	Description du QFD.....	58
4.2.3.2.	Sécurité et le QFD.....	59
4.2.4.	Point de vue de la Conception Axiomatique.....	59
4.2.4.1.	Description de la Conception Axiomatique.....	59
4.2.4.2.	Sécurité et Conception Axiomatique	63
5.	Intégration des méthodes et théories de la conception	65
5.1.	Approche systématique.....	66
5.2.	Intégration de l'Analyse Fonctionnelle et de TRIZ.....	68
5.3.	Extended Axiomatic Design (EAD)	69
5.4.	Intégration de TRIZ et de l'AD	70
5.5.	Méthode de Conception Intuitive.....	70
6.	Problématique Scientifique de la thèse	71
	Synthèse du Chapitre II.....	74

Chapitre III :

Proposition d'un modèle d'intégration Sécurité/Conception

Introduction	77
1. Principes fondamentaux régissant le modèle	77
1.1. Principe 1 : Définir les objectifs de la conception des points de vue technique et de sécurité	77
1.1.1. Alternative 1.1 : Définir les objectifs techniques.....	79
1.1.2. Alternative 1.2 : Définir les objectifs de sécurité	79
1.2. Principe 2 : Conserver l'indépendance des exigences fonctionnelles techniques et de sécurité.....	80
1.2.1. Alternative 2.1 : Conserver l'indépendance des évènements susceptibles de générer un risque.....	80
1.2.2. Alternative 2.2 : Conserver l'indépendance des « Objectifs utilisateurs/ Tâches ».....	81
1.2.3. Alternative 2.3 : Minimiser l'ajout de paramètres de conception pour les objectifs de sécurité.....	82
1.3. Principe 3 : Minimiser l'incompatibilité entre les caractéristiques humaines et les paramètres de la conception.....	82
1.3.1. Alternative 3.1 : Minimiser l'incompatibilité « vulnérabilité de l'humain/ grandeurs physiques ».....	83
1.3.2. Alternative 3.2 : Minimiser l'incompatibilité « caractéristiques morphologique/ paramètres structurants »	83
1.3.3. Alternative 3.3 : Minimiser l'incompatibilité « force physique/ paramètres structurants »	84
1.3.4. Alternative 3.4 : Minimiser l'incompatibilité « postures/ paramètres structurants » ...	85
2. Modèle d'intégration de la sécurité et de la conception	86
3. Mappage du processus de conception au processus du risque	90
3.1. Interactions de l'humain avec la conception.....	91
3.1.1. Interaction Homme-Principes	91
3.1.2. Interaction Homme-Système	92
3.1.3. Interaction Homme-Machine	92
3.2. Description du processus de conception du modèle	93
3.2.1. Phase 1 (P1) : Exigences de conceptualisation	95
3.2.2. Phase 2 (P2) : Principe de la solution	97
3.2.3. Phase 3 (P3) : Exigences de structuration.....	98
3.2.4. Phase 4 (P4) : Structure de la solution.....	100
3.2.5. Phase 5 (P5) : Exigences de finition	101
3.2.6. Phase 6 (P6) : Détail de la solution.....	102
3.3. Description du processus du risque du modèle.....	104
3.3.1. Contexte 1 (C1) : Exigences de sécurité des super-systèmes	106
3.3.2. Contexte 2 (C2) : Risques d'accidents.....	108
3.3.3. Contexte 3 (C3) : Exigences de sécurité du système	110
3.3.4. Contexte 4 (C4) : Risques ergonomiques	112
3.3.5. Contexte 5 (C5) : Exigences de sécurité des sous-systèmes.....	114
3.3.6. Contexte 6 (C6) : Risques résiduels.....	116
Synthèse du chapitre III	117

Chapitre IV :

Méthode proposée (IRAD) – Cas d'emploi et outils associés

Introduction.....	121
1. Cas d'emploi 1: Formalisation structurée du Retour d'Expérience	122
1.1. Description de la démarche de structuration du Retour d'Expérience	122
1.2. Outils d'analyse associés.....	124
1.3. Exemple d'application : Le robinet mélangeur	125
1.3.1. Analyse Fonctionnelle du Besoin et Cahier des Charges Fonctionnel	125
1.3.2. Accidentologie et retour d'expérience (CSC)	127
1.3.3. Elaboration des exigences de sécurité à partir du REX	127
2. Cas d'emploi 2: Analyse de la solution technique en conception/ sécurité	128
2.1. Analyse de la conception	128
2.2. Analyse des risques.....	131
2.3. Outils de conception associés	135
2.3.1. Arbre fonctionnel.....	135
2.3.2. Arbre des paramètres de conception.....	136
2.3.3. Matrice de conception.....	137
2.4. Exemple d'application : le robinet mélangeur.....	138
2.4.1. Analyse de la conception conceptuelle	138
2.4.1.1. Expression des exigences et des paramètres de conception du mélangeur.....	138
2.4.1.2. Analyse des risques liés aux principes de solution	140
2.4.2. Analyse de la conception architecturale	142
2.4.2.1. Expression des exigences et des paramètres de conception.....	142
2.4.2.2. Analyse des risques liés à l'agencement structurel de la solution.....	143
2.4.3. Analyse des risques liés aux détails de la solution	146
3. Cas d'emploi 3: Synthèse des solutions	148
3.1. Description de la démarche de synthèse	148
3.2. Outils de conception associés	150
3.2.1. Analyse Fonctionnelle Externe	150
3.2.2. Mappage du fonctionnel au physique	151
3.2.3. Les outils de résolution des problèmes inventifs	152
3.2.3.1. Effets fondamentaux	152
3.2.3.2. Résolution des contradictions	153
3.3. Exemple d'application : le robinet mélangeur.....	154
3.3.1. Synthèse d'un principe de solution pour l'exigence de sécurité.....	155
3.3.2. Découplage de FR1 et FR2	156
3.3.3. Résolution des contradictions Sécurité/Performance technique	157
Synthèse du chapitre IV	158

Chapitre V :

Validation expérimentale de la méthode – Attelage des outils portés

Introduction.....	163
1. Liaison trois points.....	164
1.1. Description de la liaison.....	164
1.2. Caractéristiques du produit faisant l'objet de la conception	165

1.2.1.	Délimitation du périmètre de l'étude	162
1.2.2.	Description du profil de vie du système	163
1.2.3.	Recensement des Eléments du Milieu d'Utilisation (EMUs)	163
1.2.4.	Recensement des fonctions et élaboration du Cahier des Charges Fonctionnel	165
1.3.	Description de l'opération d'attelage	169
2.	Cas d'emploi 1 : Expression des exigences de sécurité à partir du retour d'expérience.....	171
2.1.	Analyse de l'accident par l'arbre des causes	172
2.2.	Analyse de l'accident par la méthode IRAD et élaboration des exigences de sécurité	174
2.2.1.	Analyse de l'évènement E15 par IRAD : Outil instable.....	172
2.2.2.	Analyse de l'évènement E05 par IRAD : Utilisateur dans la zone dangereuse.....	173
2.2.3.	Analyse de l'évènement (Ei, Ej) par IRAD : Accrochage des points.....	174
2.3.	Conclusion sur l'analyse du retour d'expérience.....	178
3.	Cas d'emploi 2 : Expression des exigences de sécurité à partir de l'analyse de la solution technique	179
3.1.	Analyse de la conception conceptuelle du point de vue conception.....	180
3.1.1.	Expression des exigences fonctionnelles et des paramètres de conception.....	177
3.1.2.	Conclusion sur l'analyse de la conception de la liaison trois points.....	181
3.2.	Analyse des risques liés aux choix des principes de solution.....	182
3.3.	Analyse des risques liés à l'agencement structurel choisi	188
3.4.	Conclusion sur l'analyse des risques de la liaison trois points	195
4.	Cas d'emploi 3: Synthèse de solutions.....	197
4.1.	Synthèse en conception conceptuelle pour la sous-phase d'attelage de l'outil	197
4.1.1.	ALT1 : Accrochage en 3 points	198
4.2.2.	ALT2 : Accrochage en une interface rigide.....	200
4.2.3.	Comparaison entre ALT1 et ALT2*.....	203
4.2.	Synthèse en conception architecturale pour la sous-phase d'attelage de l'outil.....	203
4.2.1.	ALT4 : Coupleur par cadre	204
4.2.2.	ALT5 : Pivotement du cadre autour de Z	205
4.2.3.	ALT 6 : Découplage des deux points inférieurs	205
4.4.	Proposition de quelques principes de solutions pour la sous-phase de réglage.....	208
4.4.1.	ALT 7 : Interface horizontale sphérique.....	208
4.4.2.	ALT 8 : Cabine du tracteur pivotable autour de X	210
	Synthèse du chapitre V.....	207

Conclusions générales et perspectives

Références Bibliographiques

Introduction

La discipline de la conception des produits techniques est régie par des lois et des théories qui tentent de rationaliser l'activité de proposition de solutions techniques en conception préliminaire. En complément, la discipline de la santé-sécurité est régie par des observations et des constats en situation d'utilisation ou à travers l'analyse du produit proposé qui tentent aussi de rationaliser la proposition de solutions techniques mais cette fois-ci dans un cadre « d'amélioration » du produit initialement proposé. Ces deux activités issues de ces deux disciplines sont considérées séquentielles de par les caractéristiques inhérentes de chacune. Cependant, le retour d'expérience montre que ce type d'approche séquentielle ne permet pas d'atteindre les résultats escomptés. D'où, il est apparu le besoin d'une prise en compte simultanée de ces deux disciplines tout au long de la conception des produits. Néanmoins, la première problématique, à laquelle, les chercheurs ainsi que les concepteurs se sont confrontés est la suivante : *Comment analyser et identifier les risques, au plus tôt dans la conception, aux étapes où peu de détails concernant le produit ont été effectués ?*

Malgré les études menées dans le domaine de la prise en considération des données incertaines au plus tôt dans le processus de développement d'un produit, les zones d'ombres restent multiples. Certains travaux se sont penchés sur la pluridisciplinarité nécessaire des acteurs de la conception. Aucun moyen méthodologique n'a alors été proposé. D'autres travaux s'appuient sur la prise en compte du retour d'expérience. Ce dernier aspect manque encore de formalisation pour être intégré d'une manière structurée dans la conception d'un nouveau produit. La nécessité de disposer de méthodes et d'outils d'assistance pour fusionner les notions

techniques et celles de la santé-sécurité constitue le cadre dans lequel nous avons mené nos travaux.

L'objectif de cette thèse est de proposer une méthode de préconception basée sur les outils méthodologiques existants et permettant l'intégration structurée et formelle de la santé-sécurité des utilisateurs. Cette méthode se basera sur la définition et l'expression des exigences de sécurité tout au long du processus de conception. Ainsi, la synthèse des solutions techniques s'effectuera simultanément sur la base des exigences de sécurité et des exigences techniques.

Ce mémoire de thèse est découpé en cinq chapitres qui nous permettent d'exposer les problématiques industrielles et scientifiques de nos travaux, nos contributions théoriques et méthodologiques ainsi que leur utilisation dans le contexte industriel de ces travaux.

Le premier chapitre décrit le contexte industriel qui porte sur le domaine des agroéquipements et plus précisément sur les systèmes de liaisons des tracteurs aux outils agricoles. Cette description explique la particularité de ces liaisons, met l'accent sur l'accidentologie qui en découle et positionne le regard des normes et de la réglementation à cet effet. Le contexte étant posé, il est ainsi possible de décrire la problématique industrielle.

Le deuxième chapitre porte sur l'étude bibliographique de l'analyse de la sécurité et son positionnement vis-à-vis des approches de la conception. Après avoir expliqué les moyens existants pour étudier la sécurité et plus particulièrement les techniques d'analyse des risques et les solutions proposées pour l'améliorer, une synthèse de ces travaux est effectuée dégageant ainsi les avantages, les inconvénients et les manques éventuels. Ensuite, nous cherchons, à travers l'étude de la littérature des théories et méthodes de la conception, d'apporter des éléments de réponse à ces éventuelles faiblesses. Enfin, l'étude de l'état de l'art va nous conduire à poser la problématique et les objectifs scientifiques de nos travaux.

Le troisième chapitre exposera notre première contribution scientifique : un modèle conceptuel d'intégration de la sécurité et de la conception. Ce modèle est basé sur une représentation systématique du processus de conception qui va nous permettre la création et la représentation systématique d'un processus des risques. De ce modèle va découler un premier

apport original : une vision du risque non pas comme une conséquence du produit entier mais comme une résultante du besoin ; des concepts et par suite des grandeurs physiques ; de l'architecture et ainsi des caractéristiques spatiales et géométriques et enfin des composants et des données comportementales qui s'en suivent. Un deuxième apport original réside dans la création des contextes du risque. Ainsi, nous avons six contextes décrivant chacun un point de vue de la sécurité suivant l'état d'avancement du développement du produit.

La méthode issue de ce modèle est développée dans le quatrième chapitre. Cette méthode baptisée « IRAD method » permet trois cas d'emploi : (1) l'expression des exigences de sécurité à travers l'analyse et l'abstraction structurée du retour d'expérience, (2) l'expression des exigences de sécurité à travers l'analyse des risques des choix techniques au cours de la conception et (3) la synthèse des solutions intégrant les exigences de sécurité. Les outils de formalisation des différents cas sont aussi donnés.

Le cinquième chapitre traite de l'utilisation de notre méthode en contexte industriel. La liaison d'accrochage mécanique en question est alors finement analysée, des exigences de sécurité sont élaborées et des pistes de sécurisation sont proposées.

Finalement, après avoir rappelé de manière synthétique les résultats obtenus, nous concluons ce manuscrit en proposant des perspectives pour des travaux futurs en continuité de ce travail de recherche.

Chapitre I

Contexte et problématique industriels : Les liaisons tracteur-outils

*Tout arrive par les idées, elles produisent les faits qui leur
servent que d'enveloppe
Chateaubriand*

Sommaire du Chapitre I

Introduction	7
1. Accidentologie importante	7
2. Réglementation pauvre.....	10
3. Présentation des liaisons tracteur-outils	11
3.1. Liaisons d'accrochage mécaniques	11
3.2. Liaisons de transmission de puissances	16
3.3. Liaisons mécaniques non commercialisées.....	18
Synthèse du chapitre I et objectifs industriels.....	19

Introduction

Les travaux présentés dans ce mémoire sont réalisés dans le cadre d'un projet de Recherche financé par le Cemagref d'Antony. Ce centre de recherche a pour volonté de répondre aux demandes de la Caisse Centrale de la Mutualité Sociale Agricole (CCMSA) et du Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche (MAAP) en matière de sécurisation du matériel agricole tout en respectant les besoins des utilisateurs. Dans nos travaux, le matériel en question est constitué des dispositifs de liaisons qui existent entre le tracteur et l'outil agricole, appelés les liaisons tracteur-outils (LTO). Généralement, ces liaisons sont présentes sur le tracteur ; certaines consistent en des éléments mécaniques pour l'accrochage de l'outil au tracteur, d'autres correspondent à des connexions pour la transmission, à l'outil, de la puissance disponible sur le tracteur. Ce chapitre a pour objectif d'expliquer la problématique de ces liaisons en présentant l'accidentologie, la position de la réglementation à cet effet et en fournissant un état des lieux des liaisons existantes. Ensuite, nous allons étayer les caractéristiques de ces liaisons afin de pouvoir définir la problématique industrielle. Nous avons préféré présenter l'accidentologie en premier lieu afin de rentrer le lecteur directement dans le contexte dans lequel nous avons mené nos travaux. En effet, l'explication, d'un point de vue technique, des liaisons existantes va permettre d'apporter certains éléments de réponse à cette accidentologie. De plus, les informations présentées proviennent notamment de nos propres recherches et analyses. Enfin, nous concluons ce chapitre par les questions scientifiques qui ressortent du contexte applicatif.

Terminologie :

Liaison: Tout dispositif de liaison existant permettant de lier le tracteur à l'outil.

Produit : Dispositif à concevoir qui va remplacer les liaisons.

Outil ou machine: Outil agricole qui vient se lier au tracteur.

1. Accidentologie importante

Aujourd'hui, les liaisons tracteur-outils qui existent entre le tracteur et l'outil agricole sont à l'origine de nombreux accidents de travail. D'après une étude réalisée par la Caisse Centrale de la Mutualité Sociale Agricole (CCMSA), à partir des données statistiques des accidents de travail entre 2000 et 2004 (CCMSA, 2005), et malgré une tendance à la diminution du nombre d'accidents toutes activités confondues, le nombre d'accidents survenus lors des opérations d'attelage (ou d'accrochage de l'outil) et de dételage (ou de

décrochage de l'outil) reste pratiquement constant (Figure 1.1), avec un accroissement de leur gravité.

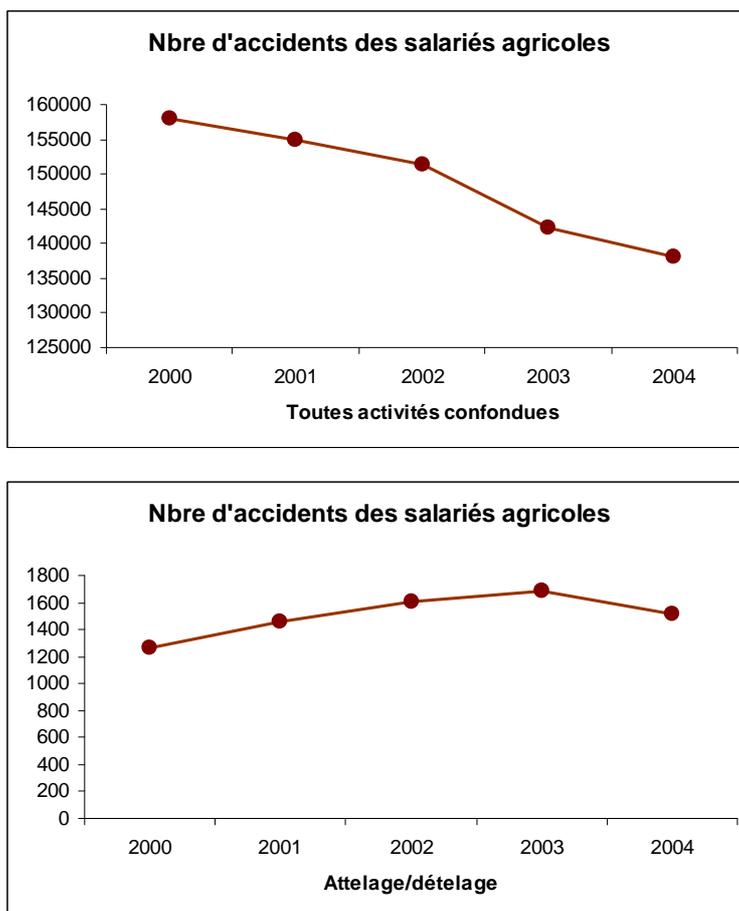


Figure 1.1: Statistiques d'accidents des salariés agricoles

En effet, la seule phase attelage/déattelage des outils a causé, en 2003, près de 1930 accidents (CCMSA, 2005) du travail auprès des salariés (841 accidents) et non salariés (1089 accidents) agricoles français mettant ainsi en cause la sécurité de l'interface du tracteur avec les outils attelés à l'avant ou à l'arrière. La durée moyenne d'arrêt de travail est de 44 jours. Les utilisateurs sont particulièrement exposés à un risque de coincement et/ou d'écrasement lors des manutentions, des manipulations de charges encombrantes et lourdes. Ce risque est notamment dû à la complexité croissante des liaisons entre le tracteur et l'outil du fait qu'elles résultent de l'interaction entre différentes technologies, différentes formes d'énergie et par le niveau d'intervention humaine nécessaire. En résumé, ces accidents sont de différents types, interviennent dans différentes phases de vie des liaisons et ont différentes causes.

L'analyse des rapports d'enquête provenant du MAAP, que nous avons conduite, a permis de mettre en évidence deux composants à l'origine des accidents les plus graves (mortels et amputations) : l'Arbre de Transmission à Cardan (ATC) qui permet la transmission de l'énergie mécanique du tracteur à l'outil et les commandes de relevage qui permettent de commander la liaison trois points et se trouvant à l'extérieur de la cabine, près de la zone d'attelage. Le graphique (Figure 1.2) ci-dessous montre les résultats de l'analyse des 17 rapports d'accidents graves rapportés entre 2000 et 2005.

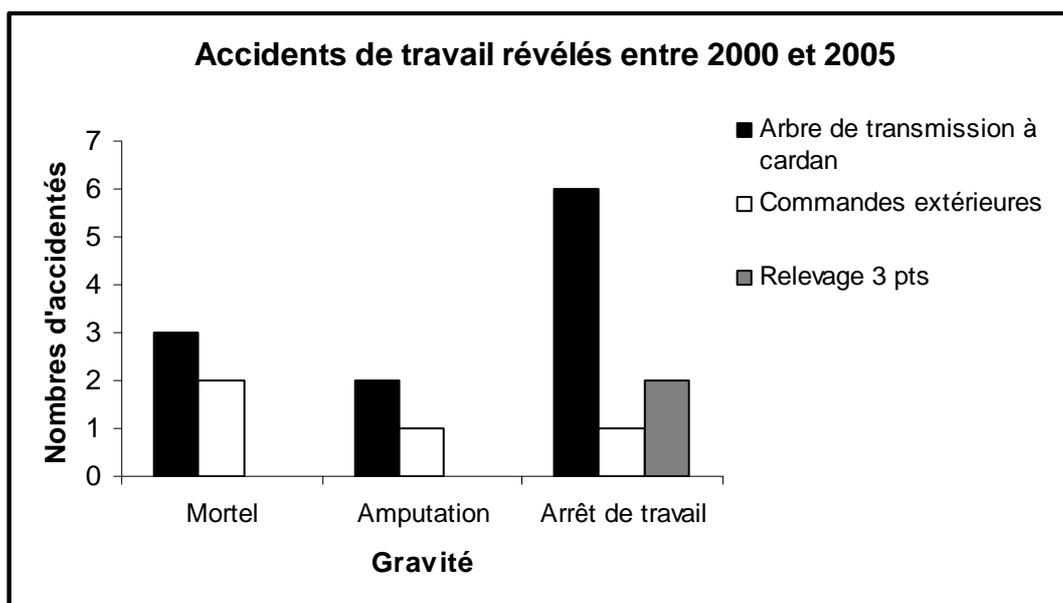


Figure 1.2: Accidents graves liés aux liaisons tracteur-outils

Ces analyses ne sont que les premiers constats mettant en cause les liaisons tracteur-outils. En effet, les risques ne sont pas limités à la liaison proprement dite, mais à tout un environnement de travail, assez complexe, liés à la nature de l'activité agricole. Effectivement, cette activité met en interaction un utilisateur (formation, condition physique, âge, expérience,...), une tâche (fréquence, modes d'interventions...), un matériel (maintenance, compatibilité, conception...) et un milieu (espace, nature du sol, climat...).

Des statistiques difficilement exploitables

Les données statistiques délivrées par la Caisse Centrale de la Mutualité Sociale Agricole (CCMSA) ont l'inconvénient d'être pauvre pour être exploitable et pour permettre d'aborder mathématiquement le problème. En effet, celles-ci ont le désavantage de prendre en considération toutes activités possibles dans le domaine agricole et de confondre toutes les liaisons. Elles consistent en un recensement probabiliste de certaines typologies d'accidents

auxquelles n'est attaché ni le niveau de gravité, ni la composante impliquée de la liaison, ni l'activité correspondante, ni l'âge du matériel et sa conformité ou non aux normes. De plus, ces statistiques ne différencient pas les accidents dus aux liaisons mêmes de ceux dus à l'environnement de travail en agriculture. Les seules données potentiellement exploitables sont des scénarii d'accidents ou de presque accidents en situation normale d'utilisation (MAP, 2006). Ces données factuelles vont constituer le cœur de nos analyses par la suite.

2. Réglementation pauvre...

Les liaisons tracteur-outils sont les interfaces qui lient les tracteurs aux machines agricoles. Les tracteurs sont soumis à la réglementation du tracteur agricole (2003/37/CE) (Directive, 2003) tandis que l'outil doit répondre à la réglementation machine (2006/42/CE) (Directive, 2006). La seule réglementation concernant la liaison elle-même est celle de l'ensemble « tracteur-outils » qui correspond au code de la route et définit ainsi des données purement techniques tels que les dimensions de l'ensemble (tracteur-outil), le poids total autorisé en charge ainsi que les reports de charges sur chaque essieu (source Syndicat National des Constructeurs de Véhicules Agricoles SNCVA).

Selon la directive (2006/42/CE), une machine est définie comme: *(1) un ensemble de pièces ou d'organes liés entre eux dont au moins un est mobile et, le cas échéant, d'actionneurs, de circuits de commande et de puissance, réunis de façon solidaire en vue d'une application définie, (2) un ensemble de machines qui, afin de concourir à un même résultat, sont disposées et commandées de manières à être solidaires dans leur fonctionnement, (3) un équipement interchangeable modifiant la fonction d'une machine, qui est mis sur le marché dans le but d'être assemblé à une machine ou à une série de machines différentes ou à un tracteur par l'opérateur lui même, et dans la mesure où cet équipement n'est pas une pièce de rechange ou un outil.* Ainsi, nous aurions pu imaginer que les liaisons soient soumises à la réglementation machine (étant donné qu'elles ont toutes les descriptions d'une machine) mais leur appartenance au tracteur ne le favorise pas pour autant.

Ainsi, il est clair que ces liaisons souffrent de leur rôle fonctionnel d'interface entre le tracteur et une multitude de matériels provenant souvent de fournisseurs différents.

... Malgré une normalisation importante

En effet, les normes dans le domaine des LTO sont très nombreuses (nous en avons recensé une trentaine, juste pour les liaisons d'accrochage mécanique, chacune faisant environ en moyenne 15 pages). Elles concernent principalement des données de conception et des essais de conformité... Elles spécifient essentiellement les caractéristiques dimensionnelles des accouplements, de leur emplacement sur le tracteur et les charges statiques supportées.

L'aspect sécurité humaine n'apparaît à aucun endroit. Il est important de rappeler la différence inhérente entre une réglementation et une norme ; alors que la première est une obligation, l'autre reste un choix pour les constructeurs.

3. Présentation des liaisons tracteur-outils

Les liaisons tracteur-outils consistent en une combinaison d'une multitude de sous-ensembles de nature multi-physiques : mécanique, hydraulique, électrique, électronique et pneumatique. Ces différents sous-ensembles coexistent dans un espace exigu (Figure 1.3).



Figure 1.3: Vue partielle des liaisons tracteur-outils (arrière du tracteur à droite, outil à gauche)

3.1. Liaisons d'accrochage mécaniques

3.1.1. Modes d'attelage

Les modes d'attelage des outils agricoles au tracteur sont au nombre de trois, auxquels sont associés trois familles d'outils. Les outils portés (Figure 1.4a) ont la possibilité d'être soulevés totalement du sol, le poids total de l'outil est reporté sur le tracteur. Les semi-portés (Figure 1.4b) ne peuvent pas être soulevés du sol et ne tiennent pas en équilibre tous seuls.

Une partie de leur poids repose au sol, l'autre est reporté au tracteur. Les traînés (Figure 1.4c) sont ceux désolidarisés du tracteur pouvant tenir seuls en équilibre (Cemagref, 1991).



Figure 1.4a: outil porté/ b: outil semi-porté/ c: outil traîné

Suivant le mode d'attelage, les utilisations et les besoins de l'outil, on distingue différents dispositifs d'attelage. Chacun de ces derniers a des caractéristiques techniques et un comportement qui lui sont propres.

3.1.2. Identification des caractéristiques des différentes liaisons d'accrochage

Parmi les différentes liaisons d'accrochage mécanique, nous citons les plus rencontrés: la chape, le piton, la barre d'attelage, le crochet ramasseur et l'attelage 3 points.

La Figure 1.5 résume les caractéristiques et les insatisfactions de ces liaisons. Les informations proviennent notamment de la description du besoin que nous avons effectuée au sein d'un groupe de travail (Ghemraoui, 2007).

La description du besoin a été effectuée en présence de six experts du domaine agricole. Il s'agit de Bertre Rémy; conseiller à la CCMSA et ancien agriculteur; Billot Jean François; ex-chercheur au Cemagref d'Antony; Clavel Pierre; expert en sécurité au MAAP; Hugo Emmanuel; ex-responsable de l'Unité de Recherche TSAN du Cemagref d'Antony; Langle Thierry; responsable technique de l'Unité de Recherche TSAN du Cemagref d'Antony et Thirion François; chercheur au Cemagref de Clermont Ferrand. L'objectif de cette réunion fût de décrire le vrai besoin des différentes liaisons. En effet, nous sommes partis des liaisons les plus fréquemment rencontrées aujourd'hui (donc du retour d'expérience) et nous avons recensées les fonctions auxquelles ces liaisons répondent. L'idée fût d'une part, de se recentrer sur ce dont l'utilisateur a vraiment besoin et d'autres part, de mettre en lumière les pratiques "déviantes" issues de nouveaux besoins ou d'une insatisfaction.

Ensuite, nous avons complété cette description par une analyse des liaisons faisant l'objet d'une normalisation (informations *en italique* dans la figure 1.5). Les normes analysées sont aux nombres de 22. Comme déjà expliqué, ces normes spécifient

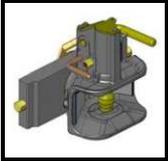
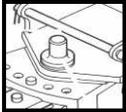
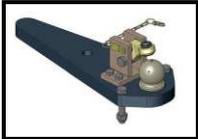
essentiellement les caractéristiques dimensionnelles des accouplements, leur emplacement sur le tracteur et les charges statiques supportées.

Définition:

Angle de roulis (RX) : rotation autour d'un axe horizontal appartenant au plan de symétrie du tracteur.

Angle de tangage (RY) : rotation autour d'un axe horizontal perpendiculaire au plan de symétrie longitudinal du tracteur.

Angle de lacet (RZ) : rotation autour de l'axe vertical du point d'attelage.

Liaisons	Caractéristiques	Insatisfactions
<p>Chape (ISO 6489-2 : 2002)</p> 	<p>Réglable en hauteur (3 positions possibles)</p> <p>Supporte une charge verticale allant jusqu'à 2T</p> <p>Attelage haut</p> <p>2 positionnements possibles de la chape suivant la puissance à la prise de force du tracteur</p> <p>Permet un angle de tangage de 20° min et un angle de lacet de 70° min (l'angle de roulis est en général donné par l'axe pivotant de la chape)</p>	<p>Report de charges faibles</p> <p>Réglage en hauteur pénible vues les charges soulevées</p>
<p>Piton (ISO 6489-4 : 2004)</p> 	<p>Permet un report de charge important (charge verticale allant jusqu'à 3T)</p> <p>Attelage bas</p> <p>Permet un angle de tangage et de roulis de 20° min et un angle de lacet de 70° min</p>	<p>Pas de réglage en hauteur</p> <p>A-coups importants entraînant une usure importante du piton</p>
<p>Boule 80 (ISO 24 347 : 2005)</p> 	<p>Permet moins d'à coups par rapport au piton et donc moins d'usure et plus de confort en conduite</p> <p>Attelage bas (même position que le piton)</p> <p>Supporte une charge verticale allant jusqu'à 4T</p> <p>Permet un angle de tangage et de roulis de 20° min et un angle de lacet de 60° min</p>	<p>Ne permet pas un réglage en hauteur</p>

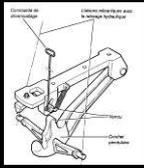
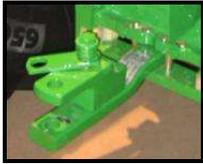
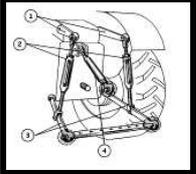
<p>Crochet ramasseur (ISO 6489-1 : 2001)</p> 	Pour des opérations d'attelage et de dételage fréquentes	Report de charge faible (jusqu'à 2T)	
	Attelage et verrouillage automatique		
	<i>Permet un angle de tangage et de roulis de 20° min et un angle de lacet de 60° min</i>	A-coups importants entraînant une usure importante du crochet	
<p>Barre d'attelage (ISO 6489-3 : 2004)</p> 	Réglable en profondeur	Report de charge faible (allant de 0,4 à 2,7T suivant la position du point d'attelage)	
	Attelage bas		
	La barre est parfois oscillante afin de déporter le point d'attelage		
	<i>L'angle de tangage et de roulis sont ≤20°, angle de lacet de 70°</i>		
<p>Trois points (ISO 730-1:2009)</p> 	3 barres	Permettent un attelage rigide et compact des machines portées	Problème de verrouillage en vertical
		<i>On distingue 4 catégories suivant la puissance à la prise de force</i>	
		Les deux bras inférieurs peuvent être utilisés pour l'attelage des outils semi-portés	Tâche difficile vus les réglages de toutes les barres
	Barres réglables afin de s'adapter au point d'attelage de machine		
	Chandelles	Permettent le réglage d'aplomb	
	Bras de relevage	Positionnement de la machine en hauteur	Problème de basculement de la machine en attelage sur les bras inférieurs
Permettent le maintien des bras inférieurs			

Figure 1.5: Caractéristiques et insatisfactions des liaisons mécaniques conventionnelles

3.1.3. Configurations possibles entre modes d'attelage et liaisons

Dans le tableau de la Figure 1.6 nous présentons les liaisons implantées, en général, par défaut sur les tracteurs.

Liaison d'attelage	Mode d'attelage		
	Porté	Semi-porté	Traîné
Piton/Boule		✓	✓
Chape		✓	✓
Barre d'attelage		✓	
Bras inférieurs		✓	
Trois points	✓	✓	

Figure 1.6: Choix de la liaison d'accrochage en fonction des familles d'outils (MAP, 2006)

Il est clair que le choix est divers pour les machines attelées en semi-portées et traînées. Cette diversité est due aux besoins des machines (certaines nécessitent des attelages plus ou moins hauts, plus ou moins éloignés ou des charges plus ou moins grandes). Mais ces liaisons permettent des attelages soit très bas (piton, barre d'attelage...) soit très hauts (chape). Entre les deux, il n'existe aucune solution. Afin de palier ce manque, les utilisateurs sont amenés à utiliser des interfaces qui viennent se greffer sur les bras du relevage telle que la barre à trous dont la compatibilité mécanique avec les familles de machines est discutable (interface non normalisée).

La difficulté de manœuvrer les machines tractées a créé le besoin d'un attelage éloigné. Mais la liaison proposée (la barre d'attelage) ne résout pas entièrement le problème puisqu'on perd en capacité de charge en s'éloignant du tracteur. Cette diversité de choix rend la tâche encore plus difficile pour l'utilisateur et contribue à l'accroissement des possibilités d'incompatibilités du matériel, et donc remet en cause les liaisons tracteur-outils.

En ce qui concerne l'utilisation des différentes liaisons, on peut dire, suite à l'analyse du besoin effectuée auprès des experts et une enquête que nous avons menée auprès des concessionnaires (travail réalisé par un étudiant en License Professionnelle), que la chape est peu utilisée au niveau de la France, où le piton est largement utilisé. Mais ce constat n'est pas vrai pour l'Europe. Ces différences d'utilisation sont liées au type de cultures exercées, aux outils utilisés et en grande partie aux habitudes. La chape est préférable avec les outils où un bon dégagement est nécessaire. Le piton est caractérisé par l'importance du report de charge qu'il procure. La barre d'attelage est utilisée avec des machines nécessitant des grands angles de braquages, mais du fait de son recul important, elle est destinée à des machines peu lourdes.

Enfin, les différentes liaisons d'accrochage se distinguent par des caractéristiques mécaniques qui leurs sont propres et qui peuvent être résumées par:

- Report de charge;
- Effort de traction;
- Accrochage rigide;
- Accrochage avec jeu;
- Hauteur de l'accrochage.

Ces caractéristiques peuvent être différentes pour une même liaison en fonction de la puissance à la prise de force du tracteur c'est-à-dire en fonction de sa catégorie (ISO 730-1:2009).

3.2.Liaisons de transmission de puissances

L'énergie transmise du tracteur à la machine est de nature : mécanique, hydraulique, pneumatique, électrique et électronique.

3.2.1. Transmission mécanique de puissance

Aujourd'hui, cette fonction est remplie par l'arbre de transmission à cardan (Figure 1.7), qui est animé, côté tracteur, par la prise de force. Cette dernière tourne dans le sens des aiguilles d'une montre et présente deux vitesses de rotation normalisée, 540 et 1000 tr/min. Les dimensions et la position de l'ATC sont définies en fonction de la puissance du tracteur (ISO 500-1:2004). L'arbre de transmission à cardan est aussi normalisé (NF EN 12965+A2:2009). Il est protégé par un protecteur homologué qui correspond à une enveloppe fixe, équipée aux extrémités de bols de protections. Ces derniers sont, le plus souvent, réalisés en matière plastique.

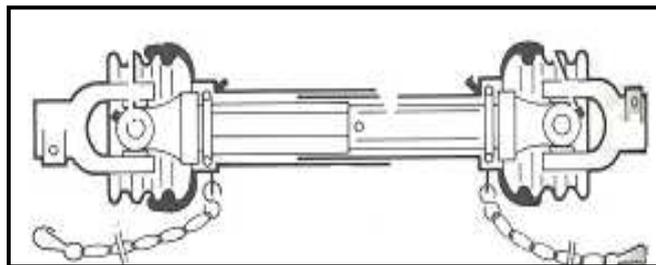


Figure 1.7: Arbre à cardans

3.2.2. Transmission hydraulique et pneumatique de puissance (NF ISO 15171-1:2001)

Les machines peuvent recevoir du tracteur l'énergie hydraulique (allant jusqu'à 200 bars) servant à alimenter des moteurs et des vérins hydrauliques. Les flexibles provenant de la machine sont branchés sur des raccords rapides. On distingue deux types de raccords: à visser et à pousser-tirer (Figure 1.8).

La puissance pneumatique est de moins en moins utilisée dans le cadre des liaisons tracteur-outils parce qu'elle nécessite une mise en place particulière, là où l'hydraulique s'impose facilement puisqu'il est présent sur le tracteur.

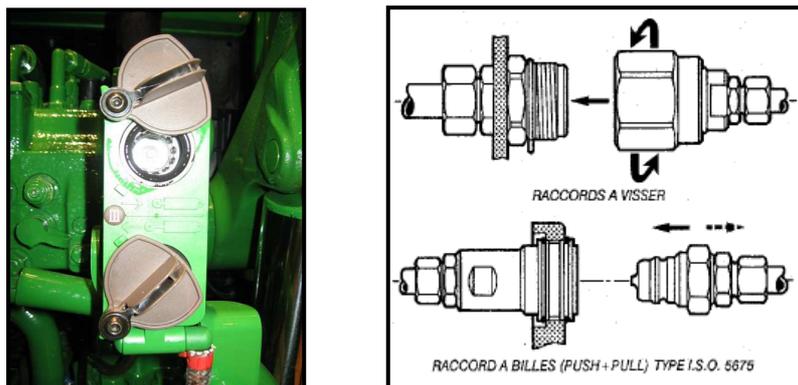


Figure 1.8: Prises hydrauliques

3.2.3. Transmission électrique de puissance (NF ISO 1724 : 2004)

La principale utilisation de l'électricité sur les machines concerne l'éclairage et la signalisation. Les normes appliquées aux véhicules routiers sont reprises pour les engins agricoles, en particulier au niveau de la prise électrique à sept contacts (Figure 1.9).

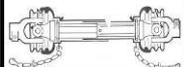


Figure 1.9: Prise électronique (à droite) et électrique (à gauche)

L'électronique (ISO 11783-1 : 2008) de plus en plus utilisée (contrôle de position, aide à la conduite, mesure et contrôle des quantités de produits...) nécessite aussi une alimentation électrique.

3.2.4. Spécificités des liaisons de transmission d'énergie

La Figure 1.10 résume les utilisations et les insatisfactions des liaisons de transmission d'énergie. Les informations proviennent notamment de la description du besoin effectuée et l'analyse des données fournies par les normes (*en italique*).

Liaisons		Caractéristiques	Insatisfactions
Mécanique NF EN 12965+A2:2009	Arbre coulissant	Permet de s'adapter aux écartements entre le tracteur et la machine	Problème de longueur
		<i>Vitesse de rotation normalisée à 540 et 1000 tr/min</i>	Difficulté des connexions et masse importante
	Protecteur	Protéger l'opérateur des happements potentiels par l'arbre tournant à grande vitesse	Problème de fiabilité par rapport à la durée de vie de l'arbre
	 Croisillons	Permettent de transmettre un mouvement avec un décalage angulaire des axes	Graissage difficile
Chaînettes	Empêchent le protecteur de tourner	Résistent mal aux efforts imposés	

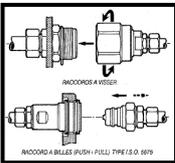
Hydraulique NF ISO 15171: 2001 	Flexibles	Permettent d'alimenter la machine par la puissance hydraulique nécessaire Pression max présente sur le tracteur: 200 bars	Problèmes de longueur Problèmes de pression résiduelle
	Connectiques	2 types: <i>push-pull</i> et à visser	Incompatibilité des raccords entre machine et tracteur Exigüité des espaces entre les prises Problème de pollution
Electrique NF ISO 1724:2004/ électronique ISO 11783:2008 	Câbles	Permettent d'alimenter la machine par la puissance électrique nécessaire	Problèmes de longueur des câbles
	Connectiques	2 connectiques: une pour les composants électriques (12 ou 24V) l'autre pour les composants électroniques (5V)	Incompatibilité des raccords entre machine et tracteur

Figure 1.10: Caractéristiques et insatisfactions des liaisons de transmission de puissance

3.3.Liaisons mécaniques non commercialisées

Cependant, les liaisons ne se limitent pas à celles présentées précédemment. Celles-ci font l'objet de beaucoup d'innovation à travers des brevets d'invention.

Afin de faciliter l'accouplement de la machine au tracteur, différentes liaisons ont été développées se greffant à la liaison trois points (coupleur en A, en U, à rotules...). Ces coupleurs ont fait l'objet de normalisation.

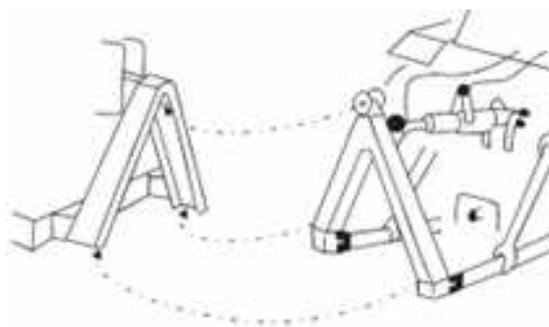


Figure 1.11: Coupleur en A (NF ISO 11001-2:1997)

Bien que tous les membres du groupe de travail soient d'accord sur le fait que ces coupleurs (Figure 1.11) facilitent d'une manière conséquente les opérations d'accrochage des outils au tracteur, ils ne connaissent pas la cause de son manque d'utilisation et de commercialisation. De plus, ces liaisons bénéficient de deux grands avantages : elles sont peu coûteuses et adaptables au parc outils existants.

Notre participation au SIMA 2007 (Salon International du Machinisme Agricole) nous a apporté un premier élément de réponse. D'abord, ces coupleurs rendent difficile l'accrochage des liaisons de transmission de puissance du fait qu'ils rendent l'accessibilité encore plus difficile. Ensuite, l'accrochage est facilité sur un sol "plat" et si l'on arrive à aligner correctement le tracteur avec l'outil, ce qui est rarement le cas en conditions réelles d'utilisation. Ces solutions montrent un manque de prise en compte de l'environnement dans lequel les liaisons vont être exploitées et plus spécifiquement de la particularité du tracteur, de la machine et du sol.

La consultation de la base des brevets disponible au SYGMA (Syndicat professionnel des constructeurs de tracteurs et machines agricoles), nous a permis de recenser environ 500 brevets déposés de 2000 à 2006 (environ 200 sur les liaisons de transmissions de puissances et 300 sur les liaisons d'accrochages mécaniques). Ces brevets concernent la modification d'une partie d'une liaison ou la proposition de solutions nouvelles (celles-ci sont souvent inspirées des liaisons existantes). Ce constat montre d'une part, un vrai besoin de proposition d'une nouvelle solution de liaison et d'autre part, la difficulté de se séparer de l'existant étant donné qu'il satisfait l'utilisateur en matière de besoins techniques.

Synthèse du chapitre I et objectifs industriels

Dans ce chapitre, nous avons expliqué le contexte applicatif qui constitue le cadre de nos travaux. Il s'agit des liaisons tracteur-outils, les systèmes qui permettent de lier un tracteur à un outil et d'animer ce dernier à travers l'énergie qui existe sur le tracteur. Ces liaisons sont à l'origine de nombreux accidents de nature essentiellement mécanique. Elles ne sont pas protégées par les réglementations du fait de leur rôle d'interface entre le tracteur et l'outil. Les modes d'attelage d'un outil sont au nombre de trois : porté, semi-porté et traîné. Chacun a ses particularités en caractéristiques mécaniques nécessaires. Enfin, nous avons montré la diversité des liaisons et rapidement expliqué l'origine des accidents qui résident essentiellement dans le manque de prise en compte de la particularité de l'environnement et des interactions des liaisons avec ce dernier. Une des liaisons les plus accidentogènes constitue le résultat de 80 ans d'évolution de la liaison trois points inventé en 1928 par H. Ferguson. Depuis, cette liaison n'a connu que des adaptations en vue notamment d'assurer la transmission de l'énergie. Cependant, les tracteurs et les machines agricoles sont en perpétuelle évolution et augmentent en taille, complexité, variété et sophistication.

L'objectif industriel de ce travail de thèse consiste à trouver des voies de solution pour la sécurisation des liaisons d'interfaçage entre le tracteur et la machine agricole. La sécurité sera considérée comme un aspect fondamental auquel la conception doit répondre aussi bien que pour les aspects techniques, particulièrement par une large prise en compte du retour d'expérience relatif à l'utilisation des liaisons actuelles.

La question qui se pose est : *comment prendre en considération la sécurité des utilisateurs dans la conception des produits ?* Le chapitre suivant introduit l'état de l'art du concept de la sécurité ainsi que ses possibilités d'intégration dans la conception. L'aspect de prise en compte de la sécurité des utilisateurs finaux par les méthodes et théories de la conception est également détaillé.

Chapitre II

Etat de l'art: Sécurité et Conception

Le monde que nous avons créé est le résultat de notre niveau de réflexion, mais les problèmes qu'il engendre ne sauraient être résolus à ce même niveau.
Albert Einstein

Sommaire du Chapitre II

Introduction	23
1. Risque.....	23
1.1. Identification du risque.....	24
1.2. Evaluation du risque.....	25
2. Evaluation des risques d'un système technique : la Sûreté de fonctionnement.....	28
2.1. Méthodes de Sûreté de Fonctionnement	28
2.2. Indicateurs de la sûreté de fonctionnement	33
3. Prise en compte de l'humain dans l'évaluation des risques	35
3.1. Ergonomie	35
3.2. Analyse du retour d'expérience	39
3.3. Mesures de sécurité – Notion de barrières	42
4. Intégration de la sécurité dans les approches de conception.....	47
4.1. Point de vue ergonomique.....	47
4.2. Point de vue mécanique.....	49
5. Intégration des méthodes et théories de la conception.....	65
5.1. Approche systématique	66
5.2. Intégration de l'Analyse Fonctionnelle et de TRIZ	68
5.3. Extended Axiomatic Design (EAD).....	69
5.4. Intégration de TRIZ et de l'AD	70
5.5. Méthode de Conception Intuitive	70
6. Problématique Scientifique de la thèse	71
Synthèse du Chapitre II.....	74

Introduction

Ce chapitre a pour finalité de faire comprendre ce qu'est la sécurité, son analyse et son évaluation lors de la conception et les moyens d'y parvenir. Dans un premier temps, nous montrons comment aujourd'hui les risques sont analysés et évalués. Dans un deuxième temps, nous expliquons la sécurité vue par les méthodes de sûreté de fonctionnement. Ces méthodes considèrent la sécurité comme l'amélioration de la fiabilité des composants des systèmes. Dans un troisième temps, les modes de prises en compte de l'humain dans l'évaluation des risques sont présentés. Ces modes proposent d'incorporer d'une part, les limites du corps humain et d'autre part, le retour d'expérience issu de la situation d'utilisation d'un produit. Les moyens actuels dont le concepteur dispose pour améliorer la sécurité sont exposés. Ces moyens consistent dans la mise en place de barrières de sécurité. L'analyse des effets de ces barrières, en mode virtuel, est expliquée. Dans un quatrième temps, nous développons le concept de prise en compte de la sécurité dans les approches de conception des produits. Nous distinguons ainsi le point de vue des ergonomes de celui des mécaniciens. Les ergonomes dégagent les besoins et par suite un certain nombre d'exigences à considérer pour améliorer la sécurité des utilisateurs. Les mécaniciens proposent une formalisation des démarches de conception appelées méthodes et théories de la conception. Ces méthodes et théories sont censées intégrer tout type d'informations, la sécurité entre autre, lors de la conceptualisation d'un produit. Cet état de l'art va nous permettre d'énoncer la problématique scientifique de nos travaux. Enfin, nous concluons ce chapitre par une synthèse critique des différents concepts, de la sécurité et de la conception.

1. Risque

La sécurité est définie comme l'absence d'un effet indésirable. Le risque est défini comme la possibilité qu'un effet indésirable puisse se produire (Hollnagel, 2008a). Ainsi, l'état de sécurité correspond à l'élimination, la prévention ou la protection des risques. (Villemeur, 1988) définit la sécurité comme "*l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des évènements critiques ou catastrophiques*". La directive 2006/42/CE (Directive, 2006) considère que "*la machine doit être conçue et construite pour être apte à assurer sa fonction et pour qu'on puisse la faire fonctionner, la régler et l'entretenir sans exposer quiconque à un risque lorsque ces opérations sont effectuées dans les conditions prévues par le fabricant, mais*

*en tenant également compte de tout mauvais usage raisonnablement prévisible. Les mesures prises doivent avoir pour objectif de **supprimer tout risque** durant la durée d'existence prévisible de la machine, y compris les phases de transport, de montage, de démontage, de mise hors service et de mise au rebut".* Cette définition montre l'importance (1) de prendre en considération les aspects liés à la santé-sécurité des utilisateurs lors de la conception et du développement du produit; et (2) de considérer toutes les phases de vie du produit susceptibles de nécessiter une interaction avec l'utilisateur.

La sécurité et le risque sont deux notions indissociables, étant donné que la présence de l'un induit l'absence de l'autre. D'une manière générale, le processus de réduction des risques pour améliorer la sécurité est basé sur quatre étapes : (1) identifier s'il existe un risque et comprendre sa nature; (2) comprendre le mécanisme de son apparition; (3) l'évaluer (4) trouver les moyens pour son élimination ou sa réduction (Hollnagel, 2008b).

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons principalement au point de vue de la normalisation pour expliquer le concept du risque, son analyse et son évaluation.

1.1. Identification du risque

Selon la norme (ISO, 2007), l'identification du risque consiste à identifier les phénomènes dangereux. Ces derniers sont ou bien présents en permanence pendant l'utilisation normale de la machine ou peuvent apparaître de manière inattendue.

Définitions :

Phénomène dangereux : source potentielle de dommage.

Situation dangereuse : situation dans laquelle les personnes, le système ou l'environnement sont exposés à un phénomène dangereux.

Evènement dangereux : suite de faits susceptibles de causer un dommage.

L'identification du risque lié à la conception d'une machine nécessite d'abord, une description du fonctionnement du système étudié. Cette description doit tenir compte, pour chaque phase du cycle de vie, des conditions d'utilisation, des limitations dans l'espace et dans le temps.

Les conditions d'utilisation décrivent d'abord, les différents modes de fonctionnement et les procédures d'intervention des utilisateurs. Ces limites doivent différencier la typologie des utilisateurs (suivant le sexe, l'âge, les capacités physiques...) et ainsi les niveaux attendus de formation, d'expérience et d'aptitude des utilisateurs doivent également être considérés. Enfin, il convient de tenir compte de la possibilité d'exposition d'autres personnes que l'utilisateur. La limite dans l'espace prend compte des amplitudes des mouvements requis et des postures; des exigences anthropométriques des utilisateurs et de l'interaction "homme-machine" (ISO, 2007). La limite dans le temps correspond à la durée de vie du système et de ses composants et des fréquences d'entretien recommandées.

Une fois le phénomène dangereux identifié, nous procédons à son évaluation.

1.2. Evaluation du risque

L'évaluation ou la mesure du risque est définie comme la "*mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un évènement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences*" (Villemeur, 1988). Pour le risque d'atteinte à la santé des utilisateurs, la norme (ISO, 2009) le définit comme "*la combinaison de la probabilité et de la gravité d'une lésion ou d'atteinte à la santé pouvant survenir dans une situation dangereuse*". La norme (ISO, 2007) décrit les différents composants du risque à prendre en compte (Figure 2.1). Elle précise les paramètres à considérer pour l'estimation de la gravité et de la probabilité.

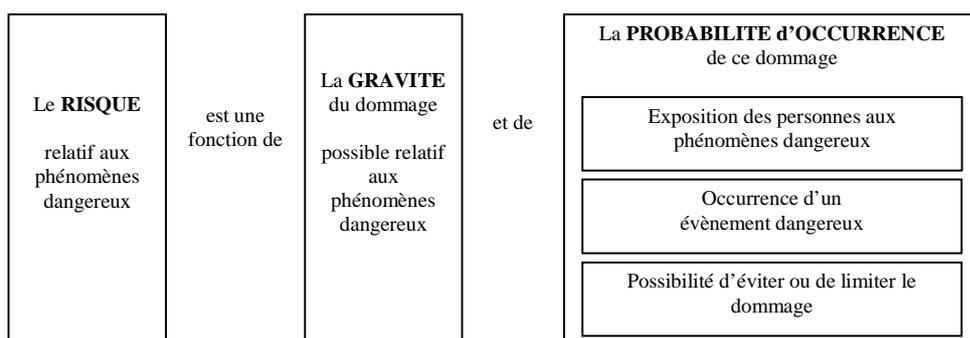


Figure 2.1 : Les paramètres du risque

1.2.1. Evaluation de la gravité

La mesure des effets et conséquences correspond à l'évaluation de la gravité d'un risque.

La gravité d'un phénomène dangereux est évaluée suivant la gravité du dommage ou des conséquences pouvant en résulter. Dans ce sens, le retour d'expérience peut s'avérer d'une grande valeur pour avoir une ligne de base afin mener à bien une telle évaluation.

L'évaluation des conséquences peut être qualitative telle que : mineure, modérée, sérieuse et catastrophique; à laquelle on peut rattacher une estimation quantitative telle qu'une valeur de 1 à 4. Cette estimation de la gravité doit se faire en considérant une cible bien définies telle que (ISO, 2007) :

- les personnes (le nombre de décès, de blessures ou de maladies);
- les biens (la valeur du bien ou de l'équipement endommagé);
- les coûts (la durée durant laquelle la productivité sera perdue);
- l'environnement (pollution, ...)
-

Ainsi, si l'objectif de l'étude est de favoriser la sécurité des personnes, les niveaux de gravité peuvent correspondre à:

- **Catastrophique:** décès ou blessure ou maladie invalidante permanente (impossibilité de reprendre le travail);
- **Sérieuse:** blessure ou maladie sérieuse (arrêt de travail de longue durée);
- **Modérée:** blessure ou maladie significative nécessitant plus que les premiers soins;
- **Mineure:** aucune blessure ou blessure légère ne nécessitant que les premiers soins.

Il faut noter qu'il existe de nombreuses échelles possibles pour évaluer la gravité du dommage. Cette estimation dépend des objectifs en matière de sécurité, de la politique propre à l'entreprise et des jugements des experts sécurité.

1.2.2. Evaluation de la probabilité d'occurrence

Pour chaque phénomène dangereux, il convient d'évaluer la probabilité d'occurrence du dommage. De même que pour la gravité, le processus de choix de la probabilité d'un incident est

aussi subjectif. Dans ce sens le retour d'expérience et la présence de personnes expérimentées peut s'avérer d'une grande valeur.

L'évaluation de la probabilité peut être qualitative telle que : rare, improbable, probable et très probable; à laquelle on peut rattacher une estimation quantitative telle qu'une valeur de 1 à 4 ou de 0 à 1. Cette estimation de la probabilité doit comporter les éléments suivants:

- la fréquence et la durée d'exposition à un phénomène dangereux;
- un historique machine/tâche;
- l'environnement de travail;
- la fiabilité des fonctions de sécurité;
- la possibilité de contourner les mesures de protection;
- l'aptitude à maintenir des mesures de sécurité;
- l'aptitude à éviter le dommage.

Ainsi, une estimation de la probabilité peut être exprimée comme suit:

- **Très probable:** presque certain de se produire;
- **Probable:** peut se produire;
- **Improbable:** pas probable de se produire;
- **Rare:** la probabilité de se produire est presque nulle.

De même que pour la gravité, il existe de nombreuses échelles possibles pour évaluer la probabilité d'occurrence du dommage.

1.2.3. Matrice du risque

Les résultats de l'appréciation du risque sont placés suivant la probabilité évaluée et les conséquences possibles dans une matrice appelée la matrice du risque. La position du risque dans la matrice montre l'acceptabilité ou la non-acceptabilité du risque (Figure 2.2).

Probabilité \ Gravité	Rare	Improbable	Probable	Très probable
Classe I ou Effets mineurs	Négligeable	Négligeable	Faible	Moyen
Classe II ou Effets modérés	Négligeable	Faible	Moyen	Elevé
Classe II ou Effets sérieux	Faible	Moyen	Elevé	Elevé
Classe IV ou Effets catastrophiques	Faible	Moyen	Elevé	Elevé

Figure 2.2 : Matrice du risque

Etant donné que le processus d'appréciation du risque est subjectif, les niveaux de risques seront également subjectifs. Dans cette évaluation, le niveau d'acceptabilité est laissé à l'expert, puisque la décision prise dépend de nombreux facteurs tels que: la culture, la situation et la durée.

Ce premier aperçu du risque permet d'en dégager les points essentiels, à savoir: le phénomène dangereux (la source du danger), les  v nements ayant conduit à la situation dangereuse, les éléments impliqués dans l'évaluation; les conséquences, la gravité et les composants exposés (cibles).

2. Evaluation des risques d'un système technique : la Sûreté de Fonctionnement (Villemeur, 1988)

2.1.Méthodes de Sûreté de Fonctionnement

Les méthodes de Sûreté de Fonctionnement (SdF), appelée aussi méthodes d'analyse systémique de la conception, sont les méthodes les plus classiques visant à comprendre l'apparition d'effets indésirables en recherchant les dysfonctionnements concourants à des  v nements indésirables (Villemeur, 1988). Toutes les méthodes de la SdF reposent sur une première étape d'analyse basée essentiellement sur les techniques de l'analyse fonctionnelle interne : recensement des fonctions, des éléments du milieu d'utilisation, des relations entre les composants du système et l'environnement... Cette étape est celle du recueil des premières informations relatives notamment aux composants du système et à ses caractéristiques techniques et fonctionnelles. D'une manière générale, on distingue deux types de démarches dans l'analyse de la sûreté de fonctionnement : inductive et déductive (Belmonte, 2008; Villemeur, 1988).

2.1.1. Méthodes inductives

Dans les méthodes inductives, la défaillance (ou l'effet indésirable) d'un élément est présumée. L'analyse qui suit détermine les événements que cette défaillance pourrait provoquer. Cela consiste à raisonner du *plus particulier au plus général* et à répondre à des questions du type "que se passe t-il si...?". Parmi les méthodes inductives, nous citons l'Analyse préliminaire des risques ou des dangers (APR ou APD), l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE), la Méthode de l'arbre des conséquences (MACQ). Ici, nous développons les concepts principaux de l'APR et de l'AMDEC. Le lecteur intéressé par plus d'informations peut se référer à (Villemeur, 1988).

Analyse préliminaire des risques ou des dangers (APR ou APD)

Comme son nom l'indique, cette approche est préliminaire à d'autres études complémentaires de sûreté de fonctionnement notamment lorsqu'un danger est mis en évidence dès les premières phases de la conception. Son objectif est d'identifier, pour toutes les phases de vie d'un système/sous-système/composant spécifié, les phénomènes dangereux, les situations dangereuses et les évènements dangereux. Ensuite, il s'agit d'évaluer la gravité des conséquences liées aux situations dangereuses et aux accidents potentiels.

L'identification des risques est effectuée à l'aide des données issues d'un retour d'expérience, du jugement des experts et de l'analyse de l'environnement aidés par l'utilisation de check-lists élaborées pour un domaine précis et régulièrement enrichies. Enfin, des actions correctives sont proposées, afin d'anticiper les risques. Les résultats de cette analyse sont capitalisés dans un tableau à 11 colonnes (Figure 2.3) regroupant les informations suivantes:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Système ou fonction	Phase	Entités dangereuses	Evènements causant une situation dangereuse	Situation dangereuse	Evènement causant un accident potentiel	Accident potentiel	Effets ou conséquences	Classification par gravité	Mesures préventives	Application de ces mesures

Figure 2.3 : Grille d'Analyse pour l'APD

Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE)

La méthode d'Analyse par Mode de Défaillances et de leurs Effets (AMDE) est utilisée pour l'étude systématique des causes et des effets des défaillances qui peuvent affecter les composants de ce système.

Son objectif est d'abord, d'évaluer les effets de chaque mode de défaillance des composants des systèmes sur les différentes fonctions du système et puis, d'identifier les modes de défaillance ayant des effets majeurs sur la sûreté de fonctionnement. La méthode repose sur quatre étapes principales: (1) la définition du système, ses fonctions et ses composants; (2) l'établissement pour chaque composant des modes de défaillances et de leurs causes; (3) l'étude des effets des modes de défaillance et (4) la proposition d'actions correctives.

Tout comme l'APR, cette méthode repose sur une grille d'analyse qui permet d'identifier le composant étudié, de relever pour ce composant toutes ses fonctions, de recenser les modes de défaillance, de définir les causes possibles de ces défaillances et leurs conséquences sur le système, de lister les moyens de détection et de donner les périodicités de contrôles. Mais cette grille peut être adaptée et modifiée selon les objectifs et le système étudié.

L'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) est une extension de l'AMDE. Elle se compose d'une AMDE et d'une analyse de criticité. La criticité est appréciée en tenant compte du couple gravité-probabilité du mode de défaillance. On définit, généralement, la gravité et la probabilité par une appartenance à une classe de criticité. De manière générale, la criticité sera d'autant plus importante que la gravité et la probabilité d'occurrence sont importantes. Il convient de noter que la criticité doit tenir compte de la probabilité de détection de la défaillance. En effet, si la défaillance est détectée, un plan de récupération est envisageable, ce qui permettra d'en limiter l'effet.

2.1.2. Méthodes déductives

Dans les méthodes déductives, l'événement final est présumé et les circonstances qui pourraient provoquer cet événement final sont ensuite recherchées. Cela consiste à *raisonner du plus général au plus particulier* et à répondre à des questions du type "quelle est la cause de...?". Parmi les méthodes déductives nous citons, la Méthode de Diagramme de Succès (MDS) et la

Méthode par Arbre des Causes (MAC).

Méthode du Diagramme de Succès (MDS)

La méthode du Diagramme de Succès part d'une analyse fonctionnelle interne du fonctionnement du système et des relations entre ses composants. Le diagramme permet une représentation des dépendances entre les défaillances des différents composants (Figure 2.4). On distingue deux types de défaillances:

- Les composants ou ensemble de composants, dont la défaillance entraîne la défaillance du système, sont placés en série;
- Les composants ou ensemble de composants, dont la défaillance ne provoque pas la défaillance du système, sont placés en parallèle.

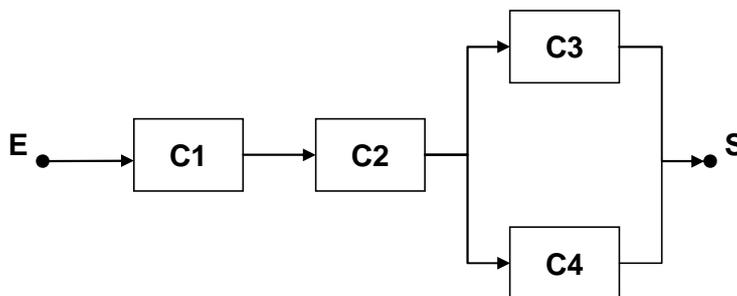


Figure 2.4 : Exemple de graphe de succès

Le diagramme de succès est relatif à une fonction donnée du système. Il admet une entrée et une sortie qui représentent des composants. Ces modélisations considèrent généralement qu'il n'existe pas un ordre de priorité des défaillances. Ainsi, elles ne permettent pas des études approfondies des modes de défaillances (Polet, 2002).

Méthode par Arbre des Causes (MAC) (Sklet, 2004; Villemeur, 1988)

Cette méthode est également connue sous les noms d'arbre des défauts ou d'arbre des défaillances (Fault Tree Analysis). Elle se base sur une représentation graphique de combinaisons logiques de causes conduisant à l'événement redouté ou événement sommet qui représente généralement l'accident et correspondant au sommet de l'arbre (Figure 2.5). Cet arbre peut aussi bien être utilisé en phase de conception qu'en analyse des accidents survenus en situation d'utilisation. Une cause est une combinaison logique de différents événements.

Cette méthode peut être utilisée d'une part, dans l'analyse d'un système (précédé par une analyse du type AMDEC) et d'autre part, dans l'analyse des accidents révélés en situation normale d'utilisation.

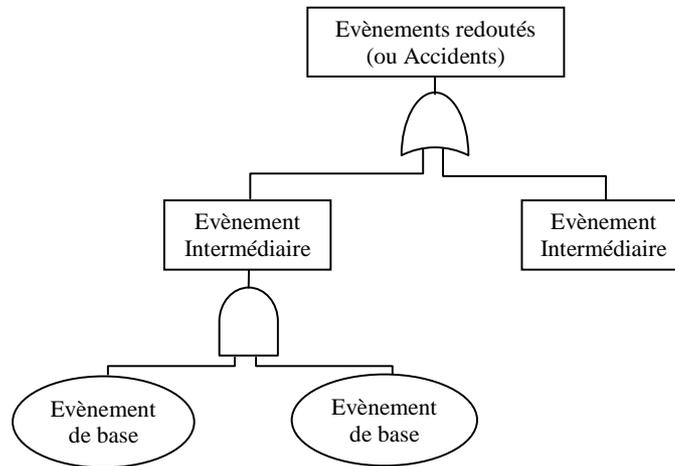


Figure 2.5 : Exemple de représentation de l'arbre des causes

Selon la taille de l'arbre, il est possible de déduire directement des résultats. En effet, de par sa représentation graphique, l'arbre constitue une image synthétique des différents chemins conduisant à l'événement redouté. Il s'agit également d'un support pour l'identification et l'installation des mesures de sécurité. La Figure 2.6 représente un arbre des causes. Cet arbre permet d'identifier 2 coupes minimales : $C1=\{E1,E2\}$, d'ordre 2 et $C2=\{E3,E4,E5\}$, d'ordre 3.

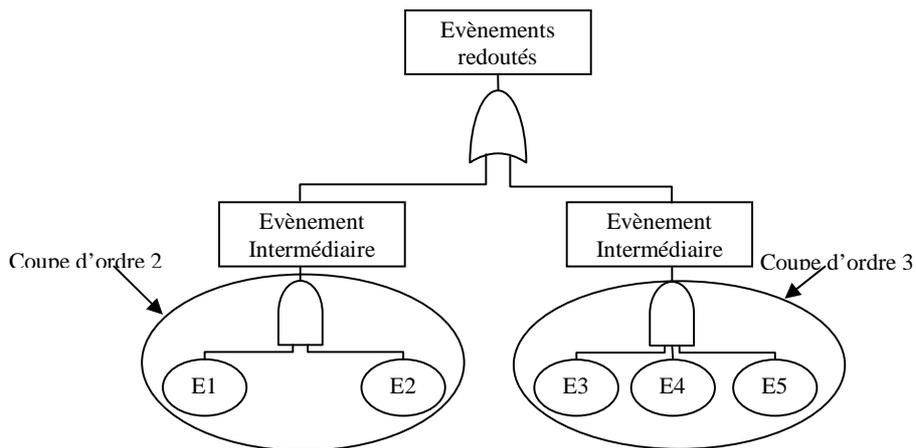


Figure 2.6 : Identification de l'ordre des coupes

La probabilité d'occurrence de l'événement redouté est :

$$P(ER) = P((E1 \cap E2) \cup (E3 \cap E4 \cap E5))$$

Des mesures de sécurité (cf. paragraphe 3.3) devront être mises en place afin d'amener l'ordre des coupes minimales à un niveau souhaité.

La MAC est une méthode permettant une analyse qualitative, par l'identification des combinaisons d'évènements, et une analyse quantitative, par l'évaluation des probabilités d'occurrence de l'évènement redouté. Néanmoins, il est impossible de tenir compte des séquences d'évènements, et également des modifications d'états des composants et notamment des réparations (Polet, 2002). Enfin, sa mise en œuvre s'avère rapidement difficile pour les systèmes complexes, de par la difficulté rencontrée à recenser tous les évènements et combinaisons possibles.

Un tableau récapitulatif des principales méthodes et de leurs caractéristiques est donné par (Fadier, 1994). Nous n'en montrons que les méthodes exposées précédemment (Figure 2.7).

Caractéristiques intrinsèques Méthodes	Nature de la méthode		Evènement considéré au début de l'analyse	Recherche des combinaisons de défaillance	Moyens de représentation associés à la méthode
	Inductive	Déductive			
AMDEC	Oui		Modes de défaillance des composants	Non	Tableau d'analyse
APR	Oui		Evènements initiateur	Non	Tableau d'analyse
MACQ	Oui		Evènements initiateur	Oui	Arbre des conséquences
MDS		Oui	Fonctions du système	Oui	Diagramme de succès
MAC		Oui	Evènements initiateur	Oui	Arbre des causes

Figure 2.7 : Tableau récapitulatif de quelques méthodes de Sûreté de Fonctionnement et de leurs caractéristiques

2.2. Indicateurs de la sûreté de fonctionnement (Villemeur, 1988)

La sûreté de fonctionnement est caractérisée par des attributs auxquels sont associés des indicateurs. Ces indicateurs peuvent être prédits lors d'une analyse en amont ou mesurés en situation opérationnelle. Parmi ces indicateurs, nous notons :

La fiabilité R (Reliability) – c'est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction

requis, dans des conditions données et pendant un intervalle de temps donné. C'est la probabilité que le produit ne soit pas défaillant sur l'intervalle $[0,t]$. Elle est définie à partir du taux de défaillance λ qui varie avec le temps. Pour un système, dont le taux de défaillance est constant dans le temps, c'est-à-dire pendant la période de vie utile : $R(t) = e^{-\lambda t}$.

La maintenabilité M (Maintainability) – c'est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise lorsque la maintenance est accomplie après une défaillance. C'est la probabilité que l'élément soit réparé dans l'intervalle $[0,t]$. Elle est définie à partir du taux de réparation μ qui varie avec le temps. Pour un système, dont le taux de réparation est constant dans le temps : $M(t) = 1 - e^{-\mu t}$.

La disponibilité A (Availability) – c'est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise dans des conditions données et à un instant donné. C'est la probabilité que l'élément ne soit pas défaillant à l'instant t . Dans le cas d'un élément non réparable; on a $A(t) = R(t)$. D'où la disponibilité d'un élément dépend à la fois de sa fiabilité et de maintenabilité et s'écrit: $A(t + dt) = A(t).(1 - \lambda dt) + (1 - A(t)).\mu dt$.

La sécurité S (Safety) – c'est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques. C'est la probabilité d'éviter de faire apparaître un événement indésirable.

En effet, toutes les estimations quantitatives en sûreté de fonctionnement reposent sur des calculs probabilistes qu'un événement apparaisse. Elle concerne principalement le point de vue système et ses modes de dysfonctionnements. Cette discipline prend en compte d'une manière indirecte la sécurité des utilisateurs. Elle sous-entend que tant que le système fonctionne "comme prévu", les utilisateurs sont en sécurité. Ainsi, l'étude de l'insécurité des humains issue de l'interaction avec le système n'est considérée qu'à travers les probabilités de défaillances de ce dernier.

3. Prise en compte de l'humain dans l'évaluation des risques

3.1. Ergonomie

Selon la norme (AFNOR, 2009), l'ergonomie est *une discipline scientifique qui vise la compréhension des interactions entre l'homme et les autres composantes d'un système, et la mise en œuvre dans la conception de théories, de principes, de méthodes et de données pertinentes afin d'améliorer le bien-être des hommes et l'efficacité globale du système*. En d'autres termes, c'est la discipline qui a pour objectif d'améliorer les conditions de travail par la compensation des effets néfastes sur la santé de l'homme. Nous considérons que c'est l'étude des risques, issus de l'utilisation d'une machine ou d'un produit, c'est-à-dire impliquant une tâche et généralement présents en permanence dans le système. Les principes ergonomiques doivent être considérés non seulement pour l'utilisation prévue de la machine mais également pour son installation, son réglage, sa maintenance, son nettoyage, sa réparation, son démontage et son transport (ses étapes de cycle de vie). En effet, la prise en compte des aspects ergonomiques suggère d'incorporer dans le processus de conception la variabilité des caractéristiques de l'utilisateur et les effets de leurs combinaisons. Les caractéristiques humaines considérées dans la norme (AFNOR, 2009) sont les suivantes :

3.1.1. Dimensions corporelles (AFNOR, 2008a; ISO, 2005; ISO, 2008)

La machine doit être conçue en fonction des dimensions corporelles de la population visée d'utilisateurs en tenant compte; des dimensions corporelles en statiques et dynamiques en distinguant les variabilités liées à l'âge et le sexe; les plages de dimensions corporelles et de mouvements des articulations; les distances de sécurité; les dimensions des accès pour l'utilisation, le réglage, la maintenance, le nettoyage... Cependant, il faut aussi éviter les postures et les mouvements pénibles et instables (Figure 2.8).

Ainsi, la conception doit respecter la compatibilité entre les hauteurs d'utilisations (ou toute autre dimension fonctionnelle) et les mesures (statiques et issues des bonnes postures) de l'homme. De plus, un *espace suffisant* doit être prévu pour toutes les parties du corps de façon à permettre les postures et les mouvements nécessaires pour effectuer la tâche et pour faciliter l'accès et les changements de posture. La norme (AFNOR, 2008a) fournit les informations nécessaires concernant les données anthropométriques pour la conception des espaces de travail.



Figure 2.8 : Exemples de mauvaises postures

3.1.2. Postures possibles (AFNOR, 2008b; ISO, 2002; AFNOR, 2005a)

Les postures de travail doivent être aussi confortables que possible afin de faciliter l'exécution des tâches et réduire les incidences néfastes sur l'individu. Ainsi la conception de l'équipement de travail doit respecter les principes suivants:

- Eviter les postures inconfortables (torsions, flexions, inclinaisons du corps...) surtout en cas d'activités prolongées;
- Favoriser le changement occasionnel de postures lors des activités et éviter les postures statiques;
- Eviter le plus possible les positions couchés, à genoux et accroupies;
- Adapter les exigences d'effort à la position du corps;
- Tenir compte lors de la conception des espaces de travail, des angles visuels, des distances de vision, de la facilité de discrimination visuelle; de la durée et des fréquences des tâches.

3.1.3. Mouvements du corps (AFNOR, 2008b; ISO, 2002)

Les machines doivent être conçues de manière à permettre au corps ou à certaines parties du corps de se mouvoir selon leur angle et leur rythme naturels de mouvement. La conception ne doit pas exiger de l'utilisateur d'adopter des angles articulaires extrêmes sur une longue période de temps. Ainsi, un certain nombre de principes doit être respecté lors de la conception des équipements. D'abord, l'utilisation de la machine doit s'effectuer en ayant une liberté de mouvement suffisante afin d'éviter les postures statiques. De plus, la conception doit empêcher les mouvements répétitifs susceptibles de provoquer une incapacité ou des lésions corporelles.

Ensuite, lorsque des outils sont nécessaires, l'espace de travail doit prévoir des dimensions suffisantes pour permettre leur utilisation. Enfin, il faut éviter les positions extrêmes des articulations exigeant des forces de grande amplitude.

3.1.4. Force physique (AFNOR, 2008b)

Les actions exigées pour le bon fonctionnement de la machine et demandant beaucoup de force peuvent engendrer des contraintes au système musculo-squelettique. Ces contraintes augmentent le risque de fatigue, d'inconfort et de troubles musculo-squelettiques. De ce fait, la conception des équipements doit respecter un certain nombre de principes. L'effort physique nécessaire doit être conservé au dessous du seuil acceptable pour la sécurité. Dans le cas contraire, il convient de mettre en place des auxiliaires mécaniques pour réduire cet effort. La détermination de l'effort maximal acceptable doit prendre en considération, sa direction, son amplitude et le type d'usage auquel il est destiné (Figure 2.9).

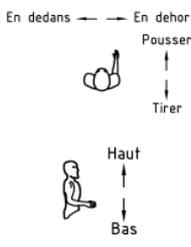
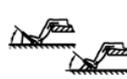
Activité		Usage professionnel F_B N	Usage domestique F_B N
	Travail avec la main (une main) : Prise à pleine main	250	184
	Travail avec le bras (posture assise, un bras) : — vers le haut — vers le bas — vers l'extérieur — vers l'intérieur — poussée • avec support du tronc • sans support du tronc — traction • avec support du tronc • sans support du tronc	50 75 55 75 275 62 225 55	31 44 31 49 186 30 169 28
	Travail avec tout le corps (posture debout) : — poussée — traction	200 145	119 96
	Travail du pied (posture assise avec support du tronc) — action de la cheville — action de la jambe	250 475	154 308

Figure 2.9 : Capacité de force de base F_B pour usage professionnel et domestique — Les valeurs s'appliquent aux conditions de travail optimales

Lors de mouvements rapides, la force maximale est réduite. Cette réduction est corrigée par un multiplicateur de vitesse (m_v). La fréquence d'utilisation et la répétition des tâches

influencent aussi cette force maximale puisqu'elles entraînent le développement de la fatigue. Les effets de la fatigue dépendent de la relation entre la durée de chaque action individuelle (le temps d'action) et la fréquence des actions lors de l'utilisation des machines. Ainsi, la diminution de la force maximale est corrigée par un multiplicateur de fréquence (m_f). Enfin, la fatigue se développe progressivement avec le temps au cours du travail. Des actions qui sont similaires peuvent en s'accumulant entraîner une fatigue en répétant la contrainte toujours sur les mêmes parties du corps. Ainsi, la force maximale se retrouve influencée par la durée des actions de même nature. La diminution de la force maximale est alors corrigée par un multiplicateur de durée (m_d). D'où, la force maximale réduite (F_{BR}) par ces trois types d'effets s'exprime comme suit:

$$F_{BR} = F_B \times m_v \times m_f \times m_d$$

Enfin, la conception doit tenir compte du poids, de la forme, de la taille, de la répartition des masses et de la position des objets manipulés.

3.1.5. Capacités mentales (AFNOR, 2000)

La capacité mentale *est associée à la capacité de l'opérateur à contrôler la machine et à exécuter les tâches requises* (AFNOR, 2009). Elle prend en compte la capacité cognitive, informationnelle et émotionnelle de l'être humain. Quand la limitation mentale de l'utilisateur est dépassée, elle se manifeste par une fatigue, monotonie, vigilance réduite voire une saturation de sa part. Ainsi, pour réduire ces effets, la conception doit respecter un certain nombre de principes:

- **Répartition des tâches** : éviter le travail en simultanéité; varier les tâches; éviter d'exiger une grande attention; prévoir des objectifs intermédiaires et l'enrichissement des tâches;
- **Présentation de l'information**: éviter l'ambiguïté dans l'interprétation de l'information; laisser la liberté à l'utilisateur de travailler à son rythme; assurer une bonne visibilité du signal et prévoir que les tâches puissent être accomplies de manière individuelle;
- **Environnement de travail**: tenir compte de l'éclairage disponible; de la température; des couleurs; varier les conditions de travail;

- **Organisation du travail:** éviter la pression par les délais; favoriser la rotation des tâches avec des collègues; enrichir et varier les tâches et prévoir des pauses.

Ce deuxième aperçu du risque permet d'en dégager les points essentiels, à savoir: la tâche, sa durée, sa fréquence, sa vitesse, la posture exigée (statique, déséquilibre), les efforts exigés, les mesures du corps, les amplitudes du mouvement du corps et la notion de limitation mentale.

Tous ces principes d'ergonomie constituent des données de sécurité à prendre en considération lors de la conception. Elles admettent l'avantage d'être abstraites c'est-à-dire indépendantes du domaine d'application. Elles se limitent à décrire les contraintes dues aux caractéristiques humaines. En revanche, les normes ne donnent pas le moyen d'intégration de ces principes aux différentes étapes du processus de conception. En conséquence, elles sont aujourd'hui considérées comme des contraintes d'adaptation validées à la fin du processus de conception, à l'étape de conception détaillée engendrant une complexification du produit.

3.2. Analyse du retour d'expérience

3.2.1. Modélisation de la situation de travail (Hasan, 2002)

Hasan & al. (Hasan, 2003) se placent dans une approche de conception de type ingénierie simultanée (Sohlenius, 1992) qui est un processus au cours duquel les acteurs, de différents métiers, essaient de prendre en compte toutes les phases du cycle de vie produit dès la conception (Figure 2.10). En effet, à travers une telle approche, ils ont cherché à introduire la notion de l'intégration de la sécurité au plus tôt dans la conception.

Dans ces travaux (Hasan, 2003), un modèle conceptuel permettant de décrire la dynamique du contexte d'utilisation, du comportement du système de production et de l'équipe de travail a été proposé. Ce modèle cherche ainsi à palier le manque des outils de conception actuel dans l'intégration des activités réelles de travail, du vrai contexte d'utilisation et des interactions qui en découlent. Les typologies d'éléments qui influent la situation de travail ont été extraites suite à une analyse des normes et du domaine d'application considéré « la conception d'une imprimerie ».

d'ajustement et d'adaptation afin de pouvoir fonctionner dans sa situation d'exploitation. De ce fait, la manière suivant laquelle le produit était prévu de fonctionner subit elle aussi un certain nombre de modifications ou de dérives. Ainsi, le produit vit les dérives à la fin de sa conception détaillée, lors de son intégration et enfin lors de son exploitation (Figure 2.11).

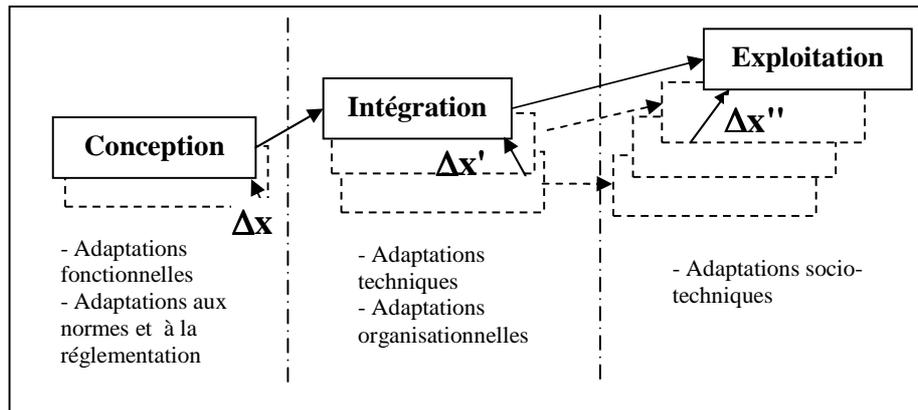


Figure 2.11 : Evolution de la déviation de la conception nominale tout au long du cycle de vie du produit (Adaptée de (Fadier, 2007))

Le système conçu est généralement une association de différents éléments : la solution de base (technique), à laquelle sont ensuite intégrés d'autres éléments afin de répondre aux besoins du client. Des ajustements peuvent alors être nécessaires, ce qui conduit à un écart ($\Delta x'$) entre la solution prévue en conception (déjà différente de l'"idéale" d'un écart (Δx) notamment par le fait que certaines contraintes comme notamment certaines normes sont impossibles à respecter) et la solution intégrée dans l'environnement où elle sera amenée à fonctionner. Ces ajustements sont soumis aux contraintes d'espace, d'interaction avec d'autres équipements, d'environnement, etc.

Les écarts entre le système prévu à être utilisé par l'utilisateur et le système réellement utilisé sont également à l'origine d'écarts entre les conditions d'utilisations prévues et les conditions d'utilisations réelles. Les conditions d'exploitation de l'outil ne correspondent pas totalement aux prévisions du concepteur : effectif, cadence, gamme de produit, matières premières, mode de fonctionnement, etc. Ceci conduit à un second écart ($\Delta x''$) entre la solution proposée en conception-intégration et la solution en exploitation. Ainsi, les prescriptions établies généralement lors de la conception ne correspondent plus à la solution réellement utilisée. D'où, on note des écarts entre le travail prescrit et l'activité réelle de l'utilisateur.

dangereux se produise. Ces barrières sont censées éliminer le risque d'accident ou au moins ralentir son développement. Les barrières de protection sont celles déclenchées une fois qu'un évènement initiateur se produit. Elles sont supposées protéger l'environnement, les personnes ainsi que le système lui-même des conséquences d'un accident. Enfin, Dujim (Sklet, 2006) proposent quatre catégories de fonctions: empêcher (ou éliminer), prévenir, contrôler et protéger. L'empêchement correspond à changer la conception d'un équipement ou d'un produit afin d'éliminer toutes les causes potentielles d'un évènement.

3.3.2. Classification des systèmes de barrières

Dans la littérature, il existe plusieurs classifications des barrières (Sklet, 2006), nous en présentons quelques unes. Communément, on distingue les barrières physiques des non-physiques. Une barrière physique consiste en un obstacle physique qui empêche le flux d'énergie d'atteindre sa cible. Une barrière non-physique correspond à des instructions ou des procédures destinées à l'utilisateur.

Cependant, Hollnagel propose une classification basée sur la nature des barrières et décomposées en quatre groupes (Hollnagel, 2008b):

- **Les barrières matérielles** : Elles interdisent physiquement l'exécution de certaines actions ou la propagation de leurs conséquences (mur, capot, portail, carter, ...).
- **Les barrières fonctionnelles** (actives ou dynamiques) : Elles gênent l'exécution de l'action en établissant, par exemple, un lien temporel ou logique entre les événements (clé de démarrage d'une machine qui est aussi la clé d'ouverture des carters).
- **Les barrières symboliques** : Elles nécessitent une interprétation afin d'être effectives (panneau de signalisation).
- **Les barrières immatérielles** : Elles demandent d'être connues par l'utilisateur pour être effectives (procédures, règlement, législation, ...).

Schupp distingue les *barrières inhérentes* des *barrières ajoutées* (Sklet, 2006). Une barrière inhérente consiste dans le changement d'un ou plusieurs paramètres de conception. Les barrières ajoutées sont des systèmes ou des composants ajoutés à la solution détaillée pour des objectifs de sécurité.

Kjellen différencie les barrières passives des barrières actives (Kjellen, 2007). Il considère comme barrière passive celle intégrée dans la conception et indépendante d'un système de contrôle. Alors qu'une barrière active fonctionne dépendamment des actions des utilisateurs ou des systèmes de contrôle.

3.3.3. Critères de performance des barrières

L'évaluation des performances des barrières est surtout maîtrisable dans l'analyse des accidents survenus suite à une séquence spécifique d'évènements (Sklet, 2004). L'analyse proactive des risques exige une analyse des performances des barrières au même titre que l'analyse des risques liés à la conception. Comme expliqué auparavant, ces barrières sont de deux natures suivant leur influence sur le flux d'énergie ou sur la séquence des évènements. Ainsi, des barrières de réduction de la probabilité d'occurrence et des barrières de prévention sont distinguées.

Hollnagel propose les critères (Figure 2.13) suivant pour étudier la qualité des barrières (Hollnagel, 2008b) :

- **L'efficacité ou l'adéquation**: l'efficacité de la barrière pour accomplir ses objectifs dans les conditions considérées;
- Les **ressources exigées** (coût): les ressources nécessaires pour sa mise en place, sa maintenance et son utilisation;
- La **robustesse**: l'aptitude à résister aux changements et à la variabilité de l'environnement;
- Le **délai d'implémentation**: le temps nécessaire de sa conception à sa mise en service;
- La **disponibilité**: l'aptitude à accomplir ses fonctions dans des conditions données et à un instant donné;
- **L'évaluation**: détermine si la barrière fonctionne et est disponible comme prévu. L'évaluation peut être jugée selon la facilité d'exécution de la barrière;
- **L'indépendance de l'humain**: le degré de dépendance de l'humain pour accomplir sa fonction.

Critère	Physique	Fonctionnelle	Symbolique	Immatérielle
Efficacité	Elevée	Elevée	Moyenne	Faible
Coût	Elevé- moyen	Moyen- faible	Moyen- faible	Faible
Robustesse	Elevée- moyenne	Elevée- moyenne	Moyenne- faible	Faible
Délais de mise en place	Long	Long- moyen	Moyen	Court
Disponibilité	Elevée	Elevée- faible	Elevée	Incertaine
Evaluation	Facile	Difficile	Difficile	Difficile
Indépendance de l'humain	Elevée	Elevée	Faible	Faible

Figure 2.13 : Evaluation de la qualité des barrières

Sklet propose d'autres attributs pour caractériser la performance d'une barrière de sécurité (Sklet, 2006) :

- **Le temps de réponse:** c'est le temps écoulé entre le déclenchement et la réalisation de la fonction d'une barrière de sécurité;
- **L'évènement ou condition de déclenchement:** c'est l'étude des conditions qui vont activer la barrière de sécurité.

Ainsi, trois types de conditions sont distingués; (1) la déviation de la situation normale d'utilisation. Ces déviations sont détectées par des capteurs; (2) l'exécution d'une activité spécifique; (3) l'exécution d'activité temporaire mais programmée.

L'implantation des barrières de sécurité peut avoir des effets indésirables comme l'augmentation des coûts, le besoin de maintenance et l'introduction de nouveaux risques (Fadier, 2006; Sklet, 2006). Ces effets doivent faire l'objet d'une analyse globale de la sécurité une fois que les mesures de sécurité sont mises en place. Dans ce contexte, Shahrokhi propose une modélisation par ordinateur afin d'analyser les risques et les effets de la mise en place des barrières (Shahrokhi, 2006b).

3.3.4. Analyse des barrières assistée par ordinateur (Shahrokhi, 2006a)

Shahrokhi propose une modélisation dynamique de l'humain et du risque afin d'informatiser l'analyse de la sécurité lors de la conception (Shahrokhi, 2006c). Ainsi, il définit les entités de risque suivantes: la cible, la zone dangereuse, le phénomène dangereux (appelé agent de danger), l'évènement dangereux et la barrière de sécurité. L'idée finale étant de mettre à la disposition du concepteur un outil qui lui permettra de simuler les effets de ses choix et des mesures de sécurité qu'il propose (barrières de sécurité). De cette manière, le concepteur a une vision globale des relations et de l'interdépendance qui existent entre les causes, les déviations et les conséquences.

La zone dangereuse est alors considérée comme un espace flou et dynamique dont les effets sont fonctions d'un côté de la distance entre le phénomène dangereux et la cible et, d'un autre côté, de la vulnérabilité de la cible. Ainsi, la zone dangereuse est considérée comme une zone d'énergie et l'index du risque est calculé en fonction de l'énergie absorbée par la cible. De ceci découle le fait qu'à une source d'énergie, on peut associer plusieurs zones dangereuses avec différents niveaux de vulnérabilité (Shahrokhi, 2006d).

Cette définition floue de la zone dangereuse est utilisée pour calculer des index de risque pour les utilisateurs qui travaillent dans l'environnement de travail. Ces index sont calculés en mesurant le degré d'appartenance de chaque membre du corps humain dans les zones dangereuses, pour chaque séquence de la simulation et la durée de ces séquences. Lors de la simulation, la dynamique de la position du danger et de l'utilisateur, et le changement de l'amplitude de danger et la protection de la cible peuvent être effectués.

Ensuite, (Shahrokhi, 2006a) s'intéresse au concept de barrière, étant donné que modifier et ajouter des barrières sont les moyens les plus couramment utilisés par les concepteurs pour réduire le risque. Selon ce modèle, une barrière peut avoir des effets sur la source de dangers, la cible, la zone dangereuse, la probabilité ou la durée de l'impact (Shahrokhi, 2006b). Ensuite, il associe le danger aux éléments du système, et utilise l'environnement 3D, pour introduire les zones dangereuses et les barrières avec leurs effets.

4. Intégration de la sécurité dans les approches de conception

Ce paragraphe s'intéresse à la sécurité des utilisateurs vue par les approches de la conception. D'une part, nous détaillons le point de vue ergonomique qui consiste à donner des préconisations à prendre en compte lors de la conception. D'autre part, nous présentons le point de vue des méthodes et théories de la conception en mécanique. Ces théories et méthodes s'intéressent plus particulièrement à proposer des outils efficaces et à rationaliser la conception et par suite la prise en compte des différentes contraintes.

4.1. Point de vue ergonomique

D'un point de vue général, les modes d'intégration de la sécurité, dans les processus de conception s'effectuent suivant deux voies (Figure 2.14) : "directes" et "indirectes" (De La Garza, 2005).

Voies directes : modalités d'intégration explicites et officielles	Voies indirectes : modalités d'intégration implicites
<ul style="list-style-type: none"> - Normes AFNOR - Normes et directives européennes - Documents internes - Certification de la machine par des organismes externes 	<p>Ces modalités peuvent concerner des choix liés aux :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Accès machine, carters - Emplacement des commandes, boutons - Flux de circulation : passerelles, plates-formes, escaliers, rambardes

Figure 2.14 : Articulation des voies directes et indirectes lors de l'intégration de la sécurité au cours d'un processus de conception d'après (De La Garza, 2005)

4.1.1. Intégration de la sécurité par voies "directes"

Les voies dites "directes" sont des modes d'intégration explicites de la sécurité. Elles sont basées sur des normes, guides ou autres documents officiels. Elles constituent des référentiels communs facilitant le dialogue et la coopération entre les acteurs de la conception. Ces référentiels sont constitués de connaissances partagées par un collectif impliqué à un moment donné dans un processus de conception.

4.1.2. Intégration de la sécurité par voies "indirectes"

Les voies dites "indirectes" se définissent comme les modes d'intégration implicites qui découlent des connaissances individuelles. Ces connaissances sont fondées sur le retour d'expérience des différents acteurs sur la situation d'exploitation (exigences et contraintes du

travail réel, retours du terrain et d'accidents).

4.1.3. Préconisations des résultats de travaux de recherche sur l'intégration de la sécurité

Une étude réalisée en milieu industriel a montré des méthodes d'intégration de la sécurité différentes d'une équipe à l'autre dans une même entreprise (De La Garza, 2007; Fadier, 2003). Cette étude propose quatre axes principaux autour desquels il est nécessaire de travailler afin d'améliorer la prise en compte de la sécurité lors de la conception des équipements (De La Garza, 2005):

4.1.3.1. Aller au delà du savoir technique

Les exigences réelles du travail, des dysfonctionnements, des usages et des modes opératoires, l'utilisation de données anthropométriques sont autant de paramètres à prendre en compte pour l'intégration de la sécurité des humains dans un projet de conception (Fadier, 2003). Une analyse des interactions voire de la coopération entre l'Humain et la Machine est aussi nécessaire afin de répartir au mieux les fonctions des deux agents (l'utilisateur et la machine).

4.1.3.2. Favoriser la conception participative

"La conception participative et le dialogue doivent être encouragés, avec, par exemple, la mise en place de réunions de conception spécifiques « sécurité » et la participation d'experts différents à des stades particuliers de la conception" (De La Garza, 2005).

Cette conception participative aurait pour effet d'une part, de sortir de la logique de conception « par module » et d'autre part, de créer des groupes de travail inter-bureaux d'études afin d'enrichir les représentations des uns et des autres sur la sécurité, les usages et les contraintes en situation d'exploitation (Dastous, 2008). L'objectif est en fait d'exploiter les connaissances, techniques et de sécurité, des personnes dès la phase de conception (Sagot, 2003).

4.1.3.3. Enrichir les phases de la conception en introduisant des critères et des objectifs de sécurité et de santé

Des objectifs de sécurité et de santé doivent être intégrés dans les cahiers des charges au même titre que les performances et les spécifications techniques.

Le but est ici d'anticiper les usages et les contraintes issus de la situation d'exploitation connue et des transformations effectuées sur les équipements déjà utilisés (Daniellou, 1992) cité dans (De La Garza, 2005).

4.1.3.4. Intégrer la sécurité portée par l'organisation des retours d'expériences

Les Retours d'EXpérience (REX) restent actuellement pauvres et non systématiques, en particulier par rapport à la sécurité et à l'usage des équipements industriels (Fadier, 2006). Le REX (et les informations provenant des utilisateurs) ainsi que sa capacité à prendre en compte des exigences d'utilisation (De La Garza, 2007) n'est pas un processus systématique utilisé dans l'amélioration de la conception; étant donné que ces informations arrivent au concepteur d'une manière narrative et peu structurée (Shupp, 2006).

4.2. Point de vue mécanique

Certains des travaux exposés ci-dessous proviennent de nos propres analyses d'autres des travaux de scientifiques qui se sont intéressés à la sécurité du point de vue des méthodes et théories de la conception des produits.

4.2.1. Point de vue de l'Analyse Fonctionnelle du Besoin

4.2.1.1. Description de l'Analyse Fonctionnelle du Besoin

"L'Analyse Fonctionnelle est une démarche qui décrit complètement les fonctions et leurs relations, qui sont systématiquement caractérisées, classées et évaluées."(AFNOR, 1996; AFNOR, 2005b). L'analyse fonctionnelle fournit un cadre de représentation des finalités d'une étude. Elle propose une sémantique de caractérisation de la situation de vie du produit et des objectifs. La situation est définie par les éléments en relation avec le produit et par la prise en compte des besoins de l'utilisateur. Ces éléments sont appelés Eléments du Milieu d'Utilisation et notés EMU.

Une notion importante de l'analyse fonctionnelle est celle des fonctions contraintes. Une contrainte traduit une relation imposée sur le système par un élément du milieu extérieur. Elle peut être due à des critères technologiques (durée de vie, sûreté de fonctionnement, robustesse, ...), structurels (masse, encombrement, résistance à l'environnement, ...), économiques (coûts:

financier, énergétique, temps, ...) et sociaux (impact environnemental, ...). L'AF définit les notions de fonction de service externe à la solution et de fonction technique interne à la solution. La base de l'analyse fonctionnelle se définit dans un document appelé le Cahier des Charges Fonctionnel (CdCF).

Dans la démarche projet, l'analyse fonctionnelle est basée sur un ensemble de techniques (outils) tel que le bloc diagramme fonctionnel et le FAST.

- **Le Bloc Diagramme Fonctionnel (ou schéma des flux)** est un outil développé à la base de l'analyse fonctionnelle, d'une part, pour visualiser les flux des fonctions de service au travers des composants de niveau inférieur et, d'autre part, pour établir les liens de contribution fonctionnelle des sous-systèmes d'un niveau donné aux fonctions de services du niveau supérieur (Yannou, 2001).

- **Le diagramme FAST (Function Analysis System Technique)** est un outil de support de créativité pour passer progressivement et de manière raisonnée des fonctions de service (attendues) aux solutions en assurant une traçabilité des choix ou rejets des principes de conception (Petiot, 2004). Elle permet de présenter pour une solution, les fonctions dans un enchaînement logique en répondant aux questions Dans quel but, Comment et Quand (Figure 2.15).

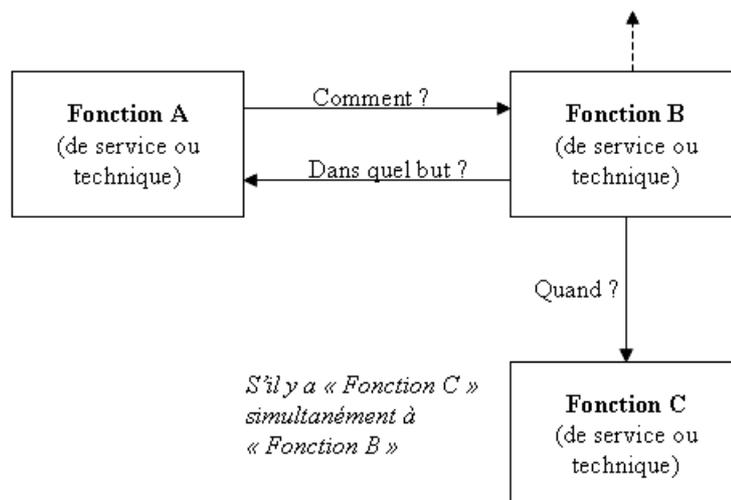


Figure 2.15 : Outil FAST

Ce diagramme permet d'établir un lien entre le besoin et l'architecture du produit,

autrement dit entre le domaine fonctionnel et le domaine structurel. C'est un moyen direct de visualisation du processus de synthèse de solution.

4.2.1.2.Sécurité et Analyse Fonctionnelle du Besoin

La notion de sécurité peut être intégrée dans l'AFB à travers l'application des normes (telles que (ISO, 2007; ISO, 2009)) et la réglementation en tant que contraintes de conception. La réglementation décrit les conditions auxquelles le produit doit répondre du point de vue sécurité. Les normes expliquent les moyens de les mettre en œuvre. Cependant, la prise en considération des normes et de la réglementation n'est pas articulée à une phase particulière de la conception (De La Garza, 2005) et intervient généralement en fin du processus de conception. En effet, l'Analyse Fonctionnelle nous a permis de prendre en considération la sécurité en (Ghemraoui, 2008) :

- Décomposant le profil de vie en différentes sous phases d'utilisation suivant les typologies des risques distinguées. Ainsi, nous avons décomposé la phase d'utilisation en plusieurs sous phases. A ce niveau, on peut se servir du retour d'expérience.
- Complétant les fonctions de services par des caractéristiques de sécurité.
- Complétant la description des Eléments du Milieu d'Utilisation (EMU) par des compléments exprimant les interactions de l'humain avec l'EMU en question.

Cependant, cette approche présente des limites. La pertinence de ces données sera évaluée et enrichie au fur et à mesure qu'on avance dans le processus de conception. Elle correspond à une analyse purement descriptive et il n'existe aucun lien avec les différents phases de conception : on ne sait pas quelles données doivent être intégrées à telle ou telle étape. En effet, les éléments identifiés dans l'analyse fonctionnelle sont capitalisés dans le cahier des charges fonctionnel d'une manière structurée mais indépendante des phases de conception d'un produit. Ainsi lors de la conception, le concepteur part des fonctions principales, ayant le plus de valeur ajoutée pour le client, élabore son produit et ensuite adapte sa solution finale aux contraintes "secondaires". D'où, dans une telle approche la sécurité vient se greffer sur le produit d'origine (Fadier, 2006) et conduit à la complication des solutions comme noté dans (Hollnagel, 2008a).

Comme noté par Bernard, toute la difficulté pour les entreprises réside dans le fait que le concepteur ne possède pas de moyens formels pour intégrer l'intégration de la sécurité dans la

conception (Bernard, 2002). La sécurité intervient soit très tôt et retarde le concepteur soit très tard et conduit à des modifications complexes et coûteuses. Cette constatation montre clairement la nécessité d'une démarche qui permet la ventilation des données accidentologiques et du retour d'expérience dans le processus de conception.

4.2.2. Point de vue de la Théorie de Résolution des Problèmes Inventifs (TRIZ)

4.2.2.1. Description de TRIZ

TRIZ est l'acronyme russe de "Théorie de Résolution des Problèmes Inventifs"; développée par Altshuller au début des années 60 (Altshuller, 2004; Altshuller, 2006), suite à une analyse d'un grand nombre de brevets d'invention. Cette analyse a montré que seulement 1% des solutions sont vraiment innovantes, les autres utilisent des idées ou des concepts déjà connus, mais d'une façon nouvelle (Cortes Robles, 2006). L'apport majeur de cette théorie, par rapport aux approches traditionnelles telles que l'Essai-erreur et le Brainstorming, est qu'elle donne des directions pour la recherche des solutions basées sur des modèles d'ingénierie. L'aléatoire réside principalement dans la formalisation du problème et l'interprétation des directions données.

L'**essai-erreur** (Seliger, 2001) est l'une des approches les plus utilisées en ingénierie pour la résolution des problèmes inventifs. Elle consiste en une génération consécutive d'idées. Il n'existe pas de règles définies qui permettent de guider la génération d'idée. Le processus de recherche de solutions est plutôt sporadique. Si une idée est considérée insatisfaisante, elle est rapidement écartée et une nouvelle idée est alors générée (Figure 2.16). Ainsi, ce flux d'idées n'est soumis à aucun contrôle avec un nombre assez important de tentatives de résolution afin de parvenir à une solution satisfaisante. Il s'agit de découvrir de nouvelles pistes quand l'une d'entre elles s'avère incorrecte et ensuite de nouvelles variantes d'une même piste.

Bien que cette méthode paraisse aléatoire, les tentatives de résolution d'un problème ont généralement une caractéristique commune: les essais sont dirigés par un vecteur d'inertie psychologique. Cette inertie est déterminée par les facteurs culturels et éducatifs, le niveau d'expérience et le bon sens. L'inertie psychologique encourage à l'exploration de nouvelles directions mais contraint l'imagination et constitue le premier obstacle pour parvenir à la meilleure solution (Seliger, 2001).

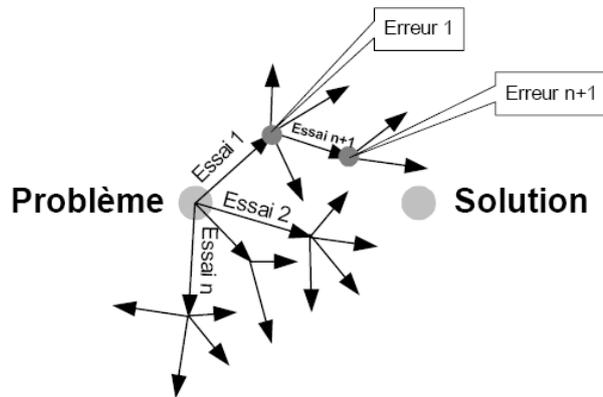


Figure 2.16 : Essai-erreur: un processus aléatoire de génération d'idées (Cavalucci, 1999)

Cependant, le **Brainstorming** (Cavalucci, 1999) admet l'atout de permettre différents points de vision (Figure 2.17). L'idée est de privilégier la pluridisciplinarité des personnes afin d'observer le problème sous divers angles. Cette multiplicité (si elle ne dépasse pas un certain stade) peut permettre de parvenir plus rapidement à la solution bien que se dirigeant de façon aléatoire dans la recherche de solutions mais reste néanmoins directement liée aux compétences des individus.

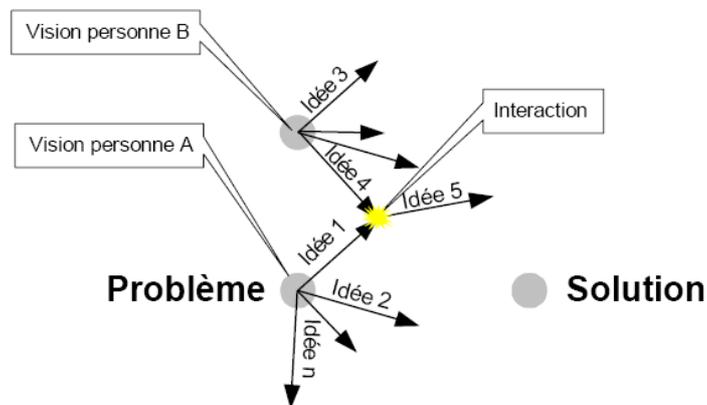


Figure 2.17 : Représentation du processus de résolution par le Brainstorming (Cavalucci, 1999)

En effet, les approches traditionnelles de résolution de problèmes partent toujours d'un problème spécifique afin de trouver la solution spécifique. Le cheminement aléatoire du problème vers la solution peut prendre un temps considérable en fonction de la complexité du problème.

TRIZ propose d'abstraire ce problème spécifique vers un problème plus générique (modèle du problème). Une fois le modèle du problème défini, il devient alors plus facile

d'identifier le modèle de la solution. Ainsi, TRIZ offre un certain nombre d'outils pour orienter ce passage du modèle du problème au modèle de la solution. Ensuite, le modèle de solution est interprété et adapté au contexte réel et spécifique. Ce cheminement systématique du problème à la solution permet alors de restreindre la zone de solutions et par suite de converger plus rapidement vers une solution satisfaisante. La Figure 2.18 montre une représentation schématique du processus de résolution des problèmes.

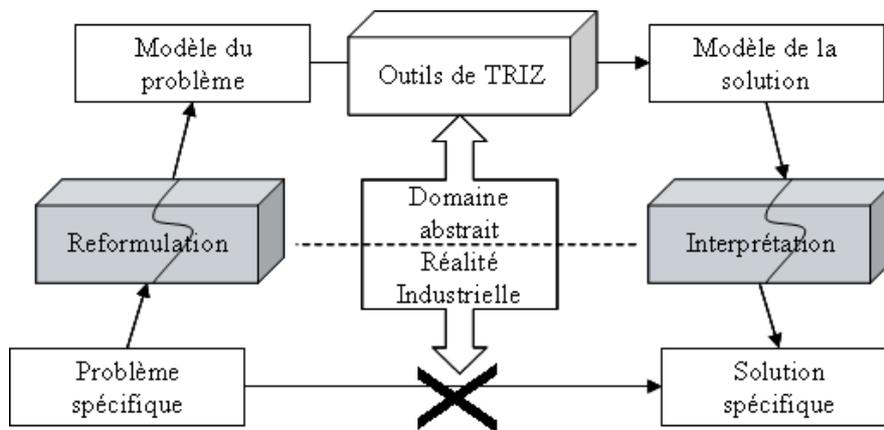


Figure 2.18 : Processus de résolution des problèmes selon TRIZ

Les concepts et outils essentiels mis en évidence par Altshuller sont les suivants:

Concept de Résultat Idéal Final

La plupart des solutions préconisées par les ingénieurs ne sont en fait que des compromis. Ce type de solution est simple à trouver, il remplit en partie l'objectif recherché sans trop dégrader l'un ou l'autre des paramètres du système étudié (Altshuller, 2004).

Selon Altshuller, un système idéal ne devrait avoir ni un poids élevé ni un grand volume. Nous parvenons au Résultat Idéal Final (RIF) lorsqu'une action est complétée et qu'il y a absence de système. Les fonctions du système doivent être accomplies de façon autonome (Cavallucci, 1999; Gogu, 1997).

Concept des contradictions (Altshuller, 2004; Cavallucci, 2008)

Les systèmes technologiques évoluent non pas aléatoirement mais en surmontant des contradictions. En fonction de la difficulté du problème à résoudre, cette contradiction est plus ou

moins apparente. La méthode conventionnelle pour sortir de cette situation consiste à trouver un compromis entre les paramètres du système. TRIZ identifie deux types de contradiction, contradiction technique et contradiction physique.

- **La Contradiction Technique** : Lorsque dans un système on améliore une caractéristique technique (ou un paramètre), une autre caractéristique (ou paramètre) s'en trouve détériorée.
- **La Contradiction Physique** : Elle oppose directement deux valeurs d'un seul et même paramètre.

Concept de lois d'évolution des systèmes technologiques (Cavallucci, 2002; Gogu, 1997)

Les systèmes techniques évoluent non pas aléatoirement mais suivant des lois objectives d'évolution. Ces lois ne dépendent pas de l'humain. Elles doivent être observées, formulées et utilisées en ordre afin de développer une méthode efficace de résolution des problèmes. Altshuller a formulé huit lois d'évolution des systèmes techniques. Chaque système technique subit ces lois indépendamment du domaine concret. Ces lois peuvent être divisées en trois groupes : Statiques, Cinématiques et Dynamiques (Cavallucci, 2002), ces 3 groupes donnent ensuite huit lois génériques (Figure 2.19).

Dans TRIZ, une fois le problème formulé, la théorie offre des outils de résolution suivant la nature du problème. Parmi ces outils on cite, la matrice des contradictions pour la résolution des contradictions techniques, les 11 principes de séparation pour la résolution des contradictions physiques, les 76 standards d'innovation pour la transformation d'une action néfaste en action utile... Tous ces outils sont structurés dans l'algorithme ARIZ de TRIZ afin de permettre une analyse plus formelle lorsqu'on est confronté à un problème technique.

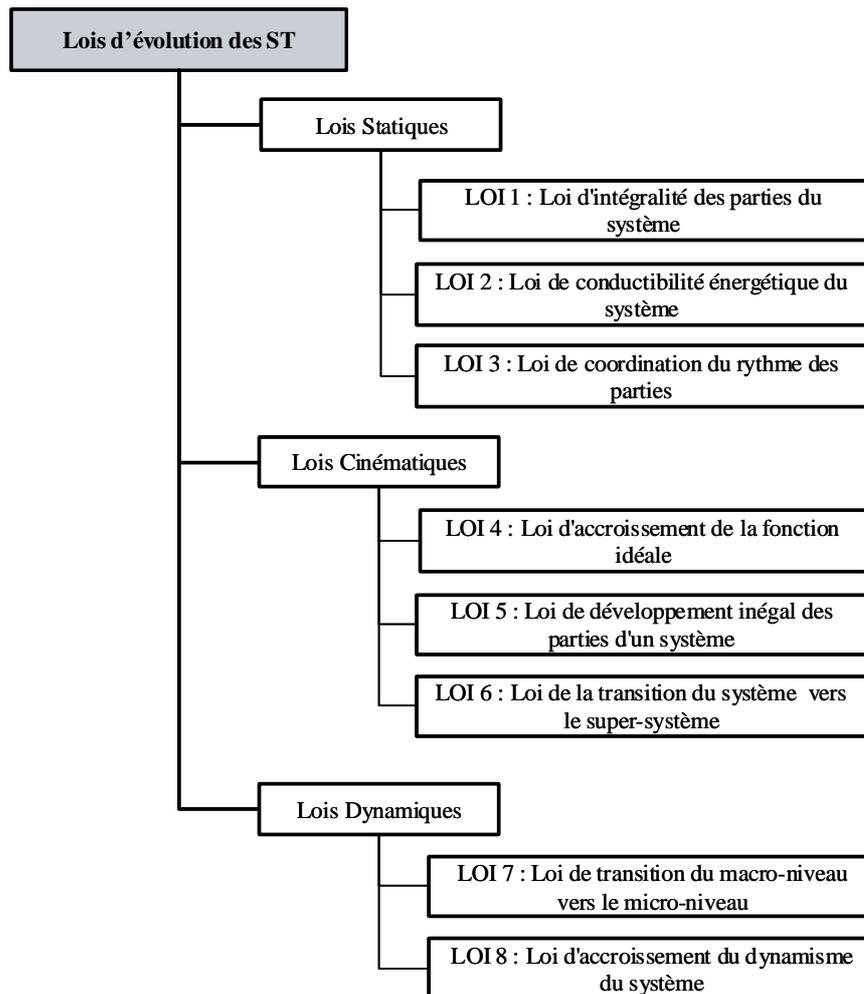


Figure 2.19 : Lois d'évolution de TRIZ

Cependant et malgré toute son utilité et son importance, cette théorie manque clairement de structuration surtout dans la formalisation, la formulation et la définition du problème. Un grand nombre de problèmes génériques est alors proposé sans de réelle aide permettant de traduire le problème spécifique en un problème générique (Cavallucci, 2008).

4.2.2.2.Sécurité et TRIZ

Dans sa version principale développée par Alshuller, la TRIZ n'intègre pas d'une manière explicite la sécurité des utilisateurs. Une mise à jour de la matrice de résolution des contradictions, effectuée par la société CREAX en 2000 (Mann, 2003) afin d'étendre ses application et mieux l'adapter aux problèmes techniques de la société d'aujourd'hui révèle de nouveaux paramètres. Ceci a permis d'aboutir en 2003 (Mann, 2003) à une matrice à 48 entrées.

Parmi les nouveaux paramètres nous pouvons citer, entre autre, la sécurité d'utilisation, la sûreté de fonctionnement et la complexité du contrôle. Cette matrice n'a pas pu faire ses pas dans la communauté scientifique étant donné qu'elle ne fait pas l'œuvre d'aucun travail scientifique.

D'un autre côté et dans l'objectif d'adapter TRIZ aux objectifs de la sécurité, Hasan (Hasan, 2004) a utilisé une approche, qu'il a développée, pour la formalisation des problèmes de sécurité (appelé modèle de la situation de travail) comme un point d'entrée dans TRIZ. La sécurité est ainsi considérée comme un paramètre en opposition à la productivité (Figure 2.20).

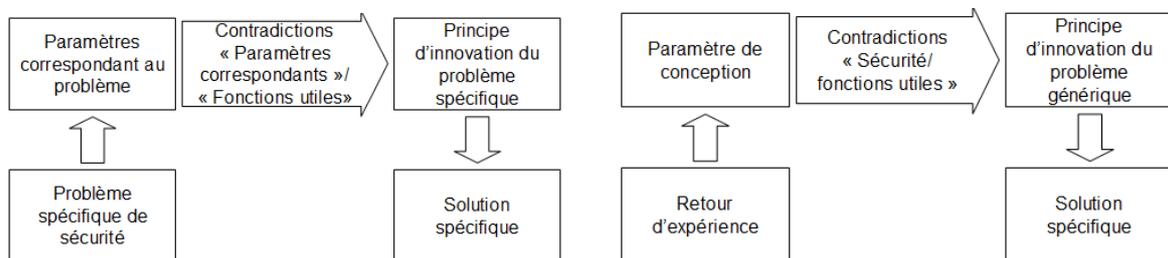


Figure 2.20a : Intégration de la sécurité par le modèle de la situation de travail/ b: Intégration de la sécurité par la matrice 2003

L'exploration de ces deux voies a montré que :

- D'une part, l'interprétation des principes d'innovation issus du modèle (Figure 2.20a) de la situation de travail est fortement dirigée par les problèmes de sécurité, et ainsi permet des améliorations locales de la sécurité en phase de conception détaillée. A cela s'ajoute le fait que dans ses travaux, Hasan a considéré des systèmes automatisés ayant déjà des mesures de sécurité ; et qu'en effet, les contradictions proviennent des violations des mesures de sécurité par les utilisateurs pour des objectifs de production ; ce qui ne correspond pas à notre problème d'étude.
- D'autre part, la matrice d'innovation traduit les problèmes de sécurité en un unique paramètre intitulé « sécurité d'utilisation » (Figure 2.20b). Et même si l'interprétation devient assez large et donc peut toucher les concepts et les architectures, il n'existe aucun guide ni pour la formulation de la contradiction, ni pour l'interprétation des principes d'innovation. Par conséquent, sa mise en œuvre s'avère très difficile et manque de crédibilité.

L'exploration de cette voie montre une nécessité de développer une démarche de définition des problèmes de sécurité qui pourrait compléter l'approche TRIZ dans la résolution des problèmes techniques.

4.2.3. Point de vue du Quality Function Deployment (QFD)

4.2.3.1. Description du QFD

Le principe fondamental du Déploiement de la Fonction Qualité (QFD) (Gonçalves-Coelho, 2005) est la collecte des informations ayant le plus de valeur ajoutée pour le client. Il est utilisé par des équipes pluridisciplinaires pour identifier et répondre aux questions concernant les produits, les processus, les services et les stratégies qui satisferont au mieux leurs clients. En effet, cette méthode cherche à intégrer le client vu que ses besoins sont souvent peu maîtrisés par les entreprises.

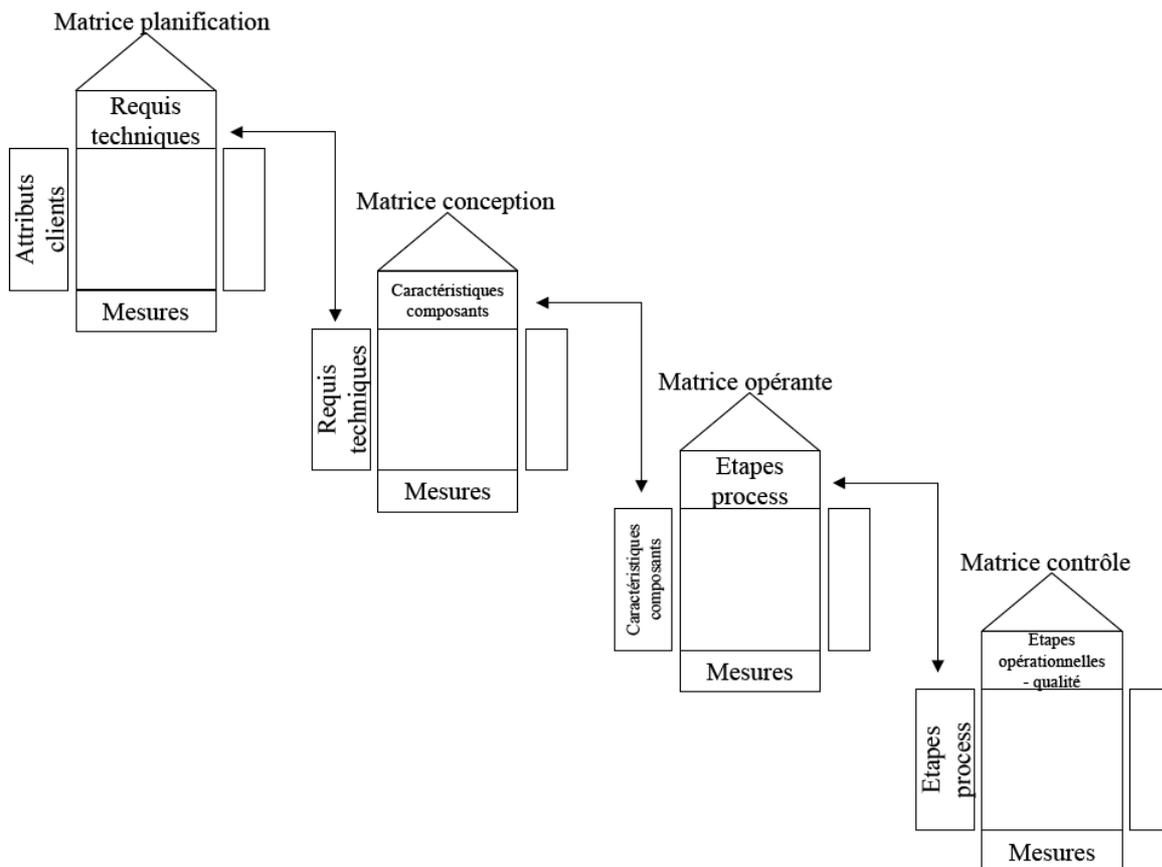


Figure 2.21: Processus de déploiement du QFD (Dubois, 2004)

La représentation globale (Figure 2.21) d'une étude QFD comporte l'ensemble des points abordés durant l'étude, synthétisés sous une forme graphique. Elle s'appuie sur l'utilisation de quatre matrices (Dubois, 2004). Ces matrices sont basées sur le principe du "Quoi-Comment" et mettent en relation les données produites à une étape du processus de conception avec les problèmes devant être résolus à l'étape suivante. La première matrice est celle de planification qui permet la traduction des attentes du client en description technique. La seconde matrice met en relation la description technique des performances à atteindre avec les caractéristiques des composants du produit (les paramètres). La troisième matrice met en relation les caractéristiques des composants avec ceux des procédés de production. Enfin, les caractéristiques des procédés sont mises en relation avec les paramètres de qualité dans la quatrième matrice.

4.2.3.2.Sécurité et QFD (Marsot, 2005)

Marsot emploie le QFD dans la conception d'un couteau ergonomique (Marsot, 2005). Il part d'une liste d'exigences de sécurité et technique et montre leur corrélation avec les solutions techniques par l'utilisation de la matrice du QFD. Ces exigences doivent être quantifiables. La relation entre les besoins et les caractéristiques du produit est ainsi identifiée. Ensuite, chaque relation est estimée comme étant forte, moyenne ou faible. A cette estimation sont associées trois valeurs 9-3-1 respectivement. La définition des exigences ergonomiques provient de l'analyse de l'activité des utilisateurs. L'avantage d'une telle représentation, est qu'elle permet de comparer la synergie possible entre les différentes solutions et d'en déduire les conflits.

Cette approche consiste en une analyse de la conception détaillée par rapport aux objectifs de départ. Si la conception ne satisfait pas certaines des exigences, ce type d'approche conduit à une adaptation de la conception détaillée afin de pouvoir intégrer toutes les exigences désirées.

4.2.4. Point de vue de la Conception Axiomatique

4.2.4.1.Description de la Conception Axiomatique

Les approches axiomatiques en conception sont celles qui consistent à respecter des règles appelées axiomes afin d'obtenir une conception correcte. Un axiome est défini comme *un énoncé répondant à trois critères fondamentaux : être évident, non démontrable, universel* (CNRTL). Le professeur Suh du MIT, créateur de l'Axiomatic Design, est le porteur de ce type d'approche

(Suh, 1990). Il définit un axiome comme une évidence ou une vérité fondamentale pour laquelle, il n'existe aucun contreexemple ni exception. L'Axiomatic Design (qu'on appellera ci-après Conception Axiomatique) est basé sur trois concepts principaux: la conception en tant que processus de mappage; les lois de la conception sous la forme d'axiomes et la matrice de conception représentant les dépendances fonctionnelles (Suh, 2001). Une introduction de ces concepts est développée ci-après.

Selon Suh, la conception suit un cheminement itératif et séquentiel entre "Ce qu'on cherche à accomplir" et "Comment l'accomplir" (Suh, 1990). Le processus de conception est divisé en quatre domaines (Figure 2.22): le domaine client, le domaine fonctionnel, le domaine physique et le domaine du processus. La transition d'un domaine à un autre est appelée *processus de mappage*.

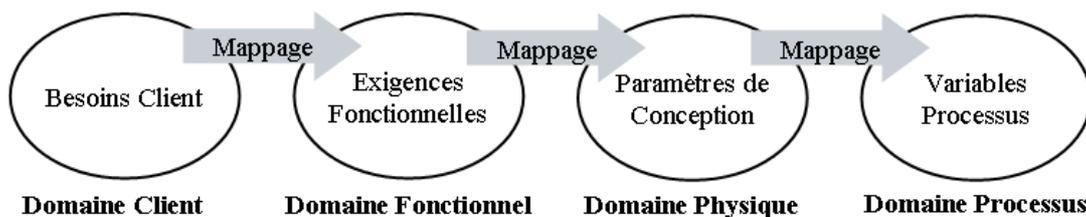


Figure 2.22: Le processus de conception selon l'AD

Le *domaine client* décrit ce que cherche le client dans le produit à concevoir. Cette description est appelée *attributs client* (CA) ou besoin client. Dans le *domaine fonctionnel* les besoins clients sont exprimés en termes *d'exigences fonctionnelles* (notées FRs) et de contraintes (notées Cs). Pour satisfaire les (FRs), les *paramètres de conception* (notés DPs) sont conçus dans le *domaine physique*. Enfin, pour fabriquer le produit exprimé en termes de (DPs), un processus est développé. Ce processus est caractérisé par des *variables processus* (notées PVs) dans le *domaine processus*.

Les exigences fonctionnelles (FRs) sont définies comme le nombre minimal d'exigences qui caractérisent complètement le besoin fonctionnel du produit dans le domaine fonctionnel. Au moment où celles-ci sont établies, chaque FR est indépendante de toutes les autres FRs. Un paramètre de conception est toute variable physique qui caractérise la conception répondant à une FR spécifique dans le domaine physique.

Le mappage est un processus itératif entre les différents domaines et par suite entre les exigences fonctionnelles et les paramètres de conception qui répondent au mieux aux objectifs. Le processus de mappage est exprimé mathématiquement, comme souligné par Suh, en termes de vecteurs caractéristiques qui définissent les objectifs de conception et la solution technique (Suh, 2001). A chaque niveau hiérarchique de la conception, les exigences fonctionnelles associées constituent le vecteur FR dans le domaine fonctionnel. De la même manière, les paramètres de conception (DPs) du domaine physique associé à ce même niveau hiérarchique expriment le vecteur DP. Ainsi, la relation entre ces deux vecteurs est exprimée comme suit :

$$\{FR\} = [A]\{DP\} \quad (2.1)$$

[A] est nommé la matrice de conception caractérisant la conception du produit. L'équation (1) représente l'équation de la conception au niveau hiérarchique considéré. Pour une conception ayant deux FR et deux DP, la matrice de conception a la forme suivante :

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

Les axiomes qui dirigent toute transition du domaine fonctionnel au domaine physique, sont au nombre de deux et énoncés comme suit:

Axiome 1: l'axiome d'indépendance – Maintenir l'indépendance des exigences fonctionnelles (FR).

Alternatives 1: Une conception optimale est celle qui maintient l'indépendance des FRs.

Alternatives 2: Une conception acceptable est celle qui relie les DPs et FRs d'une manière qu'un DP spécifique peut être amélioré pour satisfaire son FR sans dégrader une autre FR.

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix}$$

Figure 2.23 : Représentation de l'axiome d'indépendance

On peut vérifier que l'indépendance des exigences est maintenue suivant la nature de la matrice [A]. Si [A] est diagonale (tous les $A_{ij} = 0$ et les A_{ii} sont non nuls) ou [A] est triangulaire (inférieur ou supérieur), l'axiome d'indépendance est alors respecté (Figure 2.23). Quand [A] est diagonale, chaque FR est satisfait indépendamment par un DP, et correspond à une conception **non couplée**. Si [A] est triangulaire, l'indépendance des FR ne peut être garantie que si les paramètres de conception sont définis par une séquence bien définie. Une telle conception est appelée **découplée**. Les autres formes des matrices correspondent à des conceptions **couplées**. Ainsi, dans la phase de conceptualisation du produit, la conception doit satisfaire une matrice diagonale ou triangulaire.

Axiome 2: l'axiome du minimum d'information – Minimiser l'information contenue dans une conception (Suh, 2005) (Figure 2.24).

Alternative: la meilleure conception est celle contenant le minimum d'information donc correspondant à une complexité minimale. Ainsi, on tente à diminuer le nombre d'exigences fonctionnelles et de ne retenir que celles nécessaires pour répondre au besoin.

Pour les conceptions à une-FR et un-DP, le niveau d'information s'écrit:

$$I = -\log_2 P = -\log_2 \int_{FR_i}^{FR_u} p_s(FR) dFR$$

$$I = -\log_2 \frac{(\text{surface de l'étendue système})}{(\text{surface de l'étendue commune})}$$

Dans le cas d'une conception à n-FRs et n-DPs, le niveau d'information s'écrit:

$$P_t = \prod_{i=1}^n P_i \Rightarrow \frac{1}{P_t} = \prod_{i=1}^n \frac{1}{P_i} \Rightarrow -\log_2 P_t = \sum_{i=1}^n -\log_2 P_i \Rightarrow I_t = \sum_{i=1}^n I_i$$

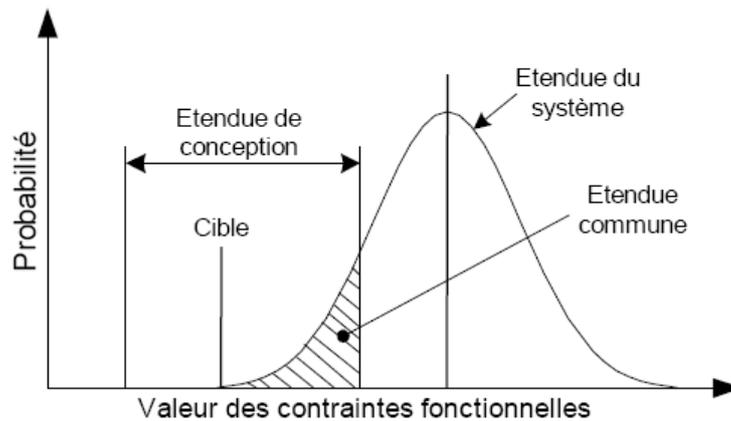


Figure 2.24 : Représentation de l'axiome 2

Conception Idéale - En outre, Suh considère qu'une conception idéale comprend autant de paramètres de conception que d'exigences (Suh, 2001). Dans ce cas, la matrice A est carrée. A est rectangulaire lorsque le nombre d'exigences est différent du nombre de paramètres de conception. Dans le cas où les exigences sont plus nombreuses que les paramètres de conception, la conception est dite « *couplée* ». A l'inverse, elle est dite « *découplée ou redondante* » lorsqu'elle comprend plus de paramètres de conception que de spécifications. Ce processus de définition est itératif et est centré sur la définition et l'optimisation des FRs.

4.2.4.2. Sécurité et Conception Axiomatique

Dans la littérature de l'Axiomatic Design, nombreux sont les travaux (Brown, 2006; Helander, 2007a; Karwowski, 2005; Lo, 2007) sur l'utilisation de la méthode pour l'analyse du produit du point de vue de l'ergonomie.

En se basant sur la matrice de conception, (Helander, 2007a; Lo, 2007) ont développé la méthodologie DESA (acronyme anglais pour Equation de Conception pour l'Analyse des Systèmes). Cette méthodologie permet d'étudier les systèmes homme-machines. En effet, elle est basée sur quatre domaines : objectifs utilisateurs, exigences fonctionnelles, paramètres de conception et actions des utilisateurs ; modélisant ainsi les systèmes homme-machines des points de vue fonctionnels et structurels (Figure 2.25).

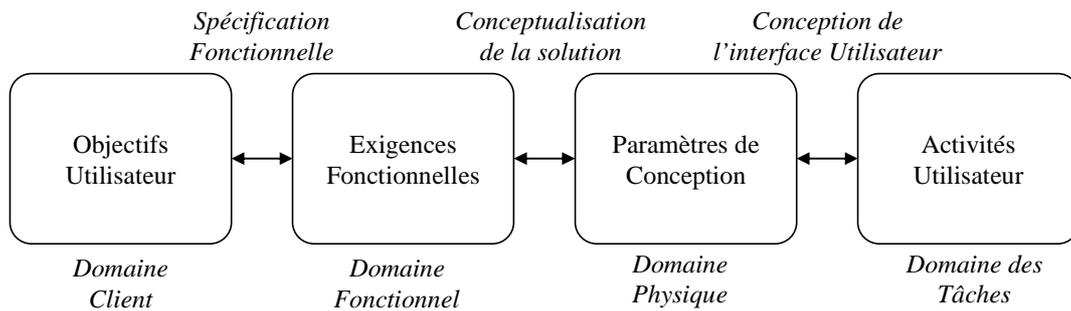


Figure 2.25 : La méthodologie DESA

Selon cette méthodologie la conception consiste en un processus de mappage entre ces quatre domaines. Cette méthodologie considère que la conception doit respecter l'axiome d'indépendance lors du passage d'un domaine à un autre. Ainsi, les équations de la conception correspondant au mappage du domaine "objectifs utilisateurs" au domaine "actions utilisateurs" s'écrivent comme suit:

$$[UG] = [A][FR] \quad (2.4)$$

$$[FR] = [B][DP] \quad (2.5)$$

$$[DP] = [C][UA] \quad (2.6)$$

[UG] représente le vecteur des objectifs utilisateurs, [FR] représente le vecteur des exigences fonctionnelles, [DP] représente le vecteur des paramètres de conception et [UA] représente le vecteur des actions utilisateurs. Les matrices [A], [B] et [C] correspondent aux matrices de conception entre les quatre domaines.

Les avantages de cette approche (Lo, 2007) sont:

- C'est une approche analytique pour l'évaluation ergonomique des produits par des concepteurs n'ayant pas eu de formation en ergonomie.
- C'est un moyen formel pour prévoir la facilité d'utilisation d'une conception.
- Elle permet de mettre en avant la relation entre une mauvaise conception et une mauvaise interface homme-machine.

Ainsi, la méthodologie décrit les règles d'une conception utilisable et ne prend en considération que l'étude de l'action humaine pour atteindre certains objectifs. Elle consiste en une analyse globale de la solution des points de vue conception et utilisation. Cependant, elle

admet un certain nombre de limites. D'une part, elle considère que l'étude des tâches vient à la suite du mappage du fonctionnel au physique et conduit à une intégration tardive de la sécurité. D'autre part, l'analyse et la conception de l'interface homme-machine ne sont pas considérées comme faisant partie du processus de synthèse de solution physique.

De son côté, Karwowski décrit les règles d'une bonne conception ergonomique (Karwowski, 2005). Ces règles consistent dans l'étude de la compatibilité homme-solutions techniques. Les deux axiomes qui régissent la conception axiomatique sont adaptés aux objectifs de la conception ergonomique. L'axiome 1 exprime l'indépendance entre les exigences fonctionnelles de compatibilité et l'axiome 2 exprime la minimisation de l'information contenue dans une conception. L'importance de cette approche est de mettre en lumière l'idée de générer des exigences fonctionnelles qui rapportent à la sécurité.

L'intégration de la sécurité à travers les exigences de la conception fût aussi traitée par Brown qui intègre l'aspect risque de blessures liées à l'utilisation d'un produit (Brown, 2006). Il part d'un nombre d'exigences fonctionnelles pouvant améliorer la sécurité qu'il intègre dans la synthèse de solution. Dans ces travaux, Brown considère que les besoins de sécurité proviennent du retour d'expérience étant donné qu'il illustre son approche sur un produit existant; la conception de skis sécuritaires (Brown, 2006). Mais dans le cas de conception de produits nouveaux, ou dans le cas où les causes des risques sont difficilement identifiables, *comment peut-on déduire les besoins de sécurité? Et à quel niveau systématique sont-elles intégrables dans l'arbre fonctionnel ?*

Chacune des différentes approches se focalise sur un aspect spécifique de la sécurité humaine. Aucune d'elle n'intègre l'aspect risques d'accidents et aucune ne pourra être considérée comme une approche de conception systématique et complète pour l'intégration de la sécurité dans la conception des produits techniques.

5. Intégration des méthodes et théories de la conception

L'analyse des méthodes et théories de la conception montre qu'il existe une zone floue sur ce qu'elles peuvent offrir au concepteur. Alors que chacune se considère comme une référence pour une meilleure conduite d'un projet de conception, il existe une complémentarité évidente

entre ces méthodes. En effet, les unes sont mieux adaptées pour la clarification des tâches, les autres pour la conceptualisation ou encore l'optimisation etc. De plus, certaines sont mieux placées pour l'analyse de la conception d'autres pour la synthèse de solutions. Dans ce paragraphe, nous allons d'abord expliquer, l'approche systématique en conception (Pahl&Beitz, 2007), une approche qui a fait ses essors, en complément des approches exposées auparavant, dans les mondes académiques et industriels. Ensuite, nous exposerons quelques approches d'intégration des "grandes" méthodes de conception. Ces approches d'intégration sont surtout issues du monde académique des dix dernières années.

5.1.Approche systématique

L'approche systématique de Pahl&Beitz est une approche de conception algorithmique se caractérisant par un ensemble de tâches de conception distinctes (Pahl&Beitz, 1988, 2007). A chaque tâche est associé un ensemble d'étapes permettant de fournir les résultats indispensables à l'enclenchement de la tâche située en aval. Le processus de conception est ainsi constitué de quatre étapes : la clarification et la planification des tâches (spécifications des exigences), la conception conceptuelle (définition du principe de solutions), la conception architecturale (matérialisation du concept et définition de la structure) et la conception détaillée (le détail du concept et la définition des plans).

Etape de la clarification des problèmes: Cette étape implique l'identification et la formulation des exigences et des contraintes. Ces exigences vont permettre de déterminer la solution et sa structure qualitativement mais aussi quantitativement quand ceci est possible. Pour y arriver, les questions suivantes doivent être répondues en collaboration avec le client:

- Quels objectifs la solution doit satisfaire?
- Quelles sont ses propriétés?
- Quelles propriétés ne doit-elle pas avoir?

Cette étape fait appel aux approches fonctionnelles afin de traduire les besoins du client en exigences fonctionnelles (comme le Quality Function Deployment) et débouche sur l'élaboration d'une liste d'exigences.

Etape de la conception conceptuelle: Cette étape débute par une analyse des spécifications dans le but d'identifier le problème essentiel à résoudre. Ce problème est formulé d'une manière abstraite indépendante de toute solution potentielle afin d'ouvrir un champ le plus large possible au concepteur dans la recherche des solutions. Le problème est ensuite décomposé en un ensemble de sous-problèmes ayant chacun ses exigences fonctionnelles. Des solutions à ces sous-problèmes sont ensuite recherchées. Ces solutions partielles sont alors combinées et structurées pour en faire une solution (appelée principe de solution ou encore concept) au problème global. Cette étape est supportée par les outils de créativité et de résolution des problèmes tels que le brainstorming, le FAST (de créativité et de description), l'essai-erreur ou l'analyse de la valeur.

Etape de la conception architecturale: Cette étape consiste à affiner le principe de solution considéré pertinent par rapport aux exigences objectives établies dans le cahier des charges (ou listes des exigences). Durant cette étape, le concepteur doit déterminer l'arrangement général et la compatibilité spatiale, les formes préliminaires (composants et matériaux). La matérialisation du concept implique un grand nombre d'itérations d'analyse et de synthèse pour aboutir à une solution satisfaisante. Une bonne solution est celle qui répond à trois règles fondamentales: clarté, simplicité et sécurité.

Etape de la conception détaillée: Cette étape complète la matérialisation du concept par l'affinement des formes, des dimensions définitives et de la définition de la propriété des surfaces des pièces composant le produit technique. Cette étape débouche sur l'élaboration des plans de définition et des gammes de fabrication.

L'approche systématique considère que l'affinement du résultat de chacune des phases peut faire appel à des itérations avec les phases dont le niveau d'informations est plus élevé. La modélisation proposée par Pahl&Beitz repose sur une description fonctionnelle et économique du produit et par la constitution d'un cahier des charges (Pahl&Beitz, 2007). Schématiquement, l'approche décrit les actions à réaliser mais ne formalise pas les démarches de réalisation de ces actions.

5.2.Intégration de l'Analyse Fonctionnelle et de TRIZ

Scaravetti propose une décomposition du processus de conception en quatre niveaux permettant de formaliser l'étape de la conception architecturale (Scaravetti, 2004). Cette description est basée principalement sur les outils de l'analyse fonctionnelle tel que le diagramme pieuvre, le FAST et le bloc diagramme. Ces quatre niveaux sont les suivants (Figure 2.26):

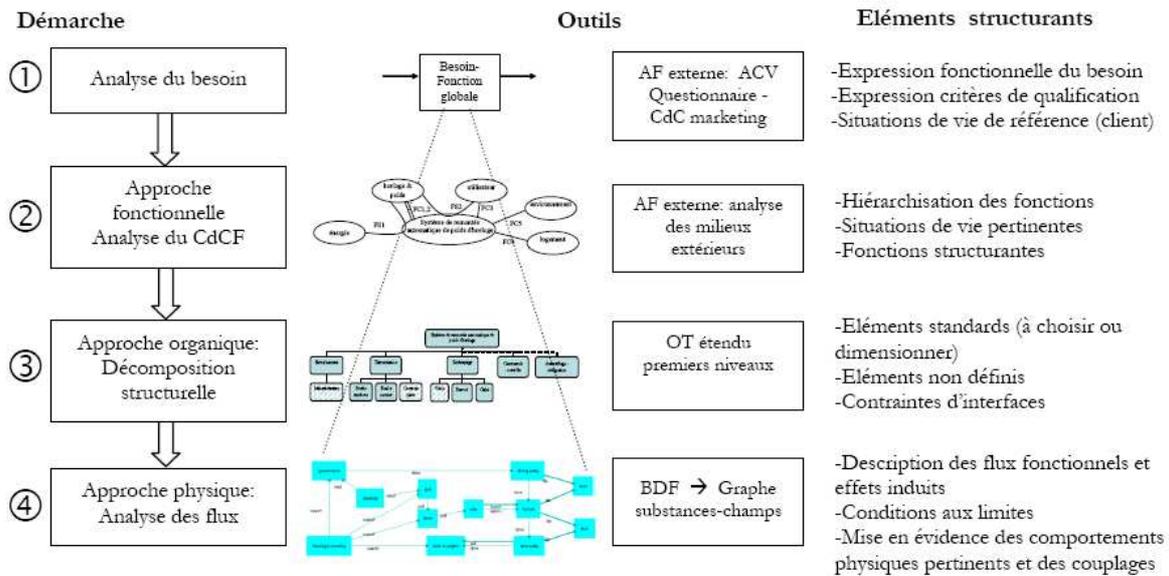


Figure 2.26 : Démarche de conception, outils associés et caractéristiques structurantes à chaque étape

Niveau 1 – Analyse du Besoin: Expression du besoin client et des critères de qualification de la conception de son point de vue: critères technologiques (performances, durée de vie, masse, etc.), critères économiques (coûts, impact environnemental ou critères de qualification au niveau de l'entreprise ou du marketing (risques, nuisances, perception, etc.)). Ces critères de qualification proviennent principalement du Cahier des Charges et des normes ou réglementation.

Niveau 2 – Approche Fonctionnelle: Enumération des situations de vie et fonctions structurantes du produit (règles métiers, fonctions contraintes impératives, fonctions à risques, etc.).

Niveau 3 – Approche Organique: Description de la structure du produit, en utilisant un organigramme technique. Les éléments standards à choisir ou dimensionner, les contraintes d'interfaces, etc. sont répertoriés.

Niveau 4 – Approche Physique: Identification, grâce à des outils de description des flux, de tous les phénomènes physiques pertinents, qui permettent de décrire le comportement du produit. Il s'agit aussi bien des phénomènes liés à la réalisation de fonctions, que des phénomènes induits souvent nuisibles.

Cette démarche vient compléter l'outil MAL'IN (Méthodes d'Aide à L'Innovation) dans la définition des problèmes à résoudre (Nadeau, 2007). Cet outil, principalement basé sur les outils d'analyse fonctionnelle et de TRIZ, consiste en une formalisation de la résolution des problèmes techniques.

5.3.Extended Axiomatic Design (EAD)

L'EAD décrit par Ge met en lumière la relation entre la conception axiomatique et la conception systématique (Ge, 2002). En effet, l'EAD considère que chaque étape du processus de conceptualisation du produit de la conception systématique (conceptuelle, architecturale et détaillée) est divisée suivant les quatre domaines de l'AD. Dans cette approche, les éléments structurants de chaque étape sont respectivement : les objets, les attributs et les valeurs (Figure 2.27).

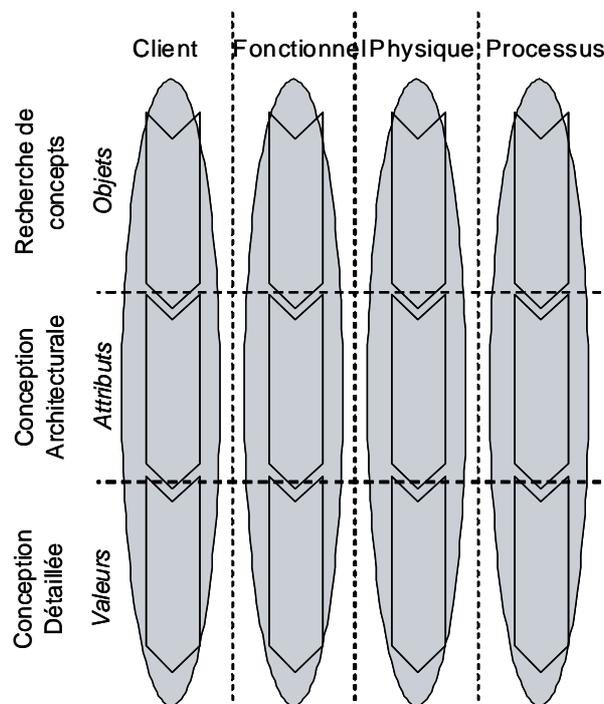


Figure 2.27 : Les phases de l'EAD

Ainsi, cette approche considère que l'étape de clarification des tâches de Pahl&Beitz correspond au domaine fonctionnel et qu'elle est divisée selon la nature de l'information et son niveau d'abstraction suivant les trois étapes de la conception (Pahl&Beitz, 2007). L'avantage de cette description est de couvrir le manque des deux approches systématique et axiomatique par leur intégration. En effet, l'approche systématique décrit les différentes tâches à effectuer (le Quoi?) pour développer un produit. Elle ne donne en aucun cas les moyens de parvenir à ces tâches. Alors que l'AD formalise la transition des Quoi au Comment. Cependant, l'EAD admet la limite d'avoir associé les objets, attributs et valeurs respectivement aux trois étapes de la conception systématique, étant donné que ces exigences interviennent à toutes les étapes de la conception.

5.4.Intégration de TRIZ et de l'AD

Nombreux auteurs ont souligné la complémentarité de TRIZ et de l'Axiomatic design (Ahn, 2006; Duflou, 2007; Thompson, 2009; Yang, 2000; Zhang, 2007). Malgré un certain nombre de divergences, la comparaison des deux approches révèle un nombre de similarités et de complémentarités (Yang, 2000). D'abord, ces deux approches trouvent surtout leur place dans la recherche de concepts de solutions. La force de l'Axiomatic Design réside dans la définition des problèmes et l'analyse des solutions, mais ne permet pas de générer des idées.

Cependant, TRIZ est mieux positionnée pour la résolution des problèmes. Dans ce type d'intégration, TRIZ est surtout utilisée pour gérer et résoudre les contradictions qui sont à l'origine des couplages des exigences fonctionnelles. En effet, TRIZ n'intervient que lorsque la matrice de conception n'est ni diagonale ni triangulaire et par suite couplée. Les couplages doivent être d'ordre deux (c'est-à-dire mettant en relation deux FRs avec les DPs associés) étant donné que la contradiction dans TRIZ consiste en deux paramètres de conception qui s'opposent. Dans le cas contraire, Zhang propose d'utiliser la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) afin de calculer et d'estimer l'importance du couplage (Zhang, 2007).

5.5.Méthode de Conception Intuitive (Cavalucci, 1999; Cavalucci, 2000)

Cette méthode est basée sur l'intégration de : la conception systématique (PB), l'Axiomatic Design (AD), l'Analyse de la Valeur (AV) (AFNOR, 2005b; AFNOR, 2007), la conception pour la fabrication (DFM), le QFD, la TRIZ, le Robust Design (RD) et l'ingénierie

simultanée (IS) (Sohlenius, 2002). En effet, elle propose de conclure la meilleure intégration en tenant compte de l'historique de l'entreprise. L'idée est de tirer les avantages de chaque méthode dans l'objectif de constituer une méthode robuste qui permet de couvrir les quatre étapes d'abstraction proposées: la collecte d'informations, la création de concepts, la construction et le développement de la solution et enfin, la fabrication et la production (Figure 2.28).

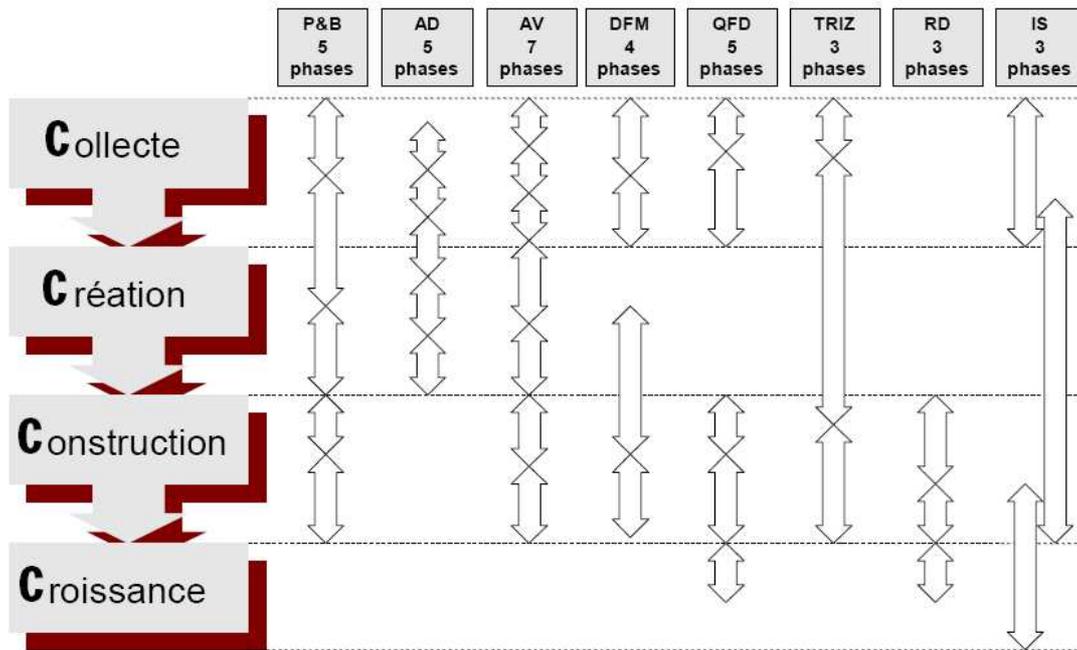


Figure 2.28 : Liens entre les phases des méthodes de conception (Cavalucci, 1999)

L'avantage de cette approche est de comparer et situer les différentes approches de conception entre elle. Cependant, elle ne prend pas en considération la variabilité de la nature inhérente de chacune des approches et que, pour une étape de conception donnée, le remplacement d'une approche par une autre ne s'effectue pas aussi naturellement. Par exemple, si on prend le cas des deux approches Systématique et TRIZ qui sont considérées couvrir les mêmes étapes, les données d'entrée de chacune ne sont pas de la même nature.

6. Problématique Scientifique de la thèse

L'analyse de l'état de l'art permet de révéler certains manques dans les approches actuelles de la conception des produits et d'intégration de la sécurité. En effet jusqu'à présent, ces deux disciplines de conception et de sécurité sont traitées indépendamment. Peu de travaux ont

tenté de coupler voire d'intégrer ces deux disciplines. Ainsi, les produits conçus jusqu'alors sont à l'image de ce manque d'intégration. Ce qui prête à l'étonnement est que, malgré la demande accentuée des directives et des normes d'assurer une attention minimale à la santé-sécurité lors de la conception des produits, cette dernière n'admet toujours pas des moyens structurés et formels pour la réduction des risques. L'intégration de la sécurité dans la conception est jusqu'alors considérée comme un processus séquentiel. Par conséquent, les réglementations et normalisations conduisent généralement à l'adaptation et la modification de la solution détaillée du produit pour des objectifs de sécurité. On peut toujours considérer l'ergonome comme acteur de la conception du produit mais tant que concepteur et ergonome ne communiquent pas avec un vocabulaire commun tout au long de la conception, la sécurité sera toujours un élément d'adaptation de la solution finale et un élément de gêne pour atteindre les performances espérées. La discipline de la conception des produits ne peut plus être considérée indépendamment de la discipline de la sécurité humaine et de l'ergonomie. Tant qu'il n'existe pas une correspondance voire une fusion, il sera toujours difficile d'allier, dans une même solution, technique et sécurité.

Pourquoi et jusqu'à présent, la sécurité ne constitue-t-elle pas une des préoccupations première du concepteur lors des choix technologiques ? Peu de concepteurs ont une culture sécurité et même s'ils y sont formés, il existe peu de moyens formels qui permettent de gérer cette connaissance au bon moment. Le problème ne réside pas dans le fait de considérer la sécurité comme une contrainte de conception. Le problème existe quand cette contrainte n'est pas traitée au bon moment, et de là elle se transforme en une contrainte d'adaptation (et non de conception) dans des étapes avancées du processus de conception. A ces facteurs s'ajoute la difficulté d'identification, de caractérisation et de validation de la sécurité dès le démarrage du processus de conception où peu de choix techniques ont été effectués. Un dernier facteur non négligeable réside dans les pratiques de la conception routinière ou de reconception, où la réussite technologique ne permet que de petites modifications du produit. Ainsi, le cahier de charges du produit n'est jamais remis en cause, alors que des objectifs fonctionnels viennent se greffer sur la solution de base faisant alors migrer le seuil acceptable de la conception et de la sécurité. Ce rajout de fonctionnalités conduit à la complication du produit et augmente par suite les couplages dans les systèmes. Ce type de conception rend la compréhension du fonctionnement du système plus difficile et par suite l'extraction des risques potentiels devient plus difficile.

Pourquoi les moyens actuels d'analyse des risques et d'intégration de la sécurité ne sont-ils pas adaptés ? Ces méthodes, nous les classons en méthodes basées sur l'analyse des combinaisons d'évènements et en méthodes basées sur l'étude des effets d'un évènement pris individuellement. Des méthodes, comme l'AMDEC partent des composants ou de leurs fonctions et cherchent les conséquences potentielles de leur défaillance (le composant ne remplit pas sa fonction). Ce type de méthode traite les problèmes séparément et ne considère pas la dynamique des défaillances (les combinaisons possibles). Cependant des méthodes, comme la MAC, permettent de traiter les combinaisons des évènements susceptibles de créer un phénomène indésirable mais sont lourdes à mettre en œuvre afin d'imaginer toutes les combinaisons possibles. De plus, afin de faciliter la mise œuvre de ces deux types de méthodes les concepteurs se basent généralement sur un retour d'expérience, les connaissances tacites ou explicites, sur des rapports, sur l'expertise.... En d'autres termes, ils se basent sur une connaissance plus ou moins formalisée mais qui n'est en aucun cas abstraite et intégrable à la conception d'un nouveau produit. Les connaissances issues du retour d'expérience sont relatives au fonctionnement d'un produit connu, dans un contexte spécifique et pour un utilisateur et une activité spécifique. D'où ces méthodes sont difficilement applicables dans la conception d'un nouveau produit. Ensuite, la mise en œuvre de ces méthodes nécessite une connaissance détaillée du produit et de son mode de fonctionnement et donc intervient à la fin du processus de conception. En conséquence, l'implémentation des barrières de sécurité en fin de processus a atteint ses limites. En fait, les barrières de sécurité, pour la réduction des risques, sont mises en œuvre à l'étape de la conception détaillée (barrières ajoutées) et ainsi contribuent à la complication du produit originel. Ceci aboutit dans la plupart des cas à une augmentation du nombre des paramètres de conception par rapport aux exigences fonctionnelles et, par suite, à une conception couplée et complexe.

Cette étude bibliographique nous a permis de définir la problématique scientifique de cette thèse et qui s'énonce comme suit : **recherche d'une méthode innovante permettant une intégration systématique de la sécurité des utilisateurs au plus tôt dans la conception des produits. D'abord, la méthode doit donner les moyens d'incorporer tout type d'éléments susceptible d'améliorer la sécurité des utilisateurs du produit ainsi développé et les exigences réelles du contexte de travail et des usages. Ensuite, il convient de créer des moyens pour extraire et intégrer des objectifs de sécurité dans les phases amont de la conception. La méthode doit prendre largement en compte des informations issues du**

retour d'expérience. Enfin, il s'agit de générer les ressemblances et de créer des correspondances entre la sécurité et les méthodes et théorie de conception actuelles. La solution doit permettre de capturer et de décomposer les connaissances suivant des niveaux hiérarchiques en partant de la définition du besoin de l'utilisateur jusqu'à la conception détaillée du produit.

Synthèse du Chapitre II

Dans ce chapitre nous avons présenté l'état de l'art de la sécurité et de la conception. Dans un premier temps, nous avons montré comment aujourd'hui les risques sont analysés et évalués. Dans un deuxième temps, nous avons expliqué la sécurité vue par les méthodes de sûreté de fonctionnement. Ces méthodes considèrent la sécurité comme l'amélioration de la fiabilité des composants des systèmes. Dans un troisième temps, les modes de prises en compte de l'humain dans l'évaluation des risques ont été présentés. Ces modes proposent d'incorporer d'une part, les limites du corps humain et d'autre part, le retour d'expérience issu de la situation d'utilisation d'un produit. Les moyens actuels dont le concepteur dispose pour améliorer la sécurité ont été exposés. Ces moyens consistent dans la mise en place de barrières de sécurité. L'analyse des effets de ces barrières, en mode virtuel, a été expliquée. Dans un quatrième temps, nous avons développé le concept de prise en compte de la sécurité dans les approches de conception des produits. Nous avons ainsi distingué le point de vue des ergonomes de celui des mécaniciens. Les ergonomes dégagent les besoins et par suite un certain nombre d'exigences à considérer pour améliorer la sécurité des utilisateurs. Les mécaniciens proposent une formalisation des démarches de conception appelées méthodes et théories de la conception. Les méthodes et théories de la conception qui ont traité de la sécurité ont été présentées. Enfin, la synthèse critique de cet état de l'art nous a permis d'énoncer la problématique scientifique de nos travaux. Le chapitre suivant tente de répondre à cette problématique.

Chapitre III

Proposition d'un modèle d'intégration Sécurité/Conception

Lorsque l'énoncé d'un problème est exactement connu, le problème est résolu; ou bien c'est qu'il est impossible. La solution n'est donc autre chose que le problème bien éclairé.

Emile-Auguste Chartier

Sommaire du Chapitre III

Introduction	77
1. Principes fondamentaux régissant le modèle	77
1.1. Principe 1 : Définir les objectifs de la conception des points de vue technique et de sécurité	77
1.2. Principe 2 : Conserver l'indépendance des exigences fonctionnelles techniques et de sécurité	80
1.3. Principe 3 : Minimiser l'incompatibilité entre les caractéristiques humaines et les paramètres de la conception	82
2. Modèle d'intégration de la sécurité et de la conception	86
3. Mappage du processus de conception au processus du risque	90
3.1. Interactions de l'humain avec la conception	91
3.2. Description du processus de conception du modèle.....	93
3.3. Description du processus du risque du modèle	104
Synthèse du chapitre III.....	117

Introduction

Ce chapitre a pour objectif de décrire le modèle que nous proposons pour l'intégration de la sécurité et de la conception. Dans un premier temps, nous allons exposer les principes fondamentaux auxquels le modèle doit répondre pour assurer la sécurité. Ces principes ont été développés sur la base de l'étude bibliographique exposée dans le chapitre II. Nous en avons tiré trois principes dont en découlent neuf alternatives. Dans un deuxième temps, nous allons détailler le modèle d'intégration en sécurité/conception. Il s'agit d'une intégration systématique et au plus tôt de la sécurité au cours du développement du produit. L'objectif est de prendre en considération la sécurité de manière inhérente à la conception du produit final. Dans un troisième temps, nous dégageons les points caractéristiques de la correspondance (ou mappage) qui existe entre la conception et la sécurité. Nous proposons trois types d'interactions de la conception avec l'homme. Nous avons ainsi créé un processus du risque évoluant simultanément avec un processus de conception se renforçant mutuellement. Ce processus du risque admet six contextes d'analyse des risques. Enfin, nous concluons ce chapitre par une synthèse du contenu présenté.

1. Principes fondamentaux régissant le modèle

Ce paragraphe a pour finalité de présenter les éléments que nous gardons de l'état de l'art afin de constituer notre modèle et par suite notre méthode (expliquée dans la chapitre IV) d'intégration de la sécurité et de la conception à chaque étape du processus de développement du produit. Ces éléments nous les avons classés en trois groupes que nous avons appelé principes. Ces principes vont constituer le cadre du modèle et de la méthode développés par la suite.

1.1.Principe 1 : Définir les objectifs de la conception des points de vue technique et de sécurité

Les objectifs de la conception sont exprimés par des contraintes de conception et des exigences fonctionnelles. Le terme exigence fonctionnelle fût introduit par Suh (Suh, 1999). Dans la norme (AFNOR, 1996), on parle de contraintes de conception et de fonctions de service. En effet, la notion de fonction de service est équivalente à celle d'exigence fonctionnelle décrite par Suh (Suh , 1990).

Définitions (Suh, 2007):

Contrainte de conception (Cs) : Généralement, une contrainte consiste en un seuil d'acceptabilité qu'une conception doit obligatoirement respecter. Elle décrit la limitation de la liberté du concepteur dans ses choix. Il existe deux types de contraintes, les contraintes externes et les contraintes internes. Les contraintes externes sont spécifiques à toute conception (quelle que soit la solution choisie elle doit satisfaire ces contraintes). Les contraintes internes sont spécifiques à une conception donnée ; elles sont le résultat des choix effectués.

Exigence fonctionnelle (FR) : une exigence fonctionnelle exprime ce que l'utilisateur réclame comme nécessaire à la satisfaction de ses désirs. Elle correspond à la valeur ajoutée du produit. Quand on a à effectuer des actions spécifiques, ces dernières doivent être exprimées comme une exigence fonctionnelle. Ainsi, une FR, n'est autre qu'une contrainte spécifiée par des compléments. De même que pour les contraintes, il existe des FRs externes (il s'agit généralement des fonctions principales du produit) et les FRs internes, qui sont spécifiques aux choix effectués au fil de la conception.

Comme défini par Suh (Suh, 2001), la conception est une interaction entre ce qu'on veut faire « le Quoi » et le moyen de le faire « le Comment ». Ainsi, une approche de conception rigoureuse est celle qui débute par un énoncé explicite du « Quoi » et se termine par une description claire du « Comment ». Cependant, la description précise du quoi s'avère souvent une tâche difficile pour les concepteurs. Le plus souvent les concepteurs partent avec des objectifs implicites et commencent rapidement le processus de recherche de solutions (Suh, 2001). Ces objectifs implicites peuvent ne pas correspondre aux besoins des utilisateurs. Ce fait montre que des itérations entre le « quoi » et le « comment » sont exigées et que chaque boucle d'itération permet de redéfinir clairement les « quoi ».

Le premier principe stipule une définition des objectifs (exigences + contraintes) du produit. Comme notre étude concerne la « sécurité d'utilisation », ces exigences sont de nature technique et de sécurité. Ainsi, nous introduisons une première notion fondamentale du modèle qui est celle d'une « exigence de sécurité ».

1.1.1. Alternative 1.1 : Définir les objectifs techniques

La définition des objectifs techniques correspond au mappage des besoins des utilisateurs dans le domaine client aux exigences fonctionnelles et contraintes dans le domaine fonctionnel. Ici, pour la commodité d'utilisation, nous appelons exigences techniques les exigences fonctionnelles décrivant les performances techniques du produit à concevoir et nous les notons TR (de Technical Requirements). Parmi les méthodes de conception permettant la transcription formelles des besoins des utilisateurs en exigences techniques, nous citons l'Analyse Fonctionnelle et le QFD. D'une manière générale, les exigences techniques proviennent des besoins des utilisateurs dont la traduction est influencée par la politique et la philosophie interne de l'entreprise (ou du concepteur). Ces exigences peuvent aussi provenir des insatisfactions issues du retour d'expérience relatif à l'utilisation en situation réelle du même produit.

1.1.2. Alternative 1.2 : Définir les objectifs de sécurité

Qu'est ce qu'un objectif de sécurité ? Nous entendons par objectif de sécurité l'ensemble des contraintes de conception et des exigences fonctionnelles ayant pour seul objectif d'assurer un aspect particulier de la sécurité des utilisateurs. Les exigences fonctionnelles de sécurité nous les appelons par défaut exigences de sécurité et nous les notons SR (de Safety Requirements). Ces objectifs correspondent au mappage des besoins des utilisateurs ou du client dans le domaine client aux exigences fonctionnelles et aux contraintes dans le domaine fonctionnel. En effet, ces objectifs sont relatifs, (1) à l'environnement d'utilisation et son organisation, (2) à la conception même du produit et (3) aux interactions produit/environnement ou environnement/environnement ou produit/produit. Les exigences de sécurité sont plus difficiles à identifier au démarrage du processus de conception, car il s'agit assez souvent d'informations non techniques ou d'un recueil d'informations issues des expériences passées difficilement adaptables à une conception nouvelle. La directive de conception des machines donne un nombre d'exigences à intégrer lors de la conception. Elle consiste généralement en des contraintes que toute conception doit satisfaire. Ces exigences sont complétées dans les normes par d'autres, relatives à des domaines d'application particuliers; il s'agit alors des exigences relatives au contexte d'application et par suite aux risques liés aux Eléments du Milieu d'Utilisation du produit. Dans ce dernier cas, les exigences de sécurité correspondent à des exigences fonctionnelles proprement dites. Ainsi, de même que pour les besoins techniques, la sécurité peut être exprimée en tant que contrainte ou en

tant qu'exigence fonctionnelle.

Les objectifs de sécurité sont alors identifiées d'une part à l'aide du retour d'expérience issu de l'utilisation du produit (cas de reconception) ou d'un produit similaire (cas de conception d'un nouveau produit), et d'autre part par la définition des risques issus des choix de la conception des solutions technologiques envisageables. Dans le cas de la conception de nouveaux produits, les objectifs de sécurité (contraintes et exigences fonctionnelles) peuvent être définis par l'utilisation des normes et des directives.

1.2.Principe 2 : Conserver l'indépendance des exigences fonctionnelles techniques et de sécurité

Selon Suh, une bonne conception est celle qui maintient l'indépendance des exigences fonctionnelles (Suh, 2001). Ces exigences décrivent le désir ultime de l'utilisateur à travers la conception. L'indépendance des exigences fonctionnelles signifie que dans le cas où les objectifs de la conception sont définis par deux ou plusieurs exigences, chacune doit être satisfaite par la solution technique d'une manière n'affectant pas une autre exigence. Cela signifie que le choix des paramètres de conception est dirigé par l'indépendance des exigences. La conceptualisation de la solution s'effectue à la base des exigences fonctionnelles établies.

Le deuxième principe stipule l'indépendance des exigences fonctionnelles dans le sens de la conception axiomatique. En complément du besoin d'atteindre une bonne conception, nous proposons de conserver l'indépendance des FRs puisqu'il en découle :

1.2.1. Alternative 2.1 : Conserver l'indépendance des évènements susceptibles de générer un risque

L'indépendance des exigences fonctionnelles induit que chaque FR est satisfaite d'une manière individuelle par un paramètre de conception. Suivant son niveau hiérarchique, chaque paramètre de conception (DPi) est décomposé en n paramètres de conception de niveau hiérarchique inférieur (DPin). La relation du point de vue de la conception entre le DPi et ses DPin est traduite par un opérateur logique "ET". Ainsi, les évènements dangereux (que nous notons RP) relatifs à un DPi correspondent à la somme des évènements dangereux des DPin. Ceci se traduit par un arbre des causes avec des opérateurs logiques en "OU" (Heo, 2007) (Figure 3.1). Les seules relations avec des "ET" sont celles relatives à l'interaction de l'utilisateur avec le DP

correspondant à un instant donné dans l'espace où le risque intervient.

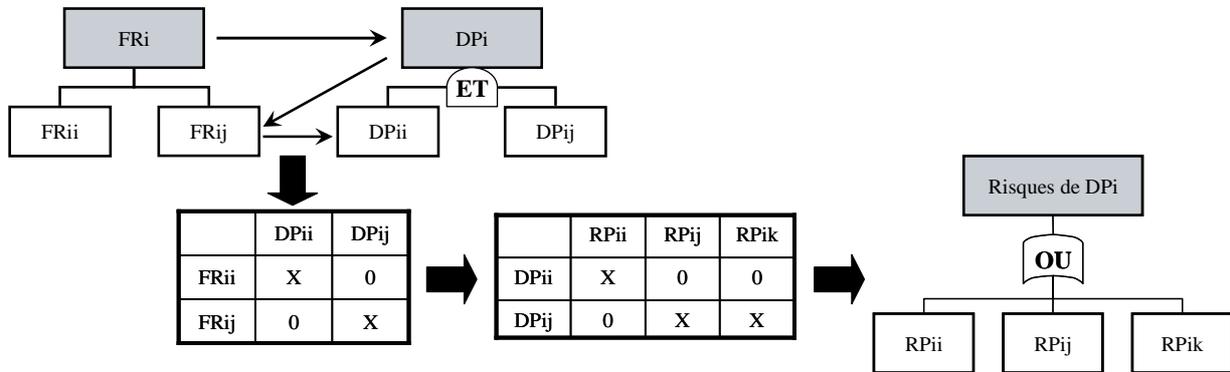


Figure 3.1 : Représentation d'un arbre des causes d'une conception non couplée

En effet, les évènements issus d'une telle conception et susceptibles de générer des risques sont indépendants. Il est alors inutile d'étudier les combinaisons possibles des évènements dangereux. Ainsi, il est pertinent d'étudier les phénomènes dangereux relatifs à l'interaction potentielle des grandeurs physiques contenues dans les paramètres de conception d'un produit. Ces interactions peuvent être étudiées dès les premières étapes de la conception du produit.

1.2.2. Alternative 2.2 : Conserver l'indépendance des « Objectifs utilisateurs/ Tâches »

La tâche est définie par la norme (AFNOR, 2009) comme étant une action ou ensemble d'actions que doit effectuer l'utilisateur pour atteindre l'objectif du système. Cette alternative traite de la notion de la capacité mentale de l'humain. Selon la norme (AFNOR, 2000) la charge mentale générée par le produit peut en partie découler de la simultanéité des tâches. Selon Helander, l'étude des couplages entre les objectifs de l'utilisateur et les tâches à effectuer permet d'identifier les itérations et ainsi les simultanéités et les répétitions possibles dans l'accomplissement d'un objectif spécifique (Helander, 2007a). En effet, les couplages entre les objectifs de l'utilisateur et son action ainsi que l'ordre du couplage sont analysés à travers la matrice de conception de la conception axiomatique. Comme noté par Helander, la facilité d'utilisation du produit dépend du niveau de couplage de la conception (Helander, 2007a). En effet, l'humain est capable de gérer au maximum quatre à cinq tâches couplées (Helander, 2007b). Une bonne conception en ergonomie est celle qui consiste en un mappage direct entre les objectifs et les actions de l'utilisateur. Ainsi, la conception de l'interface homme-machine doit

être non-couplée ou du moins découplée. Une conception non couplée implique des tâches indépendantes. Ainsi, l'utilisateur peut les satisfaire indépendamment d'un séquençement spécifique. Une conception découplée implique un séquençement spécifique d'un certain nombre de tâches pour un objectif donné. Dans ce cas, la tâche peut paraître complexe et couplée quand ce séquençement n'est pas respecté (Suh, 2007).

1.2.3. Alternative 2.3 : Minimiser l'ajout de paramètres de conception pour les objectifs de sécurité

Cette alternative traite de la notion de mise en place de barrières de sécurité qui se traduit généralement par l'ajout d'un paramètre de conception. L'objectif de la prise en compte de la sécurité dès les phases amont de la conception est de favoriser l'intégration inhérente de la sécurité. En effet, une barrière est le résultat d'une contrainte de conception non prise en considération au bon moment lors de la conception, se convertissant en une exigence fonctionnelle (fonction de barrière) dans la phase aval, conduit à la mise en place d'une barrière de sécurité. Ainsi, cette alternative considère que les contraintes de sécurité doivent être décomposées et intégrées en fonction de la nature de chacune des étapes de la conception.

1.3.Principe 3 : Minimiser l'incompatibilité entre les caractéristiques humaines et les paramètres de la conception

Selon Karwowski, l'ergonomie est la discipline qui se focalise sur l'étude de la nature de l'interaction entre l'humain et les solutions techniques (Karwowski, 2005). Les caractéristiques de l'humain sont classées dans la norme (AFNOR, 2009) en fonction des dimensions corporelles, des postures possibles, des mouvements du corps, de la force physique et de la capacité mentale. La capacité mentale fait l'objet de l'alternative 2.2, du fait qu'elle fait l'objet de plusieurs tâches et par suite plusieurs exigences fonctionnelles. Ainsi, nous considérons un homme modèle paramétré par ces classes. A ces caractéristiques, nous avons ajouté la notion de vulnérabilité de l'humain. Nous entendons par vulnérabilité les effets sur l'humain qu'ont d'éventuelles émissions produites par le produit ou l'environnement. Dans cette alternative, nous nous intéressons à la quantification et par suite à la spécification des exigences de sécurité. Les paramètres de conception induisent une activité de la part de l'homme. Cette activité implique certaines des caractéristiques humaines pour être accomplie. Ce principe stipule de minimiser le niveau d'incompatibilité entre les caractéristiques humaines (définies par des seuils) et les paramètres de

conception relatifs à ces caractéristiques. L'incompatibilité implique qu'un paramètre de conception correspondant à une solution technique nécessite des caractéristiques humaines supérieures aux capacités de ce dernier. Ainsi, l'étude de cette incompatibilité va déterminer la nature de l'interaction entre l'humain et la solution technique. Nous avons alors considéré quatre classes pour l'étude de l'incompatibilité; les postures possibles et les mouvements du corps forment une seule classe.

1.3.1. Alternative 3.1 : Minimiser l'incompatibilité « vulnérabilité de l'humain/ grandeurs physiques »

D'abord, il s'agit de minimiser l'incompatibilité entre la vulnérabilité de l'humain et les grandeurs physiques du produit. La vulnérabilité de l'humain (pour une typologie donnée) par rapport à une grandeur physique dépend de la nature de la grandeur physique (mécanique, thermique, ...), son intensité et la partie affectée de l'humain. Ainsi, ce principe stipule de choisir la solution technique admettant l'énergie la moins dangereuse pour l'humain.

Pour une solution comportant n types d'énergie ($E_i, i=1..n$), chacune admettant un niveau maximal supporté par l'humain ($E_{i\max}, i=1..n$) à laquelle nous proposons d'affecter un ordre d'importance selon la sévérité (noté $\lambda_i, i=1..n$) de l'énergie considérée, nous proposons d'exprimer l'exigence de sécurité, de manière simplifiée, par l'équation (3.1) suivante:

$$(P) \left\{ \begin{array}{l} \text{Min}I(y) = \text{Min} \sum_{i=1}^n \lambda_i y_i \\ y_i = \frac{E_i}{E_{i\max}} ; \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1, \quad \lambda_i > 0 \end{array} \right. \quad (3.1)$$

1.3.2. Alternative 3.2 : Minimiser l'incompatibilité « caractéristiques morphologique/ paramètres structurants »

Il s'agit ensuite de minimiser l'incompatibilité entre les caractéristiques morphologiques définies par les dimensions corporelles et les paramètres structurants du produit. Les dimensions corporelles sont données par la norme (AFNOR, 2008a). En effet, il s'agit d'étudier la compatibilité des dimensions corporelles de l'humain (pour une typologie donnée) par rapport

aux caractéristiques dimensionnelles de la solution. Ainsi, ce principe stipule de choisir la solution technique admettant le moins d'incompatibilité entre les dimensions du corps de l'homme et les caractéristiques espérées de la part de l'humain pour que le produit fonctionne dans les conditions prévues.

Pour une solution comportant k paramètres structurants nécessitant une intervention humaine ($D_i, i=1..k$), chacune admettant une dimension spécifique de l'humain ($D_{i\max}, i=1..k$) à laquelle nous proposons d'affecter un ordre d'importance selon la nature (noté $\lambda_i, i=1..k$) de la dimension considérée, nous proposons d'exprimer l'exigence de sécurité, de manière simplifiée, par l'équation (3.2) suivante:

$$(P) \begin{cases} \text{Min}I(y) = \text{Min} \sum_{i=1}^k \lambda_i y_i \\ y_i = D_i / D_{i\max} ; \\ \sum_{i=1}^k \lambda_i = 1, \quad \lambda_i > 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

1.3.3. Alternative 3.3 : Minimiser l'incompatibilité « force physique/ paramètres structurants »

Ensuite, il s'agit de minimiser l'incompatibilité entre les limitations des forces physiques et les paramètres structurants du produit. Les forces physiques sont données par la norme (AFNOR, 2008b). En effet, il s'agit d'étudier la compatibilité des efforts physiques dont l'homme (pour une typologie donnée) est capable par rapport aux caractéristiques géométriques et dimensionnelles de la solution. Ainsi, ce principe stipule de choisir la solution technique admettant le niveau minimal d'incompatibilité entre les forces physiques de l'homme et les caractéristiques espérées de sa part pour que le produit fonctionne dans les conditions prévues.

Pour une solution comportant l paramètres structurants nécessitant un effort physique de l'humain ($F_i, i=1..l$), chacun admettant un seuil ($F_{i\max}, i=1..l$) auquel nous proposons d'affecter un ordre d'importance selon la sévérité (noté $\lambda_i, i=1..l$) de l'effort considéré, nous proposons d'exprimer l'exigence de sécurité, de manière simplifiée, par l'équation (3.3) suivante:

$$(P) \begin{cases} \text{Min}I(y) = \text{Min} \sum_{i=1}^l \lambda_i y_i \\ y_i = \frac{F_i}{F_{i\max}} ; \\ \sum_{i=1}^l \lambda_i = 1, \quad \lambda_i > 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

1.3.4. Alternative 3.4 : Minimiser l'incompatibilité « postures/ paramètres structurants »

Enfin, il s'agit de minimiser l'incompatibilité entre les postures ergonomiques et les paramètres structurants du produit. Les postures ainsi que les mouvements ergonomiques sont donnés par les normes (AFNOR, 2005a ; ISO, 2002). Ces derniers peuvent être analysés par le biais des logiciels CAO. En effet, il s'agit d'étudier la compatibilité des postures et des mouvements exigés de la part de la conception du produit par rapport à ceux conseillés par l'ergonomie (pour une typologie d'utilisateur donnée). Cette analyse tient compte de la tâche et des données géométriques de la solution (position, espace disponible, obstacles...). Ainsi, ce principe stipule de choisir la solution technique admettant le niveau minimal d'incompatibilité entre les postures ergonomiques et les caractéristiques espérées de sa part pour que le produit fonctionne dans les conditions prévues.

Pour une solution comportant m paramètres structurants nécessitant certaines postures ou mouvements de l'humain ($P_i, i=1..m$), chacun admettant un seuil ($P_{i\max}, i=1..m$) auquel nous proposons d'affecter un ordre d'importance selon la sévérité (noté $\lambda_i, i=1..m$) de la posture ou du mouvement considéré, nous proposons d'exprimer l'exigence de sécurité, de manière simplifiée, par l'équation (3.4) suivante:

$$(P) \begin{cases} \text{Min}I(y) = \text{Min} \sum_{i=1}^m \lambda_i y_i \\ y_i = \frac{F_i}{F_{i\max}} ; \\ \sum_{i=1}^m \lambda_i = 1, \quad \lambda_i > 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

2. Modèle d'intégration de la sécurité et de la conception

Comme expliqué dans le chapitre précédent, d'une manière générale, la conception est basée sur quatre étapes caractéristiques de développement du produit : définition du besoin, recherche de concepts, recherche de la structure de la solution et établissement du produit détaillé. Ces étapes reflètent clairement les types de modélisation à effectuer afin de parvenir au produit qui satisfait le besoin de l'utilisateur.

Le modèle que nous proposons pour l'intégration de la sécurité dans la conception est développé dans le cadre du processus de conception systématique décrit par (Pahl&Beitz, 2007) et basé sur quatre étapes caractéristiques: la clarification des tâches ou la définition du besoin client, la conception conceptuelle, la conception architecturale et la conception détaillée du produit. Une approche systématique a l'avantage d'être une approche algorithmique, c'est-à-dire qu'elle décrit le meilleur chemin à suivre pour parvenir à un objectif. Cependant, quand il s'agit de concevoir pour un objectif bien défini, ces approches s'avèrent difficilement applicables du fait que certaines étapes peuvent fusionnées (Suh, 2001). Pahl et Beitz furent les premiers à décrire le processus de conception comme un processus systématique (Pahl&Beitz, 2007). Nous retenons l'avantage de cette approche dans la description précise et structurée du produit tout au long de son processus de développement. La première étape, de planification et de clarification des tâches correspond à la phase de transcription des besoins du client en termes de fonctions. A la fin, cette étape débouche sur une première ébauche d'un cahier des charges (CdC) exprimant les exigences auxquelles le produit doit répondre pour satisfaire son utilisateur. Généralement, cette étape fait l'objet des outils de description du besoin (APTE) et de l'analyse fonctionnelle externe (diagramme pieuvre). Ainsi à ce niveau, les objectifs de sécurité peuvent être intégrés en tant que rapport d'accidents ou de statistiques en annexe du CdC; ou à travers la caractérisation de la typologie des utilisateurs, considérés comme des éléments d'adaptation (appelés aussi éléments du milieu d'utilisation) du produit.

Pourquoi un processus systématique pour la conception? Le mot systématique est défini comme quelque chose organisé avec méthode et rigueur (CNRTL). Ainsi, une conception systématique est une description méthodique et rigoureuse de l'organisation du développement du produit. Tant qu'une description rigoureuse du produit n'est pas réalisée au fil de son processus de développement, il est difficile de définir comment et à quel moment prendre en considération

la sécurité. Celle-ci sera toujours décrite par un ensemble d'éléments plus ou moins en relation et sans liens précis avec les éléments de la conception du produit. C'est pourquoi nous avons opté pour une telle organisation.

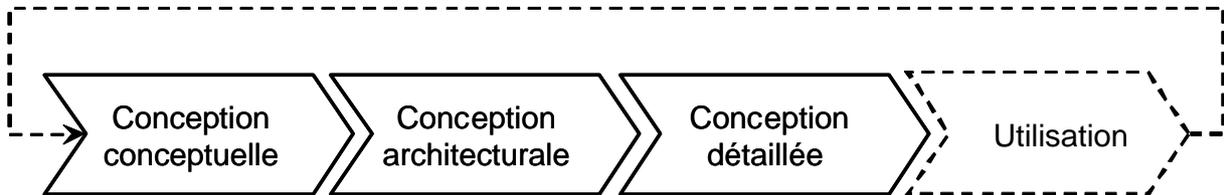


Figure 3.2 : Intégration de la situation d'utilisation dès la première étape de conceptualisation du produit

Comment prendre en considération la sécurité dans la conception? Jusqu'à présent, la sécurité est surtout prise en considération à travers le retour d'expérience (rapports, normes, réglementations...) qui est souvent sous formes textuelles ou de statistiques. Ces données sont prises en considération par le concepteur d'une manière peu méthodique. Dans notre modèle, nous considérons que le retour d'expérience fait partie intégrante du CdC. Les informations issues du retour d'expérience ne sont jamais toutes de la même nature et par conséquent leur intégration dans la conception ne peut pas être au même niveau conceptuel.

Pour l'instant, la sécurité est considérée à travers le retour d'expérience qui est généralement relatif au fonctionnement d'un produit spécifique, dans un contexte spécifique et pour une tâche et un matériel donné (Figure 3.2). Dans le cas d'un nouveau produit et afin d'intégrer la sécurité de manière efficace, nous avons considéré qu'il était nécessaire d'inverser l'approche d'analyse des risques qui intervient à la fin de la conception détaillée du produit. Ainsi, l'approche classique d'analyse des conséquences redoutées et de leur hiérarchisation en gravité et probabilité est remplacée par une approche basée sur l'analyse des ressources constituant la solution technique. Nous utilisons l'expression de ressources de la conception comme définies dans TRIZ et qui correspond *aux substances, champs et autres attributs d'un système technologique (tels que l'énergie, l'espace, temps, matériaux) ainsi que son environnement (JTRIZ)*. De cette manière, nous agissons directement sur la source du problème pour maîtriser et éliminer les risques. Ainsi en complément de l'intégration du retour d'expérience, notre approche propose d'identifier systématiquement les risques liés aux ressources. Les exigences de sécurité proviennent alors d'une part, du retour d'expérience relatif aux éléments du milieu d'utilisation (que nous appelons aussi super-systèmes); et d'autre part des choix technologiques effectués à

chaque étape de la conception et sont liés au système et aux sous-systèmes (appelés aussi composants). Ainsi, nous considérons que les risques sont identifiés à travers l'étude de l'interaction potentielle de l'humain avec les ressources des super-systèmes, système et sous-systèmes. Ces risques sont listés et analysés tout au long du processus. En effet, pour les besoins en matière de sécurité évoluant avec les choix physiques de la conception, le cahier des charges s'avère lui-même évolutif et s'élabore de manière continue avec la conception du produit.

Que se passe-t-il une fois que les risques sont identifiés au cours de la conception?

D'abord, les risques relatifs au retour d'expérience doivent subir une abstraction afin d'être intégrés indépendamment de la solution finale. En effet, nous proposons de traduire le retour d'expérience en termes d'exigences et de contraintes de sécurité et de les introduire dans les différentes étapes de la conception. Une exigence peut être exprimée par un (objet + verbe + complément) et une contrainte par un (verbe + complément). Par ailleurs, les risques générés au cours de la conception des solutions technologiques doivent eux aussi être transcrits en exigences de sécurité. L'idée étant de prendre en considération ces objectifs de sécurité lors de la synthèse des solutions au même titre que les objectifs techniques. Ainsi, la sécurité fera partie intégrante de la conception.

A quel moment du processus de la conception systématique faut-il prendre en considération ces exigences et contraintes? Généralement, l'expression des exigences et des contraintes s'effectue d'une manière indépendante à toute solution et, d'un point de vue technique, les exigences et les contraintes principales sont élaborées avant le démarrage du processus de recherche de solutions. Or, suivant leur nature et leur "importance" vis-à-vis de l'utilisateur, les objectifs de sécurité n'interviennent pas au même moment lors du processus de conception. De plus, les caractéristiques inhérentes et les ressources introduites à la conception ne sont pas de la même nature suivant l'étape du processus de conception. Ainsi, ces exigences doivent être décomposées en trois niveaux suivant trois typologies d'informations que nous définirons ultérieurement. La typologie des exigences de sécurité doit être en adéquation avec la nature de la solution à chaque étape de la conception. De la même manière, les exigences techniques contenues dans le CdC n'interviennent pas toutes à la même étape du processus de conception et vont se retrouver divisées suivant trois types.

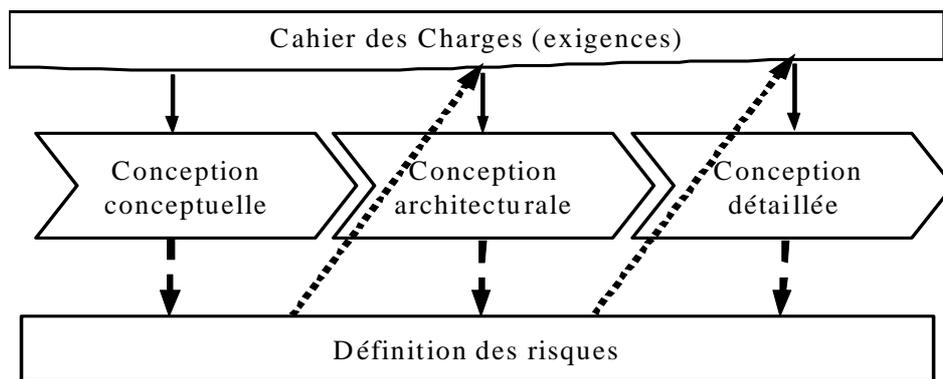


Figure 3.3 : Modèle proposé pour l'intégration de la sécurité au plus tôt dans la conception

Le modèle d'intégration de la conception et de la sécurité est représenté par la Figure 3.3. Le contenu du CdC et par suite l'étape de clarification des tâches sont considérés en parallèle aux trois étapes de conceptualisation du produit. La définition (ou l'identification) des risques est effectuée à chaque étape du processus de conception. Ainsi, les risques sont considérés comme évoluant simultanément avec la conception et les choix technologiques. Les exigences de sécurité élaborées au cours de la conception sont introduites dans le CdC. Cette définition des risques et l'élaboration des exigences de sécurité correspondent à ce que nous appelons le "processus du risque".

Pourquoi parle-t-on d'un processus du risque? Comme expliqué, les risques définis au fil de la conception et par suite les exigences de sécurité dépendent de l'étape de conception correspondante. D'où, la nature des exigences et par suite leurs effets sur la conception et sur l'utilisateur ne sont pas du même ordre. Tout comme les effets des choix technologiques effectués à chaque étape ne sont pas du même ordre en terme de valeur ajoutée dans la conception du produit. Cette évolution de la connaissance sur les risques et de leurs effets constitue donc un processus du risque.

En résumé, l'intégration de la sécurité au plus tôt dans la conception des produits consiste à (1) identifier les risques à travers l'analyse des choix technologiques et du retour d'expérience (2) traduire ces risques en exigences de sécurité et (3) prendre en considération ces exigences systématiquement dans la synthèse de nouvelles solutions au même titre que les exigences techniques. Dans le paragraphe suivant nous expliquons la correspondance, que nous appelons « mappage », entre la conception et le risque à chaque étape de développement du produit.

3. Mappage du processus de conception au processus du risque

Le mot *mappage* est défini comme le fait de mapper. *Mapper* consiste à établir une correspondance entre deux objets. Dans notre modèle de prise en compte de la sécurité dans la conception, nous entendons par mappage l'établissement et la description de la relation qui existe entre la conception et la sécurité. Le processus de conception est accompagné par un processus d'identification et d'évaluation des risques que nous avons appelé « *processus des risques* ».

Comment ces deux processus évoluent-ils ? D'abord, la conception débute par l'établissement d'un nombre d'exigences fonctionnelles principales (qui sont de nature plutôt technique) traduisant d'une manière abstraite le désir du client. Ces exigences vont servir à la définition des premiers paramètres de conception. Comme expliqué dans le chapitre II, le mappage des exigences fonctionnelles aux paramètres de conception s'effectue de manière itérative et suivant une loi bien définie (axiome d'indépendance). La description des premiers paramètres de conception (qu'on appelle solutions techniques) va permettre une première identification et définition des risques. Le risque prend effet quand son niveau dépasse les limites de l'humain. Ainsi, les risques sont identifiés à travers l'analyse de l'interaction possible de la solution technique avec les caractéristiques de l'humain. L'analyse de cette interaction suppose d'une part une connaissance de la nature des ressources contenues dans la solution technique et d'autre part une connaissance des caractéristiques de l'homme. Comme expliqué, la solution technique (dans sa forme physique) admet trois niveaux de description (ou de modélisation) suivant l'état d'avancement du développement du produit. Chaque niveau admet ses propres ressources. Le processus du risque admet également trois niveaux de description des risques suivant l'interaction de l'homme (paramétré par les caractéristiques humaines) avec la nature des ressources disponibles dans la solution physique à une étape particulière de la conception.

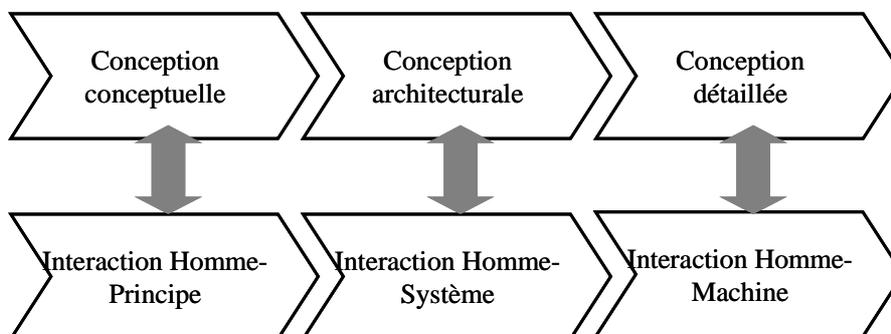


Figure 3.4 : Mappage entre le processus de conception et processus du risque

Par conséquent, le processus de conception interagit avec un processus de risque qui est similairement divisé en trois étapes que nous avons appelé interactions. Ainsi, nous notons trois types d'interactions suivant le niveau d'abstraction de la solution : Interaction Homme-Principe (IHP), Interaction Homme-Système (IHS), Interaction Homme-Machine (IHM). La Figure 3.4 illustre la correspondance entre le processus de conception et le processus des risques. L'IHP correspond à la description de l'interaction des caractéristiques de l'homme avec les ressources de la conception à l'étape de la conception conceptuelle. L'IHS correspond à la description de l'interaction des caractéristiques de l'homme avec les ressources de la conception à l'étape de la conception architecturale. L'IHM correspond à la description de l'interaction des caractéristiques de l'homme avec les ressources de la conception à l'étape de la conception détaillée.

3.1. Interactions de l'humain avec la conception

Comme nous venons de la voir, le processus du risque est divisé en trois types d'interaction : Interaction Homme-Principes (IHP), Interaction Homme-Système (IHS) et Interaction Homme-Machine (IHM) chacune correspondant avec une étape du processus de conception. Nous considérons qu'un risque à un effet quand il atteint l'homme. Ainsi, lors de la conception, nous supposons par défaut que, pour une tâche donnée, l'homme est en interaction avec les caractéristiques physiques correspondantes de la conception. Ci-après, nous développons la nature de chacune de ces interactions.

3.1.1. Interaction Homme-Principes

Cette interaction correspond avec l'étape de la conception conceptuelle du processus de conception. Du point de vue de la conception, cette étape consiste à décomposer les exigences principales en sous-exigences et à sélectionner le ou les principe(s) de solution. Les interactions avec l'homme sont de deux types. Le premier type correspond à celles relatives au milieu d'utilisation, qui sont des risques connus et exprimables en termes d'exigences fonctionnelles. Le deuxième type d'interactions est celui en relation directe avec la nature des grandeurs physiques contenues dans le principe de solution sélectionné. Dans ce dernier cas, les exigences générées sont relatives à la solution physique choisie. A cette étape de la conception, les exigences sont réparties entre le produit et l'humain. Le principe de solution envisagé peut donc aller de l'automatisation complète de la solution à une solution complètement manuelle. De ceci découle

une activité humaine (en utilisation normale) allant de la manipulation des commandes à des efforts de manutention et une complète présence dans l'espace de travail. Dans le cas où il n'existe pas de retour d'expérience, les risques associés aux grandeurs physiques peuvent être déduits des réglementations et des normes (telles que les normes de conception et d'appréciation des risques).

3.1.2. Interaction Homme-Système

Cette interaction correspond avec l'étape de la conception architecturale du processus de conception. Du point de vue de la conception, les exigences techniques ainsi que la structure physique du produit sont établies et l'espace occupé est défini. D'une part, les zones dangereuses (zones d'énergie) liées à la solution choisie et d'autre part les lieux d'intervention de l'humain peuvent être spécifiées. Les zones dangereuses sont caractérisées par une forme, un volume, une localisation et une gravité. La forme est fonction du type d'énergie choisie. Le volume dépend du niveau d'énergie présent dans la solution. La localisation est issue de la structure fonctionnelle et de l'agencement structurel des principes de solution. Enfin, la gravité dépend du niveau d'énergie et des effets possibles sur l'humain. Ces effets sont fonction de la localisation de l'homme par rapport aux zones et de là découlera le siège de la lésion. Ainsi, suivant les effets tolérés sur l'humain, la solution est acceptée ou rejetée. A cette étape de la conception, les interactions avec l'homme sont là encore de deux types. D'abord, il y a celles relatives au milieu d'utilisation qui concernent plus spécifiquement l'homme à travers la spécification de ses caractéristiques humaines qui sont connues et exprimables en termes de contraintes. Et il y a celles qui sont en relation directe avec la nature des paramètres structurants de la solution sélectionnée. Dans ce deuxième cas d'interaction, les exigences générées sont relatives à la solution physique choisie et sont exprimées en tant qu'exigences fonctionnelles de sécurité.

3.1.3. Interaction Homme-Machine

Cette interaction correspond à l'étape de la conception détaillée du processus de conception. Du point de vue de la conception, les plans de définition du produit sont établis et le choix des composants, des matériaux, ... est réalisé. Notons que cette interaction correspond à l'étape à la suite de laquelle les risques sont traditionnellement analysés et les actions correctives sont implémentées à la solution détaillée. Dans notre approche, les risques d'accidents et les

problèmes d'ergonomie majeurs sont traités aux étapes précédentes. Ici, nous nous intéressons à l'étude de l'effet des composants choisis sur les caractéristiques humaines. De même que pour l'étape précédente, ces composants sont décrits par des caractéristiques physiques. Nous étudions alors la nature de l'interaction de ces caractéristiques avec celles de l'homme. Il s'agit de traiter les risques mineurs qui subsistent dans le produit. L'analyse des modes des défaillances peut aussi faire l'objet de ce niveau d'interaction. Mais cela, n'a vraiment de sens vis-à-vis de la sécurité humaine que s'il existe des risques provenant des étapes précédentes et qui n'ont pas été résolus à l'étape correspondante. Enfin, les interactions avec l'homme, à cette étape de la conception, dérivent essentiellement de la solution technique choisie et sont exprimés sous forme d'exigences fonctionnelles de sécurité.

3.2. Description du processus de conception du modèle

Comme l'illustre la Figure 3.5, les exigences du CdC interviennent dans les trois étapes de la conception. Ainsi, suivant la nature de l'exigence et son niveau d'abstraction, cette dernière va intervenir à l'une ou l'autre des étapes de conception. De plus les exigences fonctionnelles, même techniques, ne sont jamais entièrement définies au début de la conception. Il est ainsi clair que le processus de développement physique du produit est accompagné par une intégration et une élaboration continue des exigences. En conséquence, chaque étape du processus de conception est divisée en deux domaines: fonctionnel et physique. Le domaine fonctionnel correspond aux exigences techniques et le domaine physique aux solutions techniques.

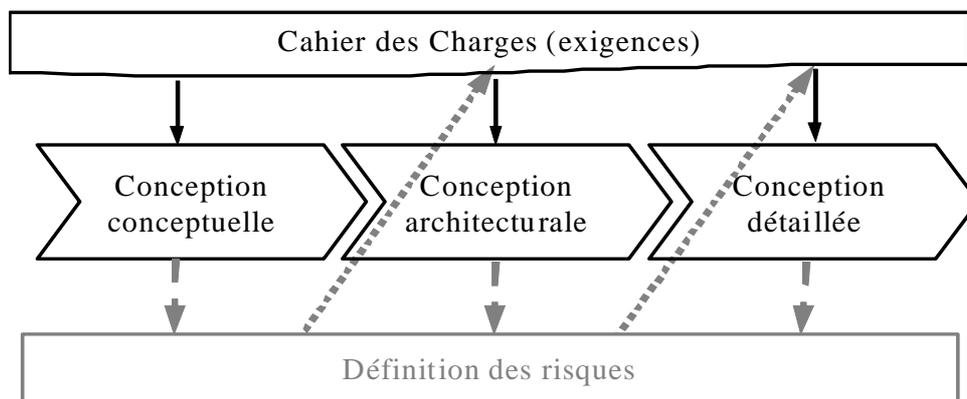


Figure 3.5 : Vue fonctionnelle et vue physique du processus de conception

Ainsi, dans notre processus de conception chaque étape de conceptualisation de

l'approche systématique définie par (Pahl&Beitz, 2007) admet une vue fonctionnelle et une vue physique. L'étape de clarification des tâches est considérée comme évoluant simultanément avec les trois autres étapes. Par conséquent, nous avons une représentation du processus de conception comme présenté par la Figure 3.6.

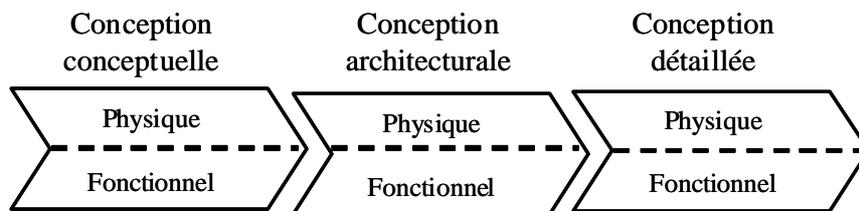


Figure 3.6 : Processus de conception du modèle

En effet, le processus de conception présenté ci-dessus est inspiré du processus de conception décrit par (Ge, 2002) et appelé conception axiomatique étendue (Extended Axiomatic Design noté EAD). L'EAD est un processus à deux dimensions mettant en relation l'approche systématique (Pahl&Beitz, 2007) et la conception axiomatique (Suh, 1990). Elle considère que chacune des trois étapes de l'approche systématique (conceptuelle, architecturale et détaillée), correspondant au développement physique de la solution, est divisée en quatre domaines : client, fonctionnel, physique et processus. Ainsi, les exigences identifiées dans la phase de clarification des tâches de l'approche systématique sont divisées suivant leur nature et leur niveau d'abstraction en trois étapes. L'apport de cette description du processus de conception est de couvrir les manques des deux approches axiomatique et systématique mettant ainsi en lumière leur complémentarité. L'approche systématique consiste en une description des multiples tâches à faire (le Quoi) pour aboutir au développement du produit. Dans aucun cas, cette approche explique les moyens d'accomplir ces tâches (le Comment) considérés comme une phase de créativité. Ce manque montre la nécessité de compléter cette approche par une démarche qui explique ce passage du quoi au comment. Effectivement, la conception axiomatique donne les lois de la transition du domaine fonctionnel (le quoi) au domaine physique (le comment). Dans nos travaux, nous nous sommes limités aux domaines fonctionnel et physique. Le processus de conception que nous retenons est donc un processus à la fois systématique et itératif et est constitué de six phases (notées P_i ($i=1..6$)) comme l'illustre la Figure 3.7.

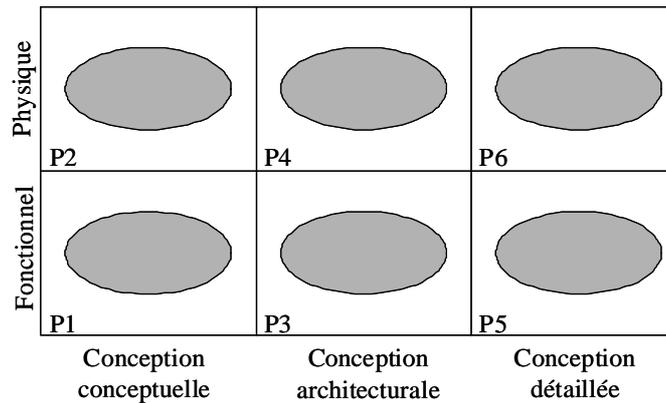


Figure 3.7 : Le processus de conception en six phases

Mais qu'est ce qui se passe plus particulièrement à chacune des phases ? Comment le produit est-il modélisé ? Les paragraphes ci-dessous dressent les typologies des modélisations du produit à chacune des phases de la conception.

3.2.1. Phase 1 (P1) : Exigences de conceptualisation

Cette phase possède comme point d'entrée l'exigence globale (notée FR_i) traduisant de manière fidèle le désir du client. Cette exigence admet un niveau d'abstraction 0 (la plus abstraite). Elle met en liaison deux éléments du milieu d'utilisation (EMU). Ainsi, un EMU_1 agit à travers le produit à concevoir sur un autre EMU_2 . Elle est généralement formulée par un *verbe à l'infinitif* + 2 EMUs + *compléments*. Cette formulation doit être indépendante de toute solution constructive.

Exemple de formulation d'une FR_i : dans le cas des liaisons tracteur-outils l'exigence globale en phase d'attelage d'un outil porté doit être formulée comme suit: **Porter l'outil par le tracteur** et non pas **Lier l'outil au tracteur**. L'exigence globale doit être la plus proche du désir de l'utilisateur. En effet, la deuxième formulation est dirigée par les solutions techniques existantes.

Décomposition de l'exigence globale en sous-exigences (ou exigences principales) – Selon la complexité du problème, l'exigence globale est à son tour plus ou moins complexe. La complexité d'une exigence signifie que la relation entre les deux EMUs correspondants n'est pas transparente, ce qui veut dire que le nombre de composants qu'elle va générer est relativement important. En effet, de la même manière qu'un système peut être décomposé en sous-systèmes et

composants, une exigence globale peut être décomposée en sous-exigences de moindre complexité. L'objectif de cette décomposition est double; d'abord celle-ci permet de déterminer les exigences principales qui permettront de faciliter la recherche de solutions, ensuite elle permet de combiner ces exigences en une structure fonctionnelle simple et sans ambiguïté.

La base de la décomposition fonctionnelle est déduite (1) des caractéristiques des EMUs de l'exigence globale et de celles de l'exigence globale même; (2) du premier principe de solution imaginée (dans le domaine physique) répondant à l'exigence globale la plus abstraite.

A cette étape de la conception, la décomposition fonctionnelle s'arrête au moment où le principe de solution répondant aux sous-exigences est défini. Ci-après une liste de la typologie d'objets qui forment cette phase :

- **Produit** – ce dont l'utilisateur éprouve la nécessité et/ou ressent le désir, y compris ses attentes implicites.
- **Cycle de vie du produit** – ensemble de toutes les situations dans lesquelles se trouve (ou se trouvera) le produit au cours de sa vie, à partir de l'expression de son besoin jusqu'au retrait du service.
- **Profil de vie du produit** – ensemble des situations du produit dans sa phase d'utilisation. Ces situations peuvent être d'emploi ou de non emploi (stockage, entretien,...).
- **Exigences de conceptualisation (ou Principales)** – exigences qui expriment le désir de l'utilisateur et provenant de la décomposition de l'exigence globale à l'étape de la conception conceptuelle. Généralement, le niveau d'abstraction de ces exigences fonctionnelles varie entre 0 et 3.
- **Contraintes (Csi)** – limitations à la liberté du concepteur jugées nécessaires par le demandeur de natures diverses telles que : délais, normes, sécurité....
- **Éléments du milieu d'utilisation (EMU)** – éléments en interaction avec le produit dans la phase de vie considérée.
- **Variables critères** – variables qu'une exigence fonctionnelle doit respecter pour être acceptée afin que la solution soit valide. Ces variables correspondent à un intervalle à deux bornes.
- **Valeurs des EMUs** – niveau d'adaptation d'une solution. Il s'agit généralement

d'une valeur limite au-delà de laquelle la solution n'est pas acceptée;

- **Utilisateurs** – types d'utilisateurs concernés. Cet objet décrit les caractéristiques de la population visée.

3.2.2. Phase 2 (P2) : Principe de la solution

A partir de l'exigence globale, un ou plusieurs principes de solutions sont proposés. La recherche des principes de solutions est guidée par les méthodes et outils de recherche de solutions. Pour chaque exigence fonctionnelle, plusieurs principes de solutions peuvent être envisageables.

Décomposition du principe de solution en sous-principes – Si la complexité et le niveau d'abstraction du problème permettent une décomposition fonctionnelle (dans le domaine fonctionnel), ceci va se traduire dans le domaine physique par une décomposition du principe de solution en sous-principes. Ainsi, il est nécessaire de trouver un ou plusieurs principe(s) de solution pour chaque sous-exigence. La combinaison de ces sous-principes de solution va générer le principe de la solution. Un principe de solution doit refléter les effets physiques constituant la solution et permettant de remplir l'exigence fonctionnelle correspondante. L'analyse de la décomposition (ou structure fonctionnelle) va permettre d'identifier les sous-exigences qui nécessitent la recherche d'un nouveau principe de solution de celles pour qui des solutions standards peuvent être utilisées.

Pour rechercher un principe de solution des sous-exigences, il est toujours utile de suivre les indications suivantes, (1) se concentrer en premier sur les sous-exigences qui déterminent le principe de la solution détaillée et pour lequel il n'existe pas de solution standard; (2) si le principe de solution n'est pas standard, il doit dériver des effets physiques. Dans le cas contraire, il convient de choisir les paramètres appropriés (géométrie fonctionnelle, mouvements nécessaires et matériaux). Il est utile d'utiliser des check-lists pour stimuler des idées nouvelles; (3) les solutions trouvées d'une manière intuitive doivent être analysées afin d'en ressortir les critères clés pour l'évaluation d'un principe de solution particulier; (4) la comparaison des solutions se fait selon les propriétés caractéristiques de chaque principe de solution.

Parmi les critères de sélection et de comparaison à l'étape de la conception conceptuelle, nous trouvons (Pahl&Beitz, 2007) :

- **Les caractéristiques du principe de solution** ; sa simplicité et clarté de fonctionnement, l'adéquation de l'effet physique en question avec les besoins de la conception.
- **Les données structurelles** ; un nombre minimum de composants, complexité minimale, espace exigé.
- **Le contrôle qualité** ; exige un nombre minimal de tests et de surveillance, procédure simple et fiable.
- **Le transport** ; les risques liés à l'énergie en cas de transport.

Ci-après une liste de la typologie des objets qui forment cette phase :

- **Effet physique du principe de solution** – effet scientifique qui permet de réaliser le "mouvement" nécessaire ;
- **Energie** – type d'énergie que le principe de solution renferme ;
- **Niveau d'énergie disponible** – intensité maximale de l'énergie utilisée ;
- **Caractéristiques des interfaces avec EMUs** – dimensions principales, espacement, positionnement nécessaires ;
- **Modes de propagation de l'énergie** – type et manière avec laquelle l'énergie se propage entre les éléments ;
- **Grandeurs physiques** – caractéristiques physiques expliquant le fonctionnement du principe physique de la solution ;
- **Paramètres de conception** – paramètres non quantifiés qui vont permettre de définir le produit. La grande partie de ces paramètres est identifiée et quantifiée au fil de la conception.

3.2.3. Phase 3 (P3) : Exigences de structuration

Cette phase possède comme point d'entrée les exigences fonctionnelles terminales de l'arbre à l'étape de la conception conceptuelle. Il s'agit des exigences principales expliquant les fonctionnalités nécessaires du produit. A l'étape de la conception architecturale, ces exigences vont se diviser en sous-exigences.

Tout comme les exigences de l'étape de la conception conceptuelle, ces exigences peuvent être exprimées par un *verbe à l'infinitif + 2 EMUs + compléments*. Ces exigences vont exprimer le type de mouvements relatifs entre les principes de solutions choisis dans la phase 2 et

ainsi affiner l'agencement structurel des groupes fonctionnels de la solution.

Décomposition de l'exigence en sous-exigences – De même que pour les exigences globales, l'exigence de premier niveau hiérarchique et relative à cette étape de la conception (qu'on appelle exigence mère) est à son tour plus ou moins complexe. Afin de réduire cette complexité, l'exigence mère est décomposée en sous-exigences de moindre complexité. L'objectif de cette décomposition est double; d'abord faciliter la recherche de solutions; ensuite combiner ces solutions en une seule répondant à l'exigence mère.

La base de la décomposition fonctionnelle est déduite (1) des caractéristiques des EMUs ou des composants de l'exigence mère et de celles de l'exigence mère; (2) et des premiers principes de solution imaginés, dans le domaine physique, dans des phases précédentes de la conception. La traçabilité des choix (fonctionnel et physique) est donc conservée dans un arbre afin de permettre un affinement le plus en adéquation possible avec les objectifs d'origine et la solution afin d'éviter les conceptions couplée ou redondante.

A cette étape de la conception, la décomposition fonctionnelle s'arrête au moment où toutes les exigences définissant les relations et par suite le type de liaisons ainsi que les différents composants principaux du produit ont été identifiés. Ci-après une liste de la typologie d'objets qui forment cette phase :

- ***Exigences de structuration*** – exigences qui déterminent le positionnement relatif, la direction des mouvements, les flux nécessaires.
- ***Variables critères*** – variables qu'une exigence doit respecter pour être acceptée afin que la solution soit valide.
- ***Contraintes spatiales*** – contraintes qui permettent de déterminer le positionnement spatial de la solution ainsi que ses premières dimensions ;
- ***Contraintes temporelles*** – contraintes qui permettent de déterminer un séquençement du fonctionnement des différents principes ;
- ***Contraintes de résistances à l'environnement*** – contraintes qui permettent de déterminer le couple poids/matériau;
- ***Contraintes d'assemblage*** – contraintes de compatibilités entre les différents types d'énergie.

Les valeurs de ces exigences peuvent provenir aussi bien de la situation d'utilisation du produit que des autres situations de vie : recyclage, production, démantèlement, installation ...

3.2.4. Phase 4 (P4) : Structure de la solution

A partir des exigences fonctionnelles, un ou plusieurs principes de solutions sont proposés. La recherche des principes de solutions est guidée par les méthodes et outils de résolution des problèmes techniques. Dans cette phase, les principes de solutions correspondent aux liaisons qui vont permettre l'arrangement de la structure de la solution.

Décomposition du principe de solution en composants et liaisons – Le résultat de cette étape de conception consiste à définir la structure de la solution. Si la complexité et le niveau d'abstraction du problème permettent une décomposition fonctionnelle (dans le domaine fonctionnel), ceci va se traduire dans le domaine physique par une décomposition du principe de solution en sous-principes. Ainsi, il est nécessaire de trouver une ou plusieurs solutions pour chaque exigence. La combinaison de ces solutions va générer la structure de la solution. L'analyse de la décomposition (ou structure fonctionnelle) va permettre d'identifier les exigences qui nécessitent la recherche d'un nouveau principe de solution de celles pour qui des solutions ou des composants standards peuvent être utilisés. D'abord et à partir du principe de solution de (P2) (cf. Figure 3.7), il s'agit d'identifier les exigences auxiliaires essentielles (comme des supports, des refroidisseurs, des isolateurs,...) et si possible regarder les solutions connues pour les satisfaire (composants standards, catalogues,...). Dans le cas où, il s'avère impossible de résoudre le problème, il faudra rechercher des solutions nouvelles non exploitées auparavant.

Lors de l'élaboration de l'arbre physique et par suite de l'architecture du produit, toutes les variables de conception doivent être identifiées, clarifiées, approuvées et optimisées. Plus on passe du temps à les examiner, moins il existe d'incertitudes dans le choix des solutions et plus on est certain d'effectuer les bons choix. Il peut paraître au fil de la conception qu'une ou plusieurs exigences ne soient pas satisfaites ou que certaines caractéristiques du concept choisi soient inadaptées. Dans ce cas, il sera utile de réexaminer les phases précédentes de la conception conceptuelle, car la meilleure conception architecturale ne peut pas améliorer un mauvais concept.

Cette étape démarre avec le principe de solution choisi à l'étape de la conception

conceptuelle et l'identification des premières exigences de structuration. Il est utile de commencer par satisfaire les exigences qui ont un effet crucial sur l'architecture de la solution :

- Les exigences déterminant les dimensions ;
- Les exigences déterminant l'arrangement ;
- Les exigences déterminant le type de matériau.

Une fois ces exigences remplies, il est important de satisfaire les variables de conception des composants répondant aux exigences de conceptualisation.

A cette étape de la conception, la décomposition physique s'arrête au moment où toutes les liaisons définissant les relations entre les différents composants ainsi que les composants principaux sont identifiés. Ci-après une liste non exhaustive de la typologie d'objets qui forment cette phase :

- **Architecture** – agencement structurel des composants choisis, l'architecture est généralement présentée sous forme de schéma ;
- **Technologie** – composants standards à choisir ;
- **Composant** – composants à définir, à dimensionner ;
- **Dimension** – toute dimension caractérisant le produit et ses composants ;
- **Liaison** – type de la liaison, nombre et type de degrés de liberté, axes, position spatiale ;
- **Forme fonctionnelle** – nature des formes des surfaces fonctionnelles ;
- **Paramètres de conception** – paramètres non quantifiés qui vont permettre de définir le produit. La grande partie de ces paramètres est identifiée et quantifiée au fil de la conception ;
- **Matériau** – types et caractéristiques physiques, chimiques... ;
- **Contraintes de rigidité** – charges, flexions, torsions, pressions,...

3.2.5. Phase 5 (P5) : Exigences de finition

Cette phase possède comme point d'entrée les exigences de structuration terminales de l'arbre à l'étape de la conception architecturale. A l'étape de la conception détaillée, ces exigences vont se diviser en sous-exigences. Il s'agit d'exigences fonctionnelles élémentaires ou de finition. Nous proposons d'exprimer ce type d'exigence, de la même manière que les exigences de conceptualisation et de structuration, par un verbe à l'infinitif + 2 EMUs +

compléments. Ces fonctions techniques élémentaires vont exprimer des nouveaux composants et des solutions élémentaires.

Décomposition de l'exigence en sous exigences – De même que pour les exigences de P1 et de P3 (cf. Figure 3.7), la fonction technique élémentaire du premier niveau (qu'on appelle exigence mère) est à son tour décomposée en deux ou plusieurs sous-exigences, si la complexité du problème le permet. L'objectif étant de faciliter et capitaliser les choix effectués tout au long de la conception.

La base de la décomposition fonctionnelle est déduite (1) des caractéristiques des EMUs et des composants de l'exigence mère et de celles des exigences à un niveau hiérarchique supérieur; (2) et des liaisons choisies, dans le domaine physique, dans les phases précédentes de la conception (P4) (cf. Figure 3.7).

A cette étape de la conception, la décomposition fonctionnelle s'arrête au moment où le produit est complètement défini. Ci-après une liste de la typologie d'objets qui forment cette phase :

- *Exigences de finition* – exigences qui expriment le besoin des derniers composants déterminant complètement le produit ;
- *Variables critères d'une exigence* – Variables qu'une exigence doit respecter pour être acceptée et pour que la solution soit valide. Ces variables concernent plus spécifiquement les surfaces en interface avec les EMUs et les composants du produit ;
- *Fonction d'une barrière* – fonction qui détermine les propriétés d'une barrière de sécurité.

3.2.6. Phase 6 (P6) : Détail de la solution

La conception détaillée est l'étape qui complète la conception architecturale des produits techniques par la définition des instructions finales sur les formes, l'arrangement, les dimensions et les propriétés des surfaces de tous les composants, considérés individuellement. Cette étape consiste aussi à effectuer une sélection définitive de matériaux et un examen des méthodes de production, des procédures et des coûts.

L'aspect le plus marquant de cette étape est l'élaboration des documents de fabrication et d'assemblage, incluant les plans de la définition détaillée des composants, des assemblages et une liste des composants appropriés. Aujourd'hui, ces activités sont énormément facilitées par le biais des logiciels de CAO.

La conception détaillée implique les actions suivantes :

- Finaliser la définition détaillée des composants, des formes, arrangements, surfaces, tolérances et d'assemblage ;
- Elaborer les documents de définition ;
- Positionner les composants individuels par rapport au produit complet ;
- Compléter les documents de production par des éléments concernant les outils, les assemblages, le transport et les instructions sur les opérations nécessaires ;
- Vérifier tous les documents, essentiellement les dessins détaillés et la liste des composants afin d'éliminer un éventuel oubli ou une incohérence.

A cette étape de la conception, la décomposition physique s'arrête au moment où le produit est complètement défini. Ci-après une liste de la typologie des objets qui forment cette phase :

- ***Eléments de fixation secondaire*** – éléments de maintien en position et transmission d'efforts ;
- ***Eléments d'étanchéité secondaire*** – éléments qui empêchent le passage des objets susceptibles d'affecter la qualité du composant ;
- ***Eléments de verrouillage*** – éléments de blocage en position ;
- ***Eléments de dissipation de l'énergie secondaire*** – éléments qui permettent de dégager l'énergie résiduelle contenue dans les composants ;
- ***Forme secondaire*** – toute forme n'ayant aucun effet sur la fonctionnalité du produit ;
- ***Barrière de sécurité*** – composants ayant pour objectif d'améliorer la sécurité et n'admettant aucune valeur ajoutée dans la fonctionnalité du produit.

Les différentes listes d'objets présentées pour les différentes phases sont à titre indicatif et

n'admettent pas un caractère exhaustif. Elles ont juste pour objectif de définir la typologie d'objets constituant chacune des phases. Cependant, ces listes peuvent varier suivant la typologie de la conception (innovante, routinière, ...) et les exigences principales du produit.

3.3.Description du processus du risque du modèle

Comme expliqué auparavant, la sécurité peut être définie comme l'absence d'un effet indésirable (accidents, incidents, blessures, arrêt de travail, etc.), ou comme l'état dans lequel les risques d'atteinte à la santé des personnes sont réduits ou maintenus à un niveau acceptable. Cet état de sécurité est atteint à travers un processus continu d'identification et de gestion des risques. L'arrivée à un état de sécurité nécessite une identification préalable des événements qui peuvent engendrer des effets indésirables aussi bien que les effets indésirables eux-mêmes. Cette identification constitue le cœur des méthodes et techniques d'analyse et d'évaluation des risques. Cependant, ces méthodes et techniques admettent un certain nombre de limites et pour être efficace nécessitent une bonne connaissance et compréhension du domaine d'application et du type de travail impliqué. De plus, l'efficacité de ces méthodes dépend considérablement des capacités de l'expert à imaginer des modes de défaillances et des combinaisons possibles.

Afin de pallier ces limites, notre modèle suggère d'effectuer une analyse systématique des ressources présentes dans un produit et ceci tout au long de son processus de développement. Cette analyse correspond à la description du processus du risque évoluant simultanément avec le processus de conception décrit auparavant. Le processus du risque correspond ainsi à la description des risques issus de l'interaction de l'homme avec les résultats de la conception à chacune des étapes.

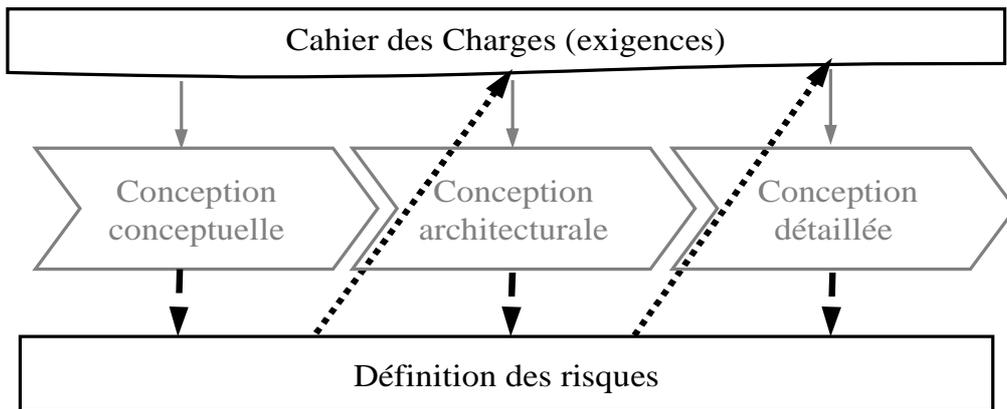


Figure 3.8 : Relation entre les domaines fonctionnel et physique du processus du risque

L'intégration de la sécurité dans la conception consiste en des itérations d'analyse et de synthèse des solutions se renforçant l'une l'autre. Comme l'illustre la Figure 3.8, la définition du risque est accompagnée par une élaboration continue de nouvelles exigences. Par conséquent, chaque type d'interactions du processus de risque est divisé en deux domaines: fonctionnel et physique (Figure 3.8). Le domaine fonctionnel correspond aux exigences de sécurité et le domaine physique à la définition des risques. En effet, ces deux vues fonctionnelle et physique sont issues de la correspondance entre le processus de conception et celui du risque. Etant donné que le processus de conception est constitué de six phases (notés P_i , $i=1..6$), le processus du risque est aussi constitué de six phases que nous appelons contextes (notés C_i , $i=1..6$) (Figure 3.9). Suivant la différence des caractéristiques inhérentes de ces deux processus (concepts contre connaissances), cette correspondance ne se fait pas de façon directe. Le mappage peut être un-à-un, un-à-plusieurs ou plusieurs-à-un (Figure 3.9).

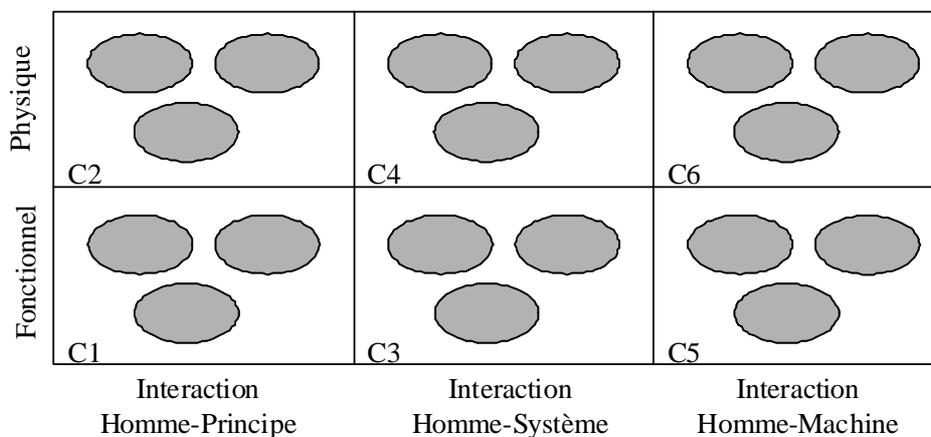


Figure 3.9 : Processus du risque en six contextes

Ce paragraphe se consacre à expliquer la démarche qui a permis de construire et déterminer les typologies des contextes du processus du risque (Ghemraoui, 2009a, 2009b). Chaque niveau d'interaction est composé d'un domaine fonctionnel et d'un domaine physique.

3.3.1. Contexte 1 (C1) : Exigences de sécurité des super-systèmes

Nous définissons les super-systèmes comme étant les éléments du milieu d'utilisation. Ces derniers peuvent être définis comme l'ensemble des composantes physiques, humaines, économiques... en relation avec le produit dans une situation donnée de son cycle de vie.

Ce contexte exprime les exigences de sécurité issues du milieu d'utilisation du produit. Ces exigences sont déduites des risques révélés dans le passé (le retour d'expérience) par l'utilisation du produit ou d'un produit similaire. Du point de vue de la conception dans la phase correspondante (P1), le produit est défini essentiellement par des exigences fonctionnelles techniques, des contraintes, des caractéristiques et un milieu d'utilisation. Ce contexte permet de compléter ces exigences par des exigences exprimant les risques liés au contexte d'utilisation et à compenser à travers la conception du produit. Ces exigences doivent avoir une expression la plus détachée possible de la solution mettant en lumière le ou les EMUs impliqués. Ensuite, elles sont intégrées dans le cahier des charges de conception soit en tant qu'exigence fonctionnelle soit en tant que contrainte. Quand il s'agit de prendre en considération des actions spécifiques ; comme par exemple : *Prévenir des accidents liés au renversement de la machine*; dans ce cas l'exigence de sécurité est spécifiée et correspond à une exigence fonctionnelle. Cependant, dans des situations où la conception ne peut pas dépasser une certaine limite, la sécurité est alors considérée comme une contrainte.

Comme expliqué précédemment, dans toute conception de produits il y a deux types d'exigences: les exigences externes et les exigences internes. Les exigences externes sont spécifiques pour toute conception. Les exigences internes sont celles relatives à une conception donnée; elles sont le résultat des décisions prises. De la même manière, nous considérons que les exigences de sécurité sont évolutives avec la conception. Certaines sont externes (exigences des EMUs et contraintes relatives aux caractéristiques de l'homme) d'autres proviennent des analyses des risques liés aux décisions prises et correspondent ainsi aux exigences internes. A la différence des exigences techniques, les exigences de sécurité sont majoritairement identifiées au cours de la

conception.

Les actions caractéristiques de ce contexte sont :

- Recenser les éléments du milieu d'utilisation, définir les phénomènes dangereux qui leurs sont associées, identifier leur nature et sévérité ;
- Décomposer les phénomènes dangereux en tenant compte des phases de vie concernées et des évènements potentiellement dangereux ;
- Décrire les ressources nécessaires, le mode de fonctionnement de l'EMU_i concerné et les modes d'intervention de l'utilisateur ;
- Définir les contraintes spatiales et temporelles de l'utilisateur relatif à l'environnement d'utilisation;
- Formuler l'exigence de sécurité. Nous proposons la formulation suivante d'une exigence de sécurité : Minimiser (*phénomène dangereux*) de (EMUi) par rapport à (*caractéristique affectée de l'utilisateur*) ;
- Spécifier l'exigence suivant le niveau et la nature du phénomène dangereux et des caractéristiques de ou des EMUs concernés ;
- Donner des ordres de priorités des différentes exigences en fonction de leur gravité.

En effet, la typologie de ce contexte est déduite de la nature des informations dans la phase 1 de la conception. Nous avons considéré qu'il existe une correspondance entre la phase 1 et le contexte 1. La typologie d'informations issues de cette correspondance est représentée dans la Figure 3.10.

Ci-après une liste non exhaustive de la typologie d'objets qui forment ce contexte:

- ***Exigences de sécurité externes*** – exigences fonctionnelles relatives aux éléments du milieu d'utilisation ;
- ***Vulnérabilité de l'homme*** – effets qu'a une énergie sur l'humain;
- ***Contrainte anthropométrique*** – contraintes relatives aux dimensions du corps humain de la population considérée ;
- ***Limitation physique*** – contraintes relatives aux postures, aux mouvements et aux forces physiques de l'humain de la population considérée ;

- **Limitation mentale** – niveau de formation, expérience, âge et le nombre de tâches simultanées autorisées pour la population considérée. Nous ne prenons pas en considération les facteurs organisationnels.

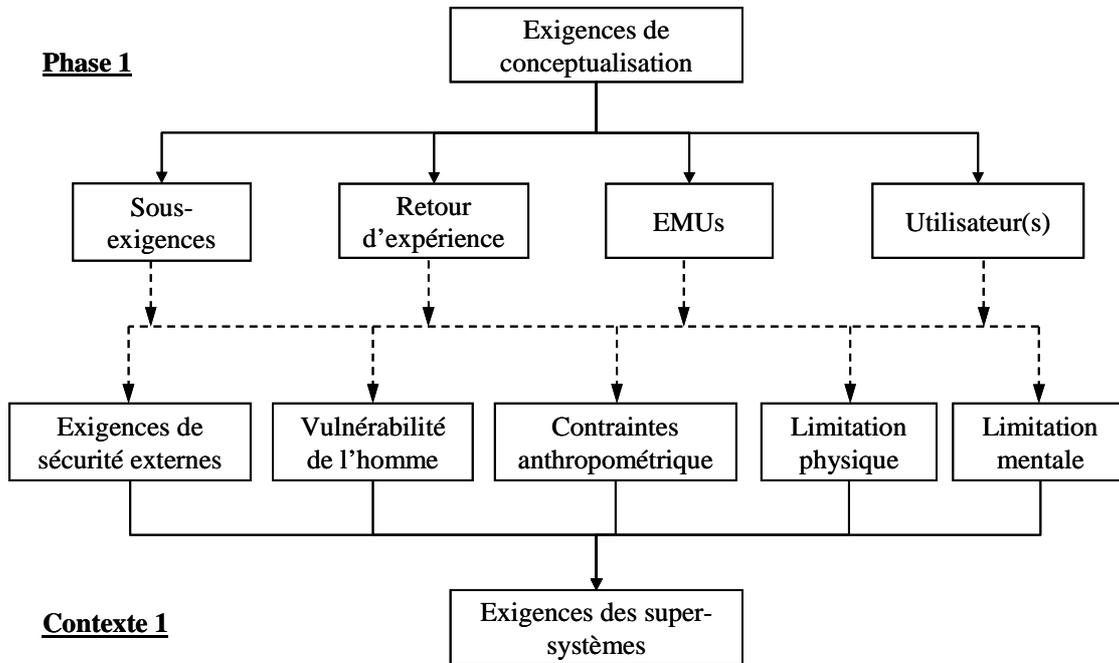


Figure 3.10 : Mappage Phase 1/ Contexte 1

3.3.2. Contexte 2 (C2) : Risques d'accidents

Ce contexte étudie les risques d'accidents liés aux phénomènes dangereux issus d'une part du terrain et d'autre part, de la nature du principe de la solution physique sélectionnée. Comme déjà défini, le phénomène dangereux est une source potentielle du dommage. Dans ce contexte, nous considérons qu'un phénomène dangereux est toujours généré par une source d'énergie et la nature du risque qui en découle est dépendante de la nature de l'énergie considérée. Dans le cas de la conception d'un nouveau produit, la nature du risque associée au type d'énergie utilisé peut être déduite des normalisations (tels que la norme (ISO, 2007)). Les phénomènes dangereux étant identifiés, les risques correspondant à chaque phénomène sont évalués. L'évaluation du risque s'effectue en fonction de l'intensité de l'énergie contenue dans un principe de solution. En tenant compte des critères de performance techniques, le principe de solution admettant le moins de risque est sélectionné.

A l'étape de la conception conceptuelle, on s'intéresse à étudier l'énergie utilisée dans les

principes de solutions retenus. Bien entendu, la valeur de l'énergie en interaction avec l'humain peut subir des modifications lors de la conception architecturale ou détaillée, mais nous considérons que moins le niveau d'énergie est élevé dans la solution plus elle est sécuritaire. En effet, les modifications qu'entraînent les étapes suivantes permettent de "cacher" cette énergie mais ne l'éliminent pas. De plus, les effets des risques engendrés par les choix de la conception diminuent au fur et à mesure que l'on avance dans la conception du produit, étant donné que plus on a des précisions sur le produit moins on a de décisions à prendre et moins les effets de nos choix sont importants.

De plus, les choix faits dans des étapes avancées du processus de conception vont permettre de réduire ou même d'amplifier les effets indésirables. Il convient donc de garder une traçabilité sur les choix faits à chaque niveau et d'étudier les événements possibles.

Les actions caractéristiques de ce contexte :

- Identifier et analyser l'énergie constituant le principe physique de la solution ;
- Déterminer la nature du risque, les effets possibles et évaluer la gravité.

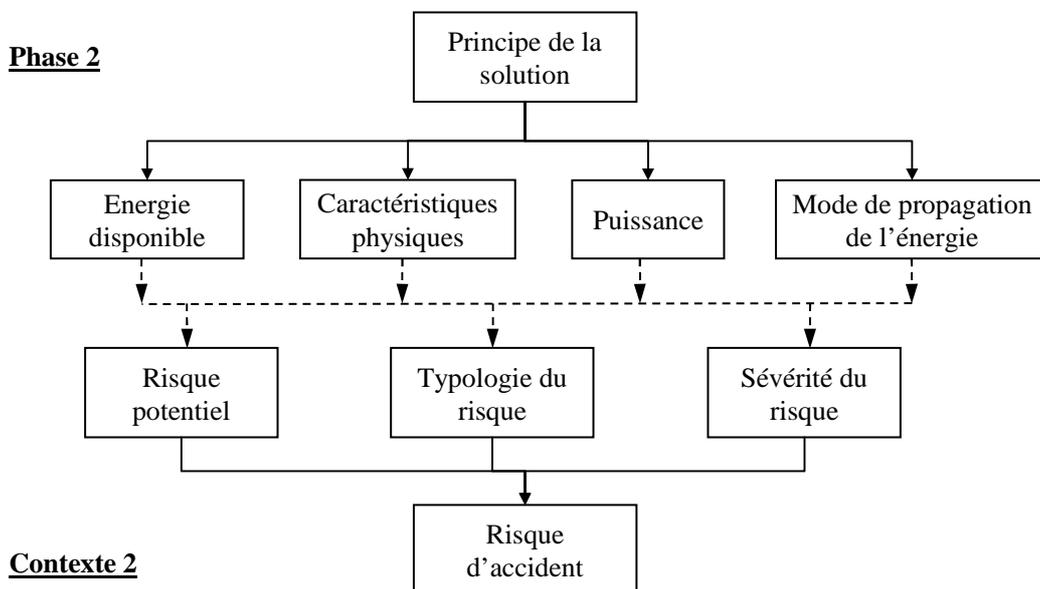


Figure 3.11 : Mappage Phase 2/ Contexte 2

En effet de même que pour le contexte 1, la typologie de ce contexte est déduite de la correspondance qui existe entre la phase 2 et le contexte 2. Les informations issues de cette

correspondance sont représentées dans la Figure 3.11.

Ci-après une liste de la typologie d'objets qui forment ce contexte:

- *Risque potentiel* – risque relatif à la solution physique;
- *Typologie du risque* – nature du risque relatif à la solution physique;
- *Sévérité du risque* – gravité du risque relatif à la solution physique.

3.3.3. Contexte 3 (C3) : Exigences de sécurité du système

Nous entendons par système la structure du produit basé sur l'ordonnancement des principes de solutions. Ce contexte décrit les exigences de sécurité qui vont guider le choix de cette structure. Du point de vue de l'humain, ce système va entraîner une certaine procédure de travail relative au fonctionnement du produit. Une procédure peut être définie comme un ensemble d'activités qui s'enchaînent de manière chronologique pour atteindre un objectif dans le contexte d'une organisation de travail. La procédure du point de vue de l'activité humaine correspond à l'organisation et la succession dans le temps et l'espace des tâches d'un individu ou l'enchaînement de toutes les actions d'un utilisateur au sein d'un système de travail.

Une procédure consiste à déterminer Qui fait Quoi, Où, Quand, Comment, Combien, et Pourquoi. Ce qui revient d'abord, à déterminer l'attribution des fonctions entre l'utilisateur et le produit, information qui provient directement du principe de solution retenu dans la phase P2. Ensuite, il s'agit de définir la nature de l'activité de l'utilisateur. Des contraintes spatiales et de la nature de l'activité, nous pouvons déduire les localisations possibles de l'utilisateur ainsi que la fréquence d'intervention. Toutes ces données sont reliées entre elles par une exigence principale qui traduit l'objectif ultime de l'utilisateur.

Attribution des fonctions – processus qui consiste à décider de la façon dont les fonctions du système seront exécutées par les hommes, des équipements et/ou du matériel informatique et/ou des logiciels (AFNOR, 2009).

Ainsi, ce contexte va permettre de réduire le champ des solutions possibles pour l'agencement structurel des principes de solutions, en fonction des positions possibles et acceptables de l'utilisateur, ainsi que de ses données anthropométriques. De plus, suivant la

nature de l'activité de l'homme, des efforts maximaux requis devront être pris en compte, ce qui constituera des données d'entrée pour le dimensionnement et le choix de matériaux. Les données relatives à l'humain ne sont que des contraintes externes à la conception recensées au démarrage du processus. Elles peuvent être déduites du retour d'expérience ou des connaissances internes à une organisation. Un premier objectif de ce contexte est de mettre en place les exigences de séparation spatiale et temporelle de l'utilisateur des zones dangereuses quand elles existent.

En plus de ces exigences purement adaptatives, nous pouvons avoir des exigences fonctionnelles de sécurité. Ces dernières font l'objet des opérations d'analyse des choix physiques de la conception et correspondent à des exigences internes.

Enfin, la typologie des objets de ce contexte est déduite de la nature de la correspondance qui existe entre la phase 3 et le contexte 3. Les informations issues de cette correspondance sont représentées dans la Figure 3.12.

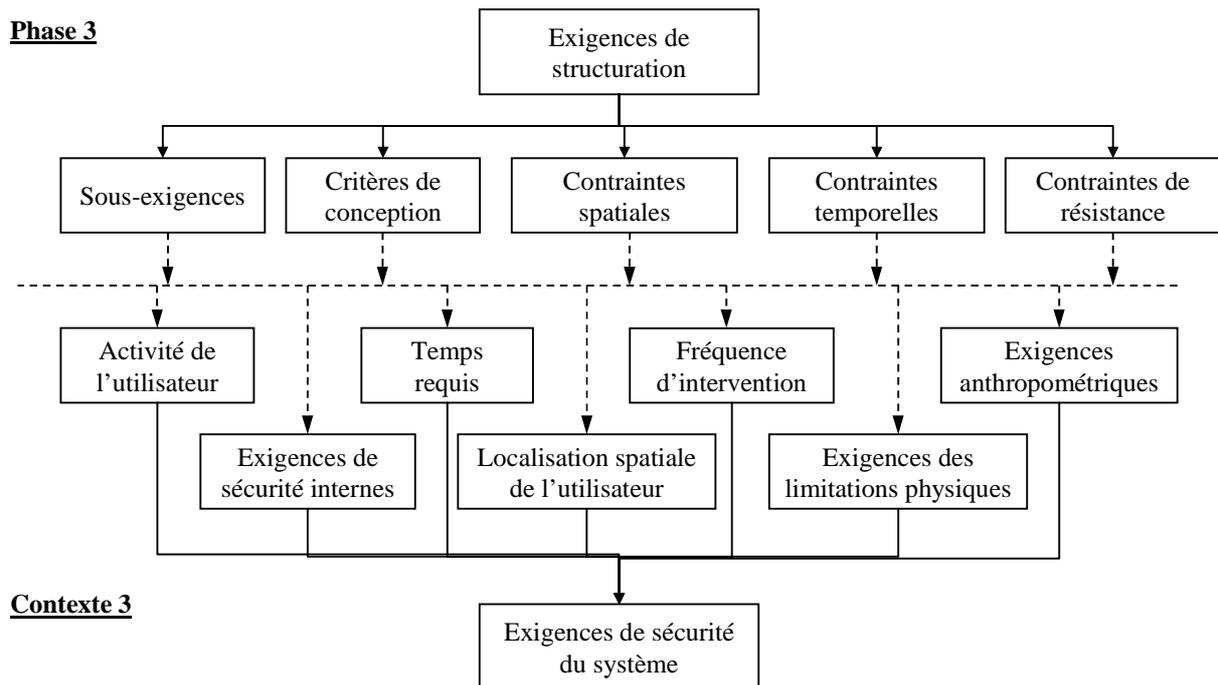


Figure 3.12 : Mappage Phase 3/ Contexte 3

Ci-après une liste de la typologie d'objets qui forment ce contexte:

- **Activité de l'utilisateur** : organisation dans le temps et l'espace des tâches de l'utilisateur ;

- **Exigences de sécurité internes** : exigences relatives à la solution et issues de l'étape précédente de la conception ;
- **Temps requis** : temps estimé pour effectuer une tâche ;
- **Fréquence d'intervention** : fréquence estimée d'une tâche ;
- **Localisation spatiale** : position de l'utilisateur dans l'espace ;
- **Exigences des limitations physiques** : contraintes spécifiées à l'issue des choix de la conception et relatives aux données physiques de l'humain ;
- **Exigences anthropométriques** : contraintes spécifiées à l'issue des choix de la conception et relatives aux mesures du corps humain.

3.3.4. Contexte 4 (C4) : Risques ergonomiques

Ce contexte va consister à décrire les risques relatifs à la violation des limitations humaines d'un point de vue ergonomique. L'architecture du produit étant conçue dans la phase 4, ce contexte permet une description des zones dangereuses, la localisation de l'utilisation et la caractérisation des tâches qui lui sont attribuées. Une zone dangereuse est tout espace géométrique, à l'intérieur et/ou autour d'une machine, dans lequel une personne peut être exposée à un phénomène dangereux (ISO, 2007). En principe, c'est un espace qui délimite le phénomène dangereux. Une zone dangereuse peut être présente en permanence ou apparaître d'une manière inattendue suite à un évènement dangereux. Ainsi, à cette phase de la conception un phénomène dangereux a un effet quand (1) la tâche qui lui est accordée n'est pas ergonomique ou ; quand (2) l'utilisateur se trouve à un moment donné dans la zone où l'énergie est dissipée dans la zone dangereuse. Dans ce contexte, les risques sont alors de deux natures : ceux internes à cette étape et correspondent à des risques ergonomiques et ceux externes à cette étape mais internes à la conception. Ces derniers correspondent à des risques d'accidents non solutionnés à l'étape de la conception conceptuelle.

Les risques d'ergonomie sont caractérisés par une tâche. Cette tâche définit une localisation spatiale de l'utilisateur, une posture, un mouvement, des efforts physiques et mentaux. Les zones dangereuses sont définies par une forme, une localisation, un volume et une gravité, auxquelles est associé un phénomène dangereux. Nous considérons qu'il existe deux types de zones dangereuses; celles issues du terrain et celles relatives à la solution. Les premières constituent les zones dangereuses externes qui vont engendrer une première limitation du champ

de la solution. Ces zones sont considérées existantes et la solution cherche à compenser leurs effets. Le deuxième type de zones dangereuses sont celles générées par les décisions prises lors de la conception et sont internes au produit. S'il existe plusieurs risques, ceux-ci doivent être classés suivant leurs effets potentiels sur l'humain. Enfin, dans ce contexte il s'agit d'étudier la compatibilité du squelette de la solution avec celui de l'utilisateur.

En tenant compte des critères de performance techniques, l'agencement structurel admettant le moins de risques est sélectionné. Bien entendu, le niveau du risque en interaction avec l'humain peut subir des modifications lors de la conception détaillée. Cependant, nous considérons que moins l'architecture permet une confrontation zone dangereuse/homme plus elle est sécuritaire. Les modifications entraînées par les étapes suivantes vont conduire à l'ajout de composants et à la complication de la solution. Les effets des risques engendrés par les choix de la conception diminuent au fur et à mesure que l'on avance dans la conception du produit, étant donné que plus on a des précisions sur le produit moins on a une liberté dans les décisions prises et moins les effets de nos choix sont importants.

Les actions caractéristiques de ce contexte :

- Localiser l'utilisateur pour une tâche donnée ;
- Localiser les zones dangereuses pour une configuration donnée ;
- Confronter le squelette de la solution avec celui de l'homme pour la tâche considérée;
- Identifier les membres affectées de l'humain ainsi que les postures, mouvements et efforts exigés ;
- Classer les zones dangereuses des points de vue de la sévérité tenant compte du niveau d'énergie, de la vulnérabilité du membre affecté, de la pénibilité de la tâche, du temps passé et de la fréquence de l'intervention.

La Figure 3.13 montre la typologie d'objets contenus dans le contexte 4.

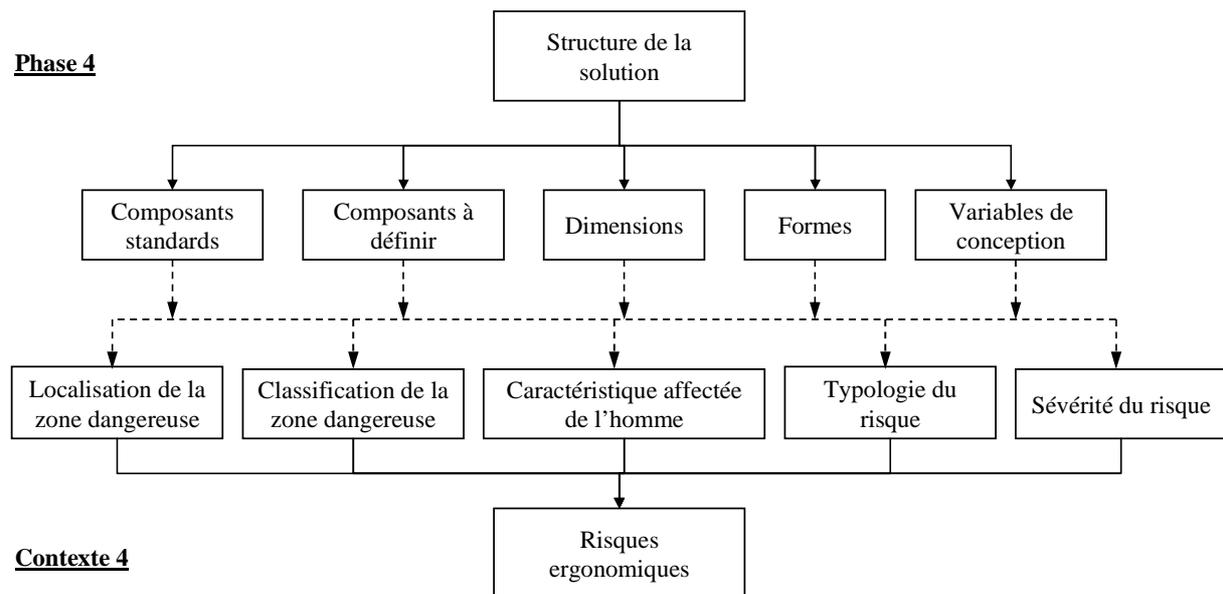


Figure 3.13 : Mappage Phase 4/ Contexte 4

Ci-après une liste de la typologie d'objets qui forment ce contexte:

- **Typologie du risque** – nature du risque relatif à la solution physique;
- **Sévérité du risque** – gravité du risque relatif à la solution physique.
- **Caractéristique affectée de l'homme** – paramètres impliqués dans la tâche;
- **Localisation de la zone dangereuse** – position dans l'espace de la zone d'énergie;
- **Classification de la zone dangereuse** – niveau de dangerosité de la zone dangereuse considérée.

3.3.5. Contexte 5 (C5) : Exigences de sécurité des sous-systèmes

Nous entendons par sous-systèmes les composants du système qui vont permettre la finition du produit et qui vont intervenir à l'étape de la conception détaillée. Ce contexte décrit les exigences de sécurité qui vont guider le choix des composants secondaires de la solution. Du point de vue de l'humain, ces composants sont à l'origine du fonctionnement du système, c'est eux qui constituent l'interface homme-machine. L'interface homme-machine décrit l'interaction entre l'utilisateur et le produit lors de l'utilisation. Cette interface est directement liée à la nature de l'activité humaine.

Ainsi, ce contexte va permettre de réduire le champ des solutions possibles pour le choix des derniers composants en fonction des caractéristiques requises de l'humain. Un premier

objectif de ce contexte est de mettre en place les exigences qui vont permettre le choix des derniers composants admettant le moins de risque.

A ce stade, la sécurité est exprimée principalement sous formes d'exigences fonctionnelles externes à l'étape de la conception détaillée mais interne à la solution. Les exigences sont principalement issues des étapes précédentes et correspondent aux problèmes non solutionnés. Généralement, les effets des exigences issues de cette étape sont minimales par rapport à la sécurité globale du produit.

Enfin, la typologie des objets de ce contexte est déduite de la nature de la correspondance qui existe entre la phase 5 et le contexte 5. Les informations issues de cette correspondance sont représentées dans la Figure 3.14.

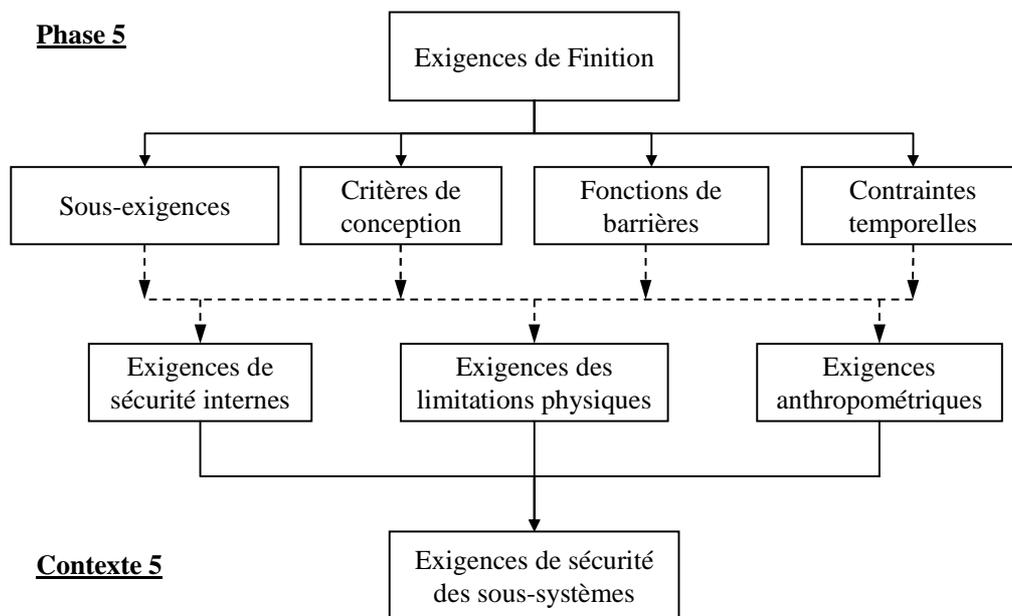


Figure 3.14 : Mappage Phase 5/ Contexte 5

Ci-après une liste de la typologie d'exigences qui forment ce contexte:

- **Exigences de sécurité internes** : exigences relatives à la solution et issues de l'étape précédente de la conception;
- **Exigences des limitations physiques** : contraintes spécifiées à l'issue des choix de la conception et relatives aux données physiques de l'humain;

- **Exigences anthropométriques** : contraintes spécifiées à l'issue des choix de la conception et relatives aux mesures du corps humain.

3.3.6. Contexte 6 (C6) : Risques résiduels

Nous définissons les risques résiduels comme étant les risques relatifs à la conception mais dont les effets sont minimales par rapport aux risques relatifs aux autres choix effectués au cours de la conception. A cette étape de la conception détaillée, les risques relatifs aux choix physiques peuvent engendrer soit des accidents soit des problèmes d'ergonomie.

Les composants du produit, et par suite leur architecture, étant conçus ou choisis dans la phase 6, ce contexte permet une description des phénomènes dangereux relatifs aux composants. Ces phénomènes sont relatifs d'une part à la structure du composant et d'autre part à l'énergie qu'il renferme et sont définis par des zones dangereuses. Ces zones sont définies par une forme, une localisation, un volume et une gravité. Ce type de risques est relatif aux décisions prises lors de la conception et sont internes au produit. Les phénomènes sont identifiés à l'aide du retour d'expérience issu de l'utilisation de ses composants dans d'autres conceptions. Dans le cas de la conception d'un nouveau composant, les phénomènes dangereux peuvent être déduits de l'étude des interactions potentielles entre le squelette du composant et le squelette de l'humain.

Les actions caractéristiques de ce contexte :

- Localiser les zones dangereuses pour un composant donné ;
- Confronter le squelette du composant avec la partie impliquée de l'homme pour la/les position(s) possible(s);
- Identifier l'importance de la caractéristique affectée de l'humain.

Ci-après une liste non exhaustive de la typologie d'objets qui forment ce contexte (Figure 3.15):

- **Typologie du risque** – nature du risque relatif à la solution physique;
- **Sévérité du risque** – gravité du risque relatif à la solution physique.
- **Caractéristique affectée de l'homme** – paramètres impliqués dans la tâche;
- **Localisation de la zone dangereuse** – position dans l'espace de la zone d'énergie;
- **Classification de la zone dangereuse** – niveau de dangerosité de la zone dangereuse

considérée.

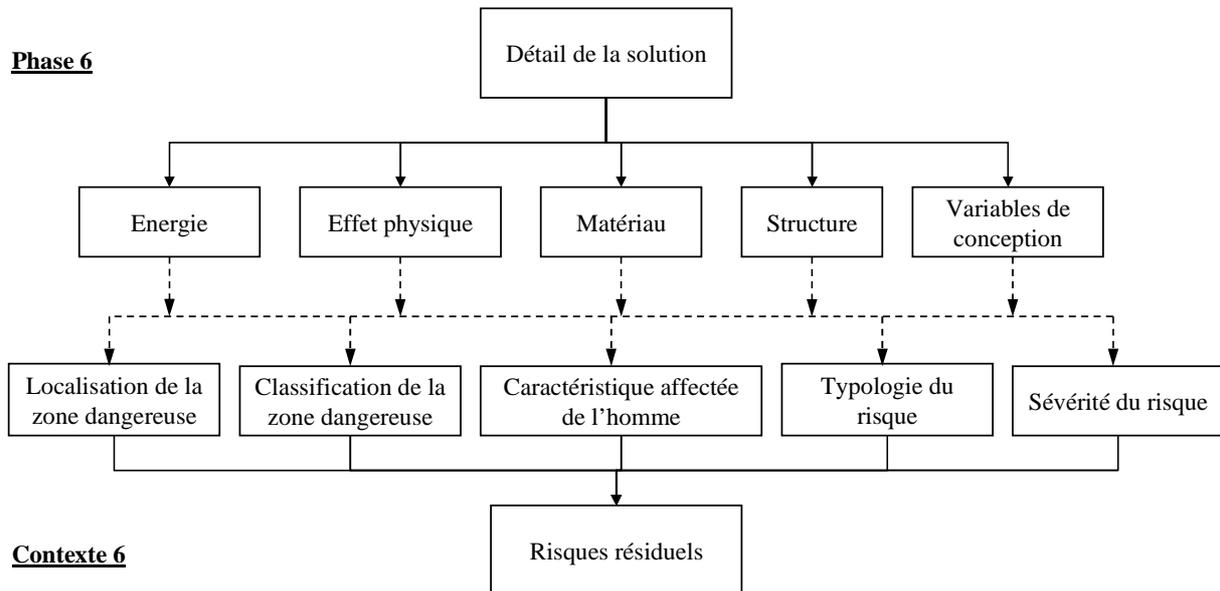


Figure 3.15 : Mappage Phase 6/ Contexte 6

Si tous les risques **d'atteinte à la santé** ont été étudiés et résolus à chacune des étapes de conception, il n'y aura aucun intérêt d'analyser les risques suivant les méthodes conventionnelles. Dans tous ces contextes, le problème de sécurité est considéré résolu à la phase correspondante.

Synthèse du chapitre III

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle que nous proposons pour l'intégration de la sécurité au plus tôt avec la conception du produit. Dans un premier temps, nous avons exposé les principes fondamentaux auxquels le modèle doit répondre pour assurer la sécurité. Ces principes sont au nombre de trois. Le premier principe insiste sur le **besoin d'identifier des objectifs de sécurité au même titre que les objectifs techniques** pour permettre une meilleure prise en compte de la sécurité lors de la conception. Le deuxième principe exige de **maintenir l'indépendance des exigences fonctionnelles** lors de la synthèse de solutions afin de minimiser la complexité du produit. Le troisième principe stipule une **minimisation de l'incompatibilité entre les paramètres de la conception et les caractéristiques humaines**. Ensuite, nous avons présenté les propriétés du modèle. Ce dernier consiste en une intégration de la conception systématique et de la conception axiomatique. Il considère deux processus, un processus de conception et un processus du risque, évoluant simultanément et affectant l'un l'autre

mutuellement. Enfin, nous avons détaillé le contenu des deux processus de conception et du risque. Le premier est constitué de six phases; trois fonctionnelles exprimant les exigences de la conception et trois physiques représentant la solution suivant les trois étapes hiérarchiques de la conception. Le deuxième est constitué de six contextes; trois fonctionnels exprimant les exigences de sécurité en fonction des trois étapes de la conception et trois physiques définissant les risques relatifs aux trois phases physiques de la conception. Les typologies d'objets constituant les phases et les contextes ont été développées.

Dans le chapitre suivant nous allons détailler la méthode de conception intégrant la sécurité que nous proposons sur la base du modèle développé dans le présent chapitre.

Chapitre IV

Méthode proposée (IRAD) Cas d'emploi et outils associées

*Les machines un jour pourront résoudre tous les problèmes, mais jamais
aucune d'entre elles ne pourra en poser un!*

Albert Einstein

Sommaire du Chapitre IV

Introduction	121
1. Cas d'emploi 1: Formalisation structurée du Retour d'Expérience.....	122
1.1. Description de la démarche de structuration du Retour d'Expérience.....	122
1.2. Outils d'analyse associés	124
1.3. Exemple d'application : Le robinet mélangeur.....	125
2. Cas d'emploi 2: Analyse de la solution technique en conception/ sécurité.....	128
2.1. Analyse de la conception.....	128
2.2. Analyse des risques	131
2.3. Outils de conception associés.....	135
2.4. Exemple d'application : le robinet mélangeur	138
3. Cas d'emploi 3: Synthèse des solutions.....	148
3.1. Description de la démarche de synthèse.....	148
3.2. Outils de conception associés.....	150
3.3. Exemple d'application : le robinet mélangeur	154
Synthèse du chapitre IV	158

1. Cas d'emploi 1: Formalisation structurée du Retour d'Expérience

1.1. Description de la démarche de structuration du Retour d'Expérience

Comme noté par (Bernard, 2002), un des problèmes majeurs des entreprises pour intégrer la sécurité est que le concepteur n'admet pas de moyens formels pour l'intégration systématique de la sécurité. Cette dernière intervient tantôt très tôt et retarde le concepteur, tantôt très tard et conduit à des actions correctives souvent coûteuses.

Comment décomposer les informations issues du retour d'expérience d'une manière structurée afin de l'intégrer formellement dans le processus de conception ? Le retour d'expérience peut correspondre à une insatisfaction technique (manque de performance, manque de fonctionnalité...) ou à un problème de sécurité (accidents, incidents...). Les insatisfactions techniques sont intégrées dans le processus de conception (phases P₂, P₄ et P₆) et les problèmes de sécurité sont intégrés dans le processus des risques (contextes C₂, C₄ et C₆). La Figure 4.2 illustre la démarche d'analyse du retour d'expérience et sa décomposition structurée (Ghemraoui, 2009c).

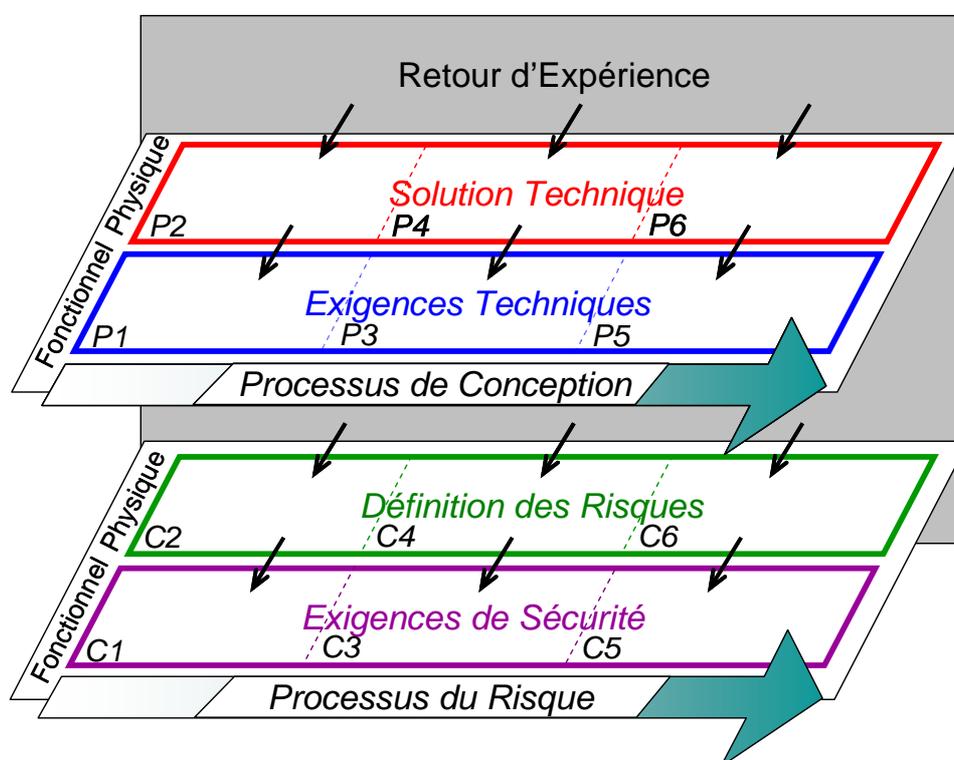


Figure 4.2 : Démarche d'analyse du retour d'expérience

Une analyse approfondie des insatisfactions est nécessaire afin de les situer par rapport à une des trois phases physiques de la conception; principe de la solution (P₂), structure de la

solution (P4) ou détail de la solution (P6). Les insatisfactions issues du principe de la solution sont converties en exigences de conceptualisation (P1). Les insatisfactions relatives à la structure de la solution sont traduites en exigences de structuration (P3). Enfin, les insatisfactions issues du détail de la solution sont exprimées en exigences de finition (P5).

Cependant, les problèmes de sécurité recueillis du terrain sont attachés suivant leur nature à un ou plusieurs des trois contextes physiques que nous avons proposé; risque d'accident (C2), risque ergonomique (C4) et risque résiduel (C6). Les risques d'accident issus des grandeurs physiques de la solution sont traduits en exigences de sécurité des super-systèmes (C1). Les problèmes d'ergonomie relatifs au non respect de certaines caractéristiques de l'utilisateur sont traduits en exigences de sécurité du système (C3). Enfin, les risques issus des détails d'un composant sont exprimés en exigences de sécurité des sous-systèmes (C5).

Les exigences des super-systèmes (C1) expriment les besoins en sécurité relatifs à la compensation des risques liés à l'environnement du produit. Ces risques expriment l'incompatibilité des grandeurs physiques avec la vulnérabilité de l'humain. Les exigences du système (C3) expriment principalement les risques issus d'une incompatibilité avec les capacités humaines et sont relatifs aux caractéristiques humaines. Enfin, les exigences des sous-systèmes (C5) correspondent aux risques liés au choix des composants en termes d'arrêt vif, énergie résiduelle, ...

Comment abstraire cette connaissance liée à l'utilisation d'une solution technique bien définie pour son intégration en tant qu'exigence dans la conception des produits nouveaux ? Abstraire une information issue du retour d'expérience consiste à l'exprimer sous forme d'exigence de sécurité. L'idée de base dans l'expression des exigences de sécurité, à partir d'un retour d'expérience, est de l'écrire suivant les caractéristiques humaines et les caractéristiques de l'environnement d'utilisation du produit. Etant donné que le retour d'expérience est issu d'un contexte d'utilisation et relatif à une solution connue, il convient de l'abstraire indépendamment de cette solution spécifique. Nous proposons alors de l'exprimer en fonction des caractéristiques de l'environnement d'utilisation (EMUs) et de la typologie des utilisateurs, qui demeurent inchangeables et par suite connus et caractérisables. Dans ce cas d'emploi, nous distinguons (1) la conception d'un nouveau produit en se basant sur le REX d'un produit similaire et (2) la reconception du produit. Dans la conception d'un nouveau produit, nous considérons que les exigences des super-systèmes doivent être

exprimées en termes d'exigences de sécurité, du fait qu'elles peuvent être spécifiées par des caractéristiques des éléments du milieu d'utilisation. Généralement, celles-ci peuvent être spécifiées mettant en relation l'EMU en question et l'utilisateur à travers une exigence qui exprime le risque à compenser. Cependant, les exigences du système et des sous-systèmes sont exprimées en tant que contraintes en fonction des caractéristiques humaines. Ces contraintes sont ensuite spécifiées au cours de la conception à travers l'analyse des risques à chacune des étapes. Cela provient du fait que l'on aura plus d'informations sur le produit afin de situer le risque dans la solution et connaître son origine. Néanmoins, dans le cas de la reconception, quand on ne cherche pas à reprendre la conception dès la définition du besoin, mais que l'on cherche la meilleure alternative pour améliorer la sécurité avec le minimum d'interventions sur la solution, les exigences du système et des sous-systèmes peuvent être exprimées sous forme d'exigences de sécurité du fait que l'on peut les spécifier. Les exigences systèmes sont essentiellement relatives à l'espace utilisable, disponible et à la temporisation des tâches. Les exigences des sous-systèmes expriment un paramètre de conception d'un composant ou une fonction d'une barrière à mettre en place.

1.2. Outils d'analyse associés

L'outil d'analyse que nous proposons pour ce cas d'emploi est une grille (Figure 4.3) de décomposition du REX (considéré sous forme de rapport et de scénarii) suivant les différentes phases et contextes de la méthode. Du retour d'expérience, nous différencions les risques issus de la conception même de ceux relatifs aux éléments du milieu d'utilisation et les caractéristiques humaines qu'elles nécessitent.

D'abord, il convient de recenser les événements indésirables et les événements intermédiaires (comme identifié dans un arbre des causes). Ensuite, suivant sa nature chaque événement est associé à un des contextes C2n (n=1,3). Cette association est guidée par la typologie des objets déterminés dans le chapitre III et constituants chacun des contextes. La grille proposée est la suivante :

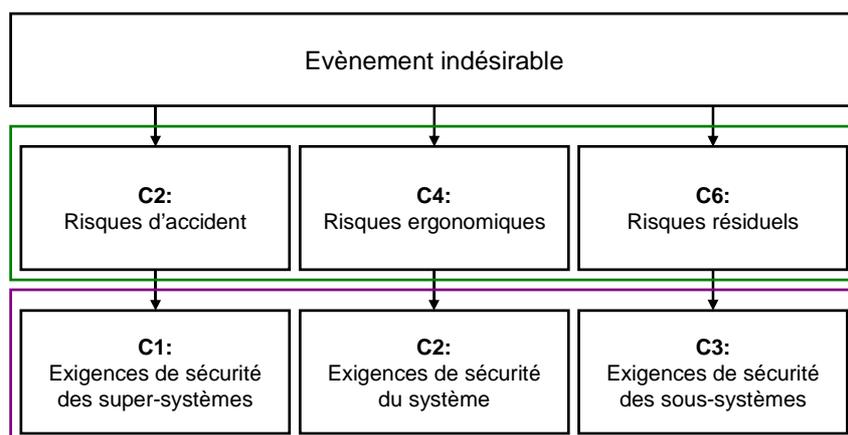


Figure 4.3 : Grille de décomposition du REX

1.3.Exemple d'application : Le robinet mélangeur

1.3.1. Analyse Fonctionnelle du Besoin et Cahier des Charges Fonctionnel

L'analyse fonctionnelle du besoin est une étape faisant généralement partie de la synthèse de solution. Nous l'avons placée dans ce cas d'emploi pour expliquer le système faisant l'objet de notre cas d'étude. Il s'agit du robinet mélangeur à usage domestique dédié au lavabo (Figure 4.4). Ainsi et à partir d'une entrée d'eau chaude et d'une entrée d'eau froide, l'utilisateur a besoin d'interconnecter ces deux entrées afin de pouvoir tempérer l'eau et contrôler son débit. Afin de simplifier l'application, nous considérons juste la situation d'emploi du profil de vie du robinet.

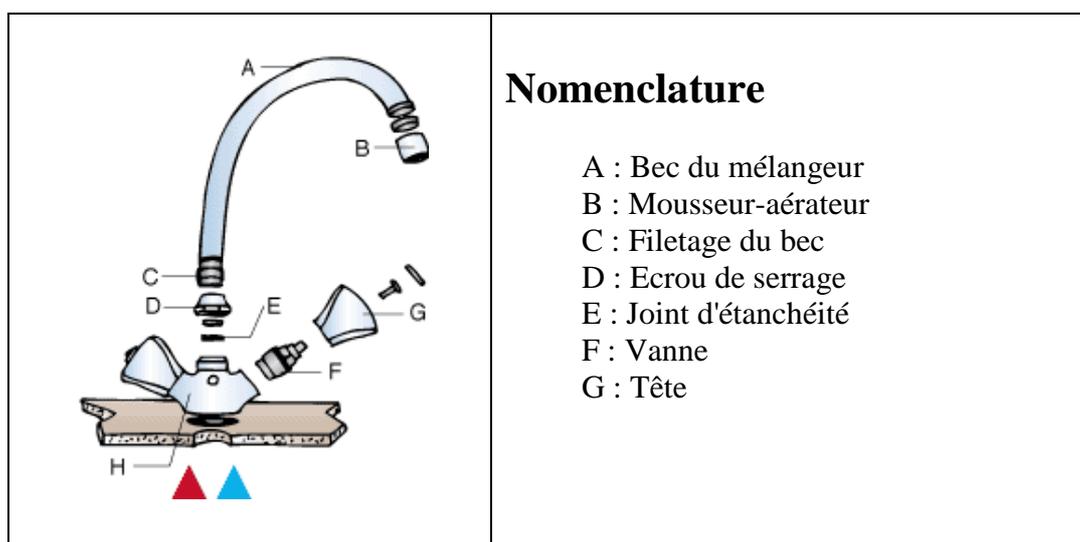


Figure 4.4 : Schématisation du robinet mélangeur et nomenclature

La Figure 4.5 montre les Eléments du Milieu d'Utilisation (EMUs) et leurs interactions avec le robinet (produit) dans la phase d'emploi.

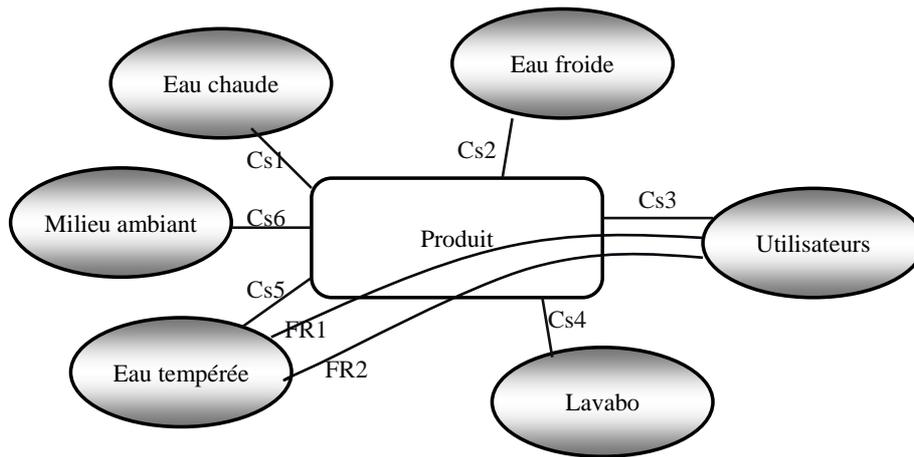


Figure 4.5 : Diagramme des interactions des EMUs

FR1 : Modifier la température de l'eau tempérée

FR2 : Modifier le débit de l'eau tempérée

Cs1: S'adapter à l'eau froide

Cs2: S'adapter à l'eau chaude

Cs3: S'adapter aux utilisateurs

Cs4: S'adapter au lavabo

Cs5: S'adapter à l'eau tempérée

Cs6: Résister au milieu ambiant

Ces EMUs et Fonctions sont caractérisés comme indiqué dans la Figure 4.6.

Fonction	EMUs associés	Variables de conception	Variables critères	Mesures
FR1 : Modifier la température de l'eau tempérée	$0 \leq T_m \leq 60^\circ\text{C}$		T_m	
FR2 : Modifier le débit de l'eau tempérée	$1,5 \leq P_m \leq 4$ bars		P_m	
Cs1: S'adapter à l'eau froide	$0^\circ\text{C} \leq T_f \leq 8^\circ\text{C}$ $4 \leq P_f \leq 8$ bars Caractéristiques physiques et chimiques	-Choix de matériaux (antioxydant) -Dimensionnement		
Cs2: S'adapter à l'eau chaude	$T_c = 60^\circ\text{C}$ $4 \text{ bars} \leq P_c \leq 8$ bars Caractéristiques physiques et chimiques	-Choix de matériaux (antioxydant) -Dimensionnement		
Cs3: S'adapter aux utilisateurs	Âge Population	-Effort d'utilisation	-Pression de sortie -Concentration du jet	1 à 90 ans Percentile 95°
Cs4: S'adapter au lavabo (mur compris)	Dimension et position du lavabo		-Contraintes géométriques -Étanchéité	

Cs5: S'adapter à l' <i>eau tempérée</i>	0 ≤ Tm ≤ 60°C 1,5 ≤ Pm ≤ 4 bars Caractéristiques physiques	-Choix de matériaux (antioxydant) -Dimensionnement		
Cs6: Résister au <i>milieu ambiant</i>	-Humidité -Taux d'oxygène - Salinité...	Choix de matériau	Corrosion, dégradation, durée de vie	

Figure 4.6 : Cahier des Charges Fonctionnel du robinet

1.3.2. Accidentologie et retour d'expérience (CSC)

Le principal accident lié à l'utilisation du robinet est la brûlure par **l'eau chaude** dont la température peut atteindre les 60°C. Il touche principalement les **jeunes enfants et les personnes âgées**. L'enfant s'amuse avec le robinet d'eau brûlante, est surpris par un "réglage" occasionnel de la source d'eau chaude ou effectue lui-même une fausse manœuvre du robinet. Concernant les personnes âgées le danger provient souvent d'une **mobilité réduite** qui leur interdit un retrait suffisamment rapide d'une partie de leur corps se trouvant en contact avec l'eau chaude. Cependant, au delà d'une température de 50°C les brûlures occasionnées commencent à être graves et la température légale de sécurité est de 38°C. La Figure 4.7 montre la relation entre la gravité des brûlures en fonction de la température de l'eau et le temps d'exposition.

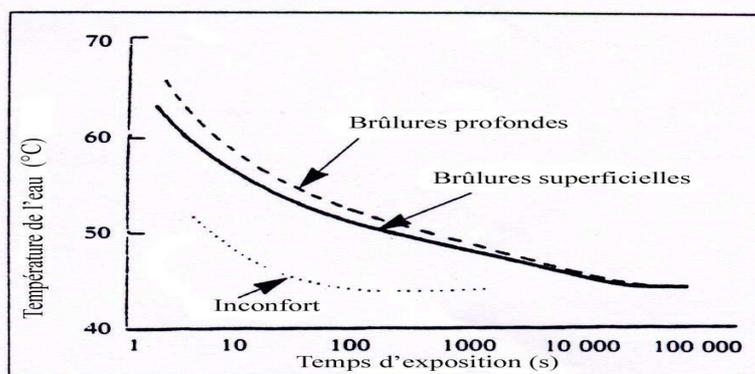


Figure 4.7 : Profondeur des brûlures en fonction du temps d'exposition et de la température (source Commission de la Sécurité des Consommateurs (CSC))

1.3.3. Elaboration des exigences de sécurité à partir du REX

Ce retour d'expérience va permettre de définir des exigences de sécurité comme le montre le tableau de la Figure 4.8. La température de l'eau chaude exprime un risque de brûlure qui correspond à un accident. Ainsi, cet évènement se place dans le contexte C2 « risque d'accident » du risque et doit donner lieu à une exigence de sécurité dans le contexte C1 « exigences des super-systèmes ». L'exigence de sécurité qui en découle nous l'exprimons par « SR_{1.1}: Minimiser la température de l'eau tempérée à moins de 50°C ». La mobilité réduite des personnes cibles constitue un risque ergonomique et donc appartient au contexte

C4 « risque d'ergonomie ». Ceci se traduit dans le contexte C3 « exigence du système » par « *SR_{2,1}: Minimiser le temps nécessaire pour modifier la température de l'eau tempérée en fonction du temps de réponse de l'utilisateur* ».

REX	Interaction	Physique	Fonctionnel
Brûlure par l'eau chaude	IHP	C2 : Risque d'accident Température maximale de l'eau tempérée > à 50°C	C1 : Exigences des super-systèmes <i>SR_{1,1}: Minimiser la température de l'eau tempérée à moins de 50°C</i>
	IHS	C4 : Risque d'ergonomie Mobilité réduite des personnes âgées et des enfants	C3 : Exigences du système <i>SR_{2,1}: Minimiser le temps nécessaire pour modifier la température de l'eau tempérée en fonction du temps de réponse de l'utilisateur</i>

Figure 4.8 : Grille d'analyse du REX du robinet mélangeur

Ainsi, la première exigence de sécurité (notée SR3) est intégrée dans le cahier des charges fonctionnel comme suit (Figure 4.9) :

Fonction	EMUs associés	Variables de conception	Variables critères	Mesures
FR1 : Modifier la température de l'eau tempérée	$0 \leq T_m \leq 60^\circ\text{C}$		T _m	
FR2 : Modifier le débit de l'eau tempérée	$1,5 \leq P_m \leq 4$ bars		P _m	
SR3 : Minimiser la température de l'eau tempérée à moins de 50°C	$0 \leq T_m \leq 50^\circ\text{C}$		T _m	

Figure 4.9 : Cahier des charges fonctionnel intégrant l'exigence de sécurité

2. Cas d'emploi 2: Analyse de la solution technique en conception/sécurité

2.1. Analyse de la conception

Ce cas d'emploi consiste à analyser comment la transition du domaine fonctionnel au domaine physique s'est effectuée dans le processus de conception. Ce cas trouve son intérêt dans le cas d'analyse de solutions existantes ou de solutions en cours de synthèse. Une représentation schématique de cette démarche d'analyse est donnée par la Figure 4.10.

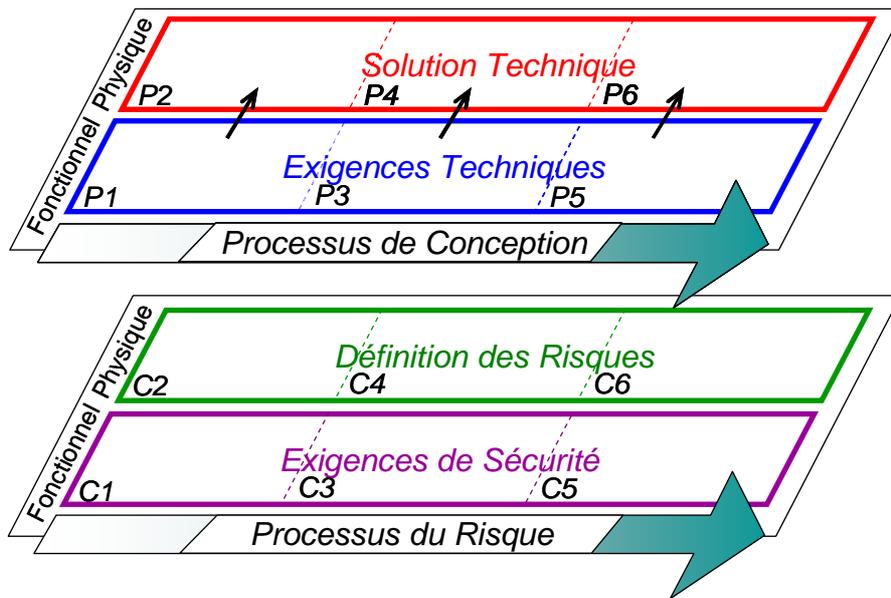


Figure 4.10 : Démarche d'analyse de la conception

Cette transition doit respecter l'axiome d'indépendance qui correspond au principe 2 de notre modèle. D'abord, il s'agit de vérifier que la structure de l'arbre des exigences fonctionnelles est la même que celles des paramètres de conception (Figure 4.11). Ce qui implique que:

- le nombre des paramètres de conception à chaque niveau hiérarchique doit être égal au nombre d'exigences fonctionnelles de ce même niveau;
- les exigences et ainsi les paramètres de conception d'un niveau hiérarchique inférieur découlent de ceux d'un niveau hiérarchique supérieur.

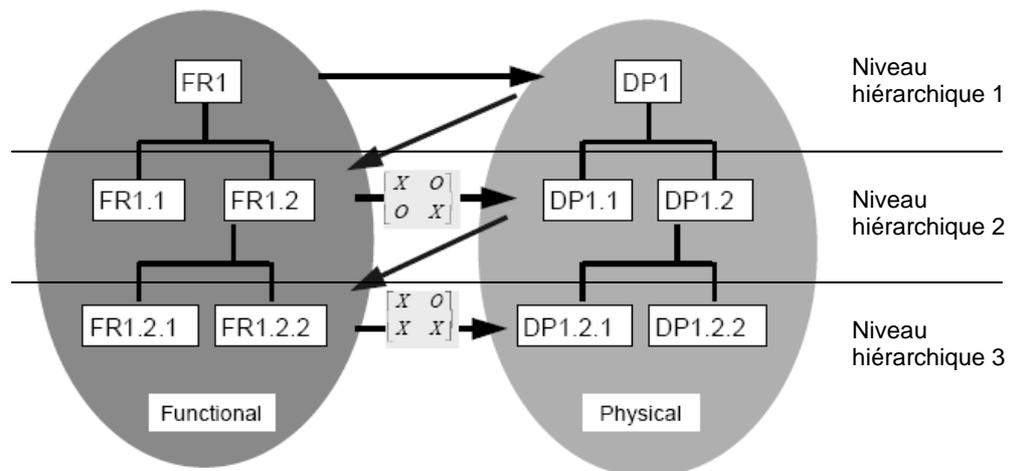


Figure 4.11 : Décomposition hiérarchique d'une conception

Ensuite, il s'agit d'étudier les couplages des exigences fonctionnelles (techniques et de sécurité). L'analyse de la solution technique du point de vue conception consiste à vérifier si l'axiome d'indépendance des exigences fonctionnelles est maintenu. Ainsi, la matrice de conception de chaque niveau hiérarchique doit être soit:

- non couplée et dans ce cas, il s'agit d'une conception idéale; tous les paramètres de conception fonctionnent de manière indépendante;
- découplée et dans ce cas, il existe un séquençement dans le fonctionnement des différents DPs du niveau hiérarchique correspondant.

Si la conception vérifie ces deux règles (hiérarchie et indépendance), la solution à l'étape correspondante de la conception est validée, on peut passer à l'étape suivante. Dans le cas d'une conception découplée, le séquençement engendre des exigences fonctionnelles à l'étape suivante de la conception.

Dans le cas contraire, c'est-à-dire quand la conception est couplée, le concepteur doit soit trouver une nouvelle solution; soit résoudre les couplages qu'il met en évidence suite à l'analyse. Pour ce faire, il faut se référer au cas d'emploi "synthèse des solutions".

Lors de la décomposition fonctionnelle, le concepteur doit respecter un certain nombre de règles:

1. Exprimer les FRs de la manière la moins ambiguë possible; en partant des plus globales et donc les plus abstraites dans leur expression au plus techniques et donc les plus concrètes dans leur expression. La FR la plus abstraite est celle qui découle directement du besoin du client. Les suivantes découlent de cette FR globale et des choix physiques aux niveaux hiérarchiques supérieurs.
2. Ne pas perdre de vue le niveau hiérarchique dans lequel on se trouve; surtout en cas d'analyses des solutions existantes, les composants étant connus, il y a toujours tendance à faire passer des composants d'un niveau hiérarchique à un autre. Ainsi, pour respecter au mieux ces différents niveaux hiérarchiques, nous avons trois types d'exigences fonctionnelles qui peuvent nous guider en fonction de l'étape de conception. Les exigences principales correspondent à la conception conceptuelle et constituent les exigences de conceptualisation. Les exigences techniques correspondent à la conception architecturale et constituent les exigences de

structuration. Les exigences techniques élémentaires correspondent à la conception détaillée et constituent les exigences de finition.

3. Respecter l'indépendance des FRs à chaque niveau hiérarchique; chaque FR dans sa formulation doit être indépendante des autres FRs de ce même niveau. Cependant, une FR à un niveau inférieur peut avoir dans son expression un DP d'un niveau supérieur.
4. A chaque étape de la conception, on peut avoir plusieurs niveaux hiérarchiques qui définissent cette étape. La matrice de chaque niveau hiérarchique doit être triangulaire ou diagonale.
5. Lors de l'analyse des solutions existantes, il ne faut pas perdre de vue la phase d'utilisation dans laquelle on se trouve; ainsi les DPs d'une solution ne doivent pas forcément être tous présents dans l'arbre des composants pour la phase d'utilisation considérée. Il se peut que certains DPs n'apparaissent pas.
6. Les contraintes de conception ne doivent pas être dans l'arbre fonctionnel. En général, une contrainte est une adaptation de la solution. Elle n'a aucun effet sur son principe de base, elle permet parfois de rejeter une solution potentielle.
7. Lors de la décomposition fonctionnelle, chaque exigence mère est décomposée au moins en deux sous-exigences. Quand cela est impossible, ceci veut dire que l'exigence mère est suffisamment concrète et qu'elle correspond au niveau hiérarchique le plus bas.

2.2. Analyse des risques

Ce cas d'emploi trouve son intérêt lors de l'analyse d'une solution existante ou de solutions en cours de synthèse. Cette analyse est cruciale pour la validation ou non d'une solution. L'objectif ici est de donner des moyens formels pour la prise en compte des connaissances sur la sécurité (les normes, les réglementations, le savoir faire...).

Comme expliqué dans le chapitre précédent, les exigences de sécurité sont définies d'une part, suite au retour d'expérience et d'autre part, suite à l'analyse systématique des risques des choix physiques tout au long de la conception. Ce cas d'emploi donne les moyens d'analyse des risques au fil de la conception même aux étapes les plus conceptuelles ; étapes des conceptions conceptuelle et architecturale. En effet, ce cas décrit le passage du domaine physique de la conception au domaine physique du risque (Figure 4.12). Le premier domaine décrit les solutions physiques choisies, le deuxième décrit les risques liés à ces choix. Ces risques vont donner naissance à de nouvelles exigences de sécurité propres à la solution.

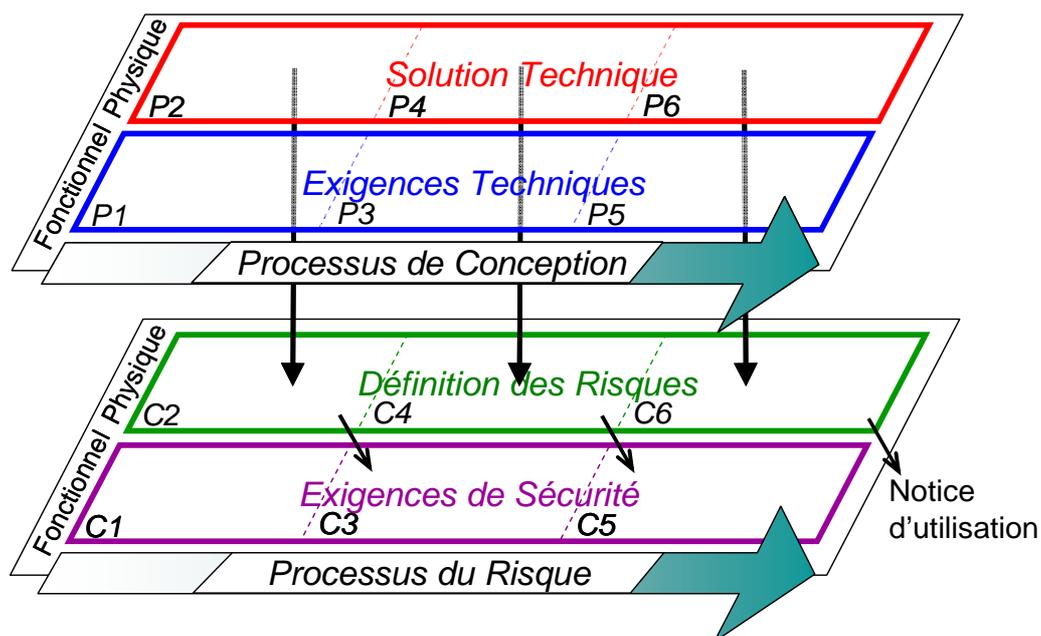


Figure 4.12 : Démarche d'analyse des risques liés aux choix techniques

Comment les risques liés à la conception sont-ils analysés ? En effet, cette analyse consiste à vérifier le niveau de sécurité des solutions nouvelles par l'étude de la compatibilité des caractéristiques physiques de ces solutions avec les caractéristiques humaines (Principe 3 du modèle). Comme expliqué dans le chapitre précédent, nous entendons par caractéristiques humaines, les dimensions corporelles, les postures possibles, les mouvements du corps et les forces physiques. A une étape donnée du processus de la conception, une solution technique est le résultat d'un processus itératif d'analyse et de synthèse. A chaque étape de la conception, on cherche à générer des solutions « sans risques ». De plus, le passage des caractéristiques physiques aux caractéristiques humaines consiste en un processus de mappage un-à-un, un-à-plusieurs ou plusieurs-à-un. Quand aucune alternative « sans risques » n'est possible, ces derniers sont alors transcrits en exigences de sécurité à l'étape suivante. Ces risques sont définis d'abord par le retour d'expérience exprimé sous forme de contraintes suivant les caractéristiques des utilisateurs. Ces contraintes sont ensuite spécifiées, au fil de la conception, à travers l'interaction possible avec le paramètre de conception considéré. Ainsi, les contraintes issues du retour d'expérience servent comme base pour l'élaboration des exigences de sécurité au cours de la conception.

Dans le contexte « risques d'accident » (C2), on s'intéresse à étudier les grandeurs physiques des principes de solutions retenues dans (P2). Il convient ainsi d'étudier leur nature et leur niveau. Comme expliqué dans le chapitre III, le niveau de la caractéristique (et de l'énergie qu'elle renferme) susceptible d'interagir avec l'humain peut subir des modifications à

l'étape de la conception architecturale ou détaillée, mais nous considérons que moins le niveau d'énergie emmagasinée dans la solution est élevé plus elle est sécuritaire. En effet, les modifications qu'entraînent les étapes suivantes permettent de "cacher" cette énergie mais ne l'éliminent pas. Généralement, à ce niveau de la conception, les risques consistent à étudier la compatibilité entre les grandeurs physiques et la vulnérabilité de l'humain.

Dans le contexte « risques d'ergonomie » (C4), on s'intéresse à étudier les caractéristiques géométriques et temporelles de l'agencement structurel retenu (P4). Il convient ainsi d'étudier l'activité et les performances humaines qu'il nécessite. Ainsi, une représentation graphique du positionnement relatif des différents principes de solution permet de dégager les paramètres structurants et par suite d'étudier l'effet de leur valeur sur la tâche imaginée de l'humain. Généralement, à ce niveau de la conception, les risques consistent à étudier la compatibilité entre le squelette de la solution et celui de l'humain.

Dans le contexte « risques résiduels » (C6), on s'intéresse à étudier les risques liés aux finitions de la solution dans (P6) et les problèmes de sécurité subsistant non résolus. A cette étape, il peut s'agir de risques d'accidents ou des problèmes d'ergonomies mais ceux-ci sont de moindre importance que ceux issus des étapes précédentes. En effet, les risques consistent aussi à étudier la compatibilité caractéristiques humaines/paramètres de conception mais à une échelle plus réduite (échelle composant). Il faut noter que tout problème de sécurité converti en exigence de sécurité à l'étape suivante conduira à la complication de la solution, du fait que le risque ne soit pas traité au bon moment. Ces exigences rajoutent des fonctions dont la présence n'a pas de valeur ajoutée aux yeux de l'utilisateur mais dont l'absence conduira à des risques.

Comment les risques liés à la conception sont-ils identifiés ? L'identification des risques issus de l'étude de la compatibilité fait généralement l'objet des normes de sécurité ou fait appel à des experts sécurité ou des documentations internes à l'entreprise afin de pouvoir associer un risque à chacune des caractéristiques physiques. L'étude de cette compatibilité s'effectue comme expliqué dans le principe 3 de notre modèle et en considérant la typologie d'objet de chacun des contextes physiques.

Comment les risques liés à la conception sont-ils exprimés ? Le principe 1 de notre méthode stipule la définition claire et sans ambiguïté des objectifs de la conception et plus précisément de ceux de la sécurité. Elle est alors basée sur des itérations d'analyse, de

redéfinition des objectifs et de synthèse. Ainsi, ce cas d'emploi nous permet de formuler des exigences de sécurité en même temps que l'affinement de la solution. Les exigences qui découlent de l'analyse de la sécurité dans les contextes (C2) et (C4) sont exprimées ; dans les contextes (C3) et (C5) ; par des fonctions objectifs (Minimiser ou Maximiser) avec deux compléments ; qui sont généralement des EMUs, des composants ou des blocs fonctionnels. A la fin du processus de conception, les exigences ainsi que les risques qui subsistent non résolus dans le contexte (C6) sont convertis en notice d'utilisation.

Quel est l'apport de la méthode en termes d'analyse des risques par rapport aux méthodes conventionnelles ? A la différence des méthodes conventionnelles (telles que l'AMDEC, l'ADC...), notre méthode permet la structuration de cette analyse suivant trois points de vue ; concepts (C2), architecture (C4) et composants (C6). La résolution des problèmes de sécurité est alors considérée au « bon moment », ni très tôt, ni très tard. De plus, elle ne traite pas de la même façon tous les événements possibles. Suivant leur nature, ces derniers sont affectés à une étape particulière de la conception et considérés ainsi. Elle permet également d'alléger les étapes d'analyse des risques en conception détaillée en identifiant la typologie des risques et les causes potentielles. Enfin, comme elle permet de cerner les risques au plus tôt, ces derniers peuvent être mieux traités au fil de la conception et ainsi la méthode permet d'atteindre plus naturellement une conception admettant un « bon » niveau de sécurité.

Une conception couplée est-elle nécessairement une conception à risque ? Une des hypothèses fondamentales de notre méthode est une conception non couplée (Principe 2). D'une part, ce type de conception est traduit par un arbre des causes, qui correspond à l'étude des événements possibles, avec que des « OU » (Heo, 2007). Dans ce cas, des études de type AMDEC, en fin du processus de conception, deviennent largement suffisantes. Il est ainsi insignifiant d'étudier les combinaisons possibles des événements. D'autre part, si l'on regarde la nature inhérente de notre méthode, elle est bien similaire à une étude type AMDEC mais avec un autre point de vue. Ainsi, au lieu d'étudier les défaillances possibles des composants, leurs effets et leur criticité, nous étudions les risques qu'un paramètre de conception ne soit pas compatible avec les caractéristiques de l'homme et les effets de cette incompatibilité. Enfin, une conception couplée est une conception difficilement maîtrisable, si ce n'est pas en termes d'utilisation, cela sera en termes de maintenance et de pilotage. Quand on accepte une conception couplée c'est qu'on accepte de remettre le problème à plus tard. C'est le cas actuellement dans la prise en compte de la sécurité dans la conception. Enfin, on ne peut

jamais être sûr qu'on étudie exhaustivement les risques d'une conception couplée du fait que l'étude des combinaisons des événements possibles devient complexe.

2.3. Outils de conception associés

Comme expliqué dans les paragraphes précédents, l'analyse de la solution, des points de vue conception et de sécurité, repose sur un certain nombre de représentations de la solution : l'arbre fonctionnel, l'arbre physique et la matrice de conception.

2.3.1. Arbre fonctionnel

L'arbre fonctionnel (Figure 4.13) décrit dans la conception axiomatique représente et capitalise la décomposition hiérarchique des exigences fonctionnelles. En effet, cette décomposition est équivalente à celle proposée dans le diagramme FAST de l'Analyse Fonctionnelle (Figure 4.14). Ainsi, nous considérons que les exigences fonctionnelles se décomposent hiérarchiquement en fonctions principales (FP), en sous fonctions (SF), en fonctions techniques (FT) et en fonctions techniques élémentaires (FTE). Il s'agit ainsi d'un arbre de description d'une solution, les aiguillages correspondent à des combinaisons « ET » à un niveau donné.

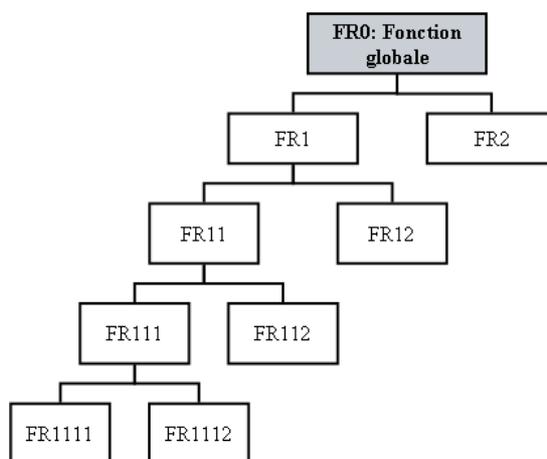


Figure 4.13 : Arbre fonctionnel : décomposition hiérarchique des exigences selon l'AD

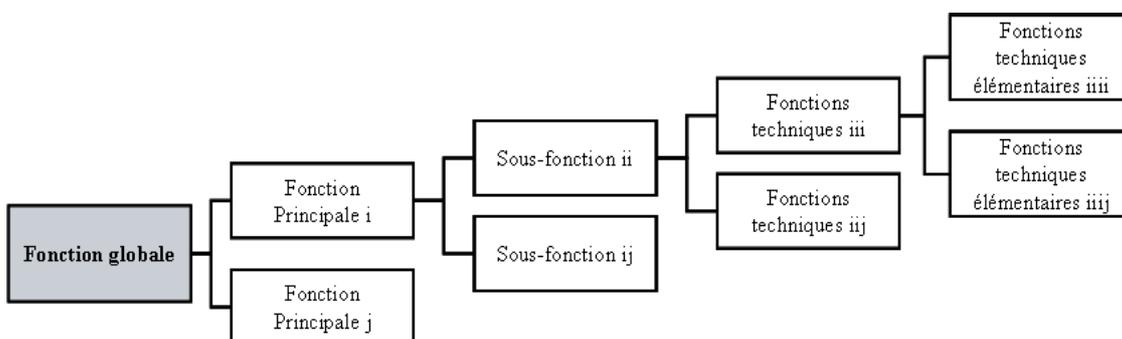


Figure 4.14 : Arbre fonctionnel : décomposition d'une fonction globale au cours de la conception

Nous considérons que les fonctions globales, principales et les sous fonctions correspondent à la décomposition fonctionnelle à l'étape de la conception conceptuelle. Les fonctions techniques (ainsi que les sous-fonctions techniques) correspondent à la décomposition fonctionnelle à l'étape de la conception architecturale. Les fonctions techniques élémentaires (ainsi que les sous-FTE) correspondent à la décomposition fonctionnelle à l'étape de la conception détaillée (Figure 4.15). A chacune des étapes de la conception, il est possible d'avoir plusieurs niveaux hiérarchiques.

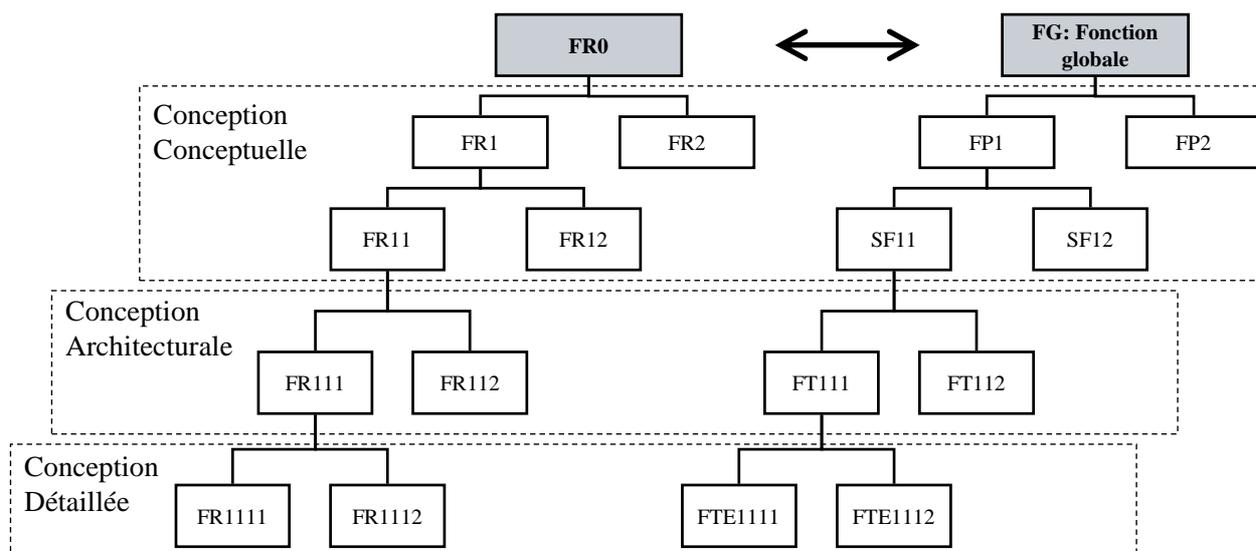


Figure 4.15 : Typologie des exigences à chaque étape de la conception

2.3.2. Arbre des paramètres de conception ou arbre physique

L'arbre des DP (que nous appelons par défaut arbre physique) représente et capitalise l'affinement du principe de solution en composants (Figure 4.16). Il montre, sous la forme d'un arbre, l'agencement des différents composants les uns par rapport aux autres. Cet arbre doit avoir la même structure globale que l'arbre fonctionnel; le même nombre de niveaux hiérarchiques et le même nombre de paramètres de conception qu'il existe d'exigences fonctionnelles à chaque niveau si l'on veut respecter le principe 2 du modèle.

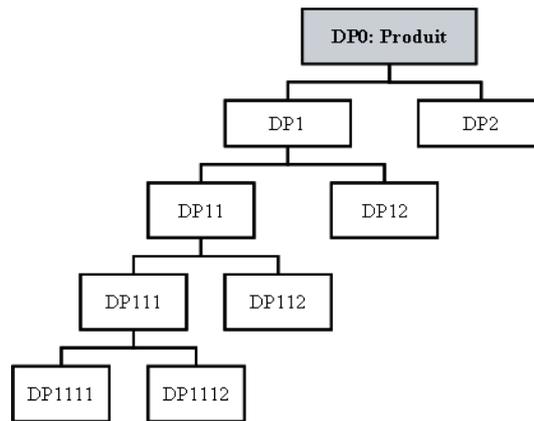


Figure 4.16 : Arbre des paramètres de conception : décomposition hiérarchique des paramètres de conception

2.3.3. Matrice de conception

A un niveau hiérarchique donné de la conception, les exigences fonctionnelles décrivent les objectifs de la conception et constituent le vecteur des FRs dans le domaine fonctionnel. De la même manière, les paramètres de la conception décrivent les solutions et constituent le vecteur des DPs dans le domaine physique. La relation entre les deux vecteurs à chaque niveau hiérarchique correspond à la matrice de conception caractérisant le produit. L'intérêt de cette matrice est d'éclaircir la manière selon laquelle la conception s'est effectuée (Figure 4.17).

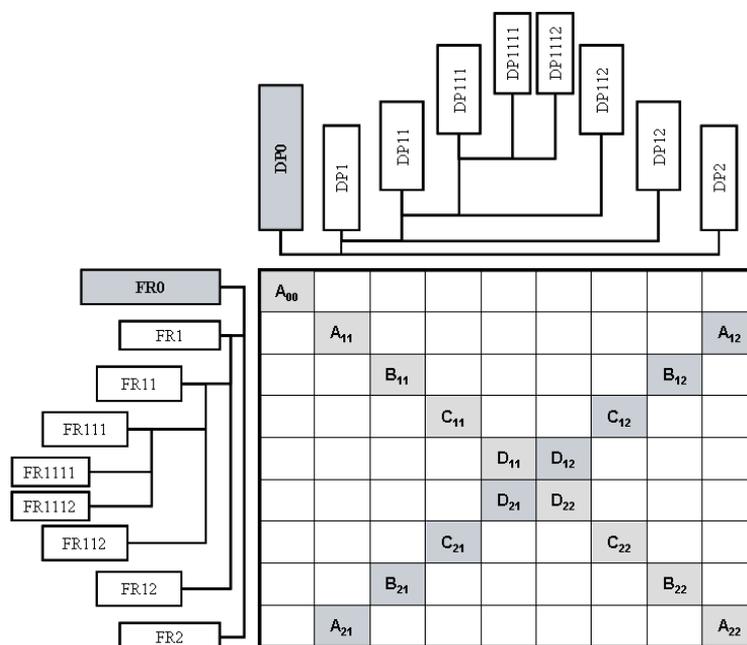


Figure 4.17 : Représentation de la matrice de conception

Ainsi, en cas de conception couplée, et à partir de cette matrice on peut rapidement connaître de quel niveau hiérarchique proviennent les couplages. Elle permet aussi dans le cas

d'une conception découplée, de déterminer rapidement la séquence du fonctionnement du produit.

2.4.Exemple d'application : le robinet mélangeur

2.4.1. Analyse de la conception conceptuelle

Analyser la conception conceptuelle du robinet mélangeur consiste à analyser la transition de la phase (P₁) à la phase (P₂) (Figure 4.18).

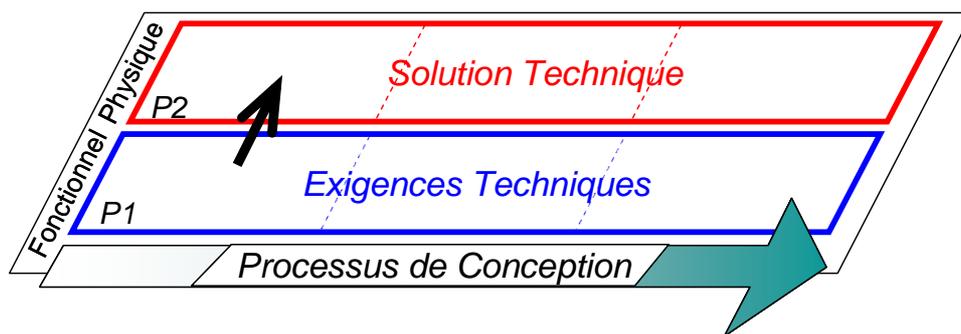


Figure 4.18 : Transition du fonctionnel au physique à l'étape de la conception conceptuelle

2.4.1.1.Expression des exigences et des paramètres de conception du mélangeur

Nous avons décomposé l'exigence globale d'un robinet mélangeur, qui s'exprime comme « FR₀ : Tempérer l'eau à partir des eaux chaude et froide », en deux exigences principales (FR₁ et FR₂) auxquelles nous avons affectées des paramètres de conception (DP₁ et DP₂) (Figure 4.19).

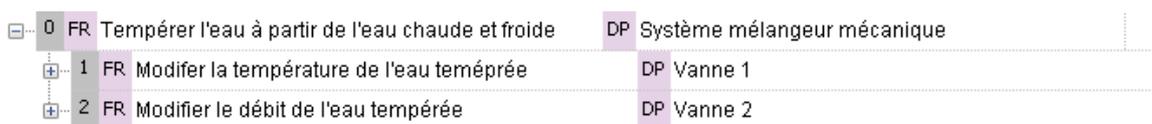


Figure 4.19 : Arbre fonctionnel (à gauche) et arbre des paramètres de conception (à droite) du robinet mélangeur à l'étape de la conception conceptuelle (copie d'écran du logiciel Acclaro)

Cette décomposition admet la matrice de conception suivante (Figure 4.20) :

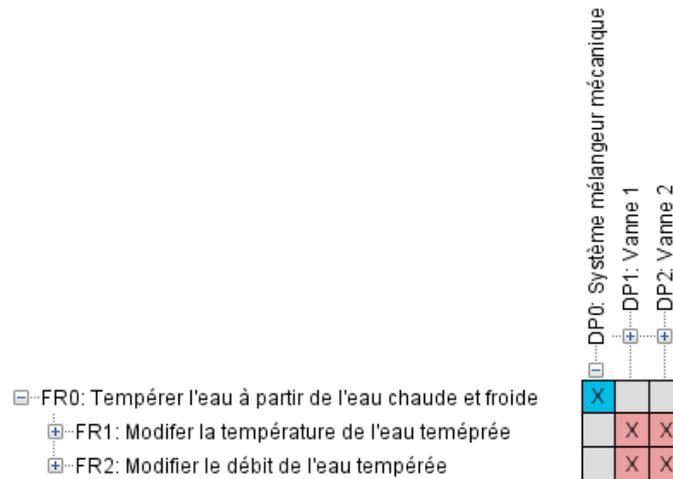


Figure 4.20 : Matrice de conception du robinet mélangeur à l'étape de la conception conceptuelle (copie d'écran du logiciel Acclaro)

Cette matrice de conception montre une conception couplée, ce qui implique que d'une part, le fait d'agir sur FR₁ affecte FR₂ et d'autre part, le fait d'agir sur FR₂ affecte FR₁. En effet, FR₀ peut être décomposée de deux manières au niveau conceptuel. La Figure 4.21 montre les deux formes possibles :

Première forme	Deuxième forme
FR ₁ : Modifier la température de l'eau <i>tempérée</i> FR ₂ : Modifier le débit de l'eau <i>tempérée</i>	FR ₁ : Modifier le débit de l'eau <i>chaude</i> FR ₂ : Modifier le débit de l'eau <i>froide</i>
DP ₁ : Vanne 1 DP ₂ : Vanne 2	DP ₁ : Vanne 1 DP ₂ : Vanne 2
$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X \\ X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \end{Bmatrix}$

Figure 4.21 : Deux formes possibles pour l'expression des exigences fonctionnelles du robinet mélangeur

La première forme découle directement du besoin de l'utilisateur qui a pour objectif de régler le débit et la température de l'eau tempérée. La deuxième forme découle de l'expression de FR₀ qui lie l'eau chaude à l'eau froide et ainsi sous entend une action sur ces deux eaux. Alors que cette dernière forme montre une bonne conception (non couplée) ne satisfait pas le vrai besoin de l'utilisateur. Dans la première forme, alors que l'expression des FR₁ et FR₂ est en adéquation avec l'objectif de l'utilisateur, il y a une inadéquation avec la solution proposée. En effet, les FRs expriment un besoin d'agir sur l'eau tempérée et la solution propose d'agir sur les deux eaux d'entrée non mélangées. Cette constatation illustre l'importance d'écrire de bonnes exigences fonctionnelles. Le fait que la matrice soit non couplée n'est pas suffisant pour atteindre une conception satisfaisante.

Dans ce cas d'emploi de la méthode, nous allons nous limiter à l'analyse de la conception sans proposition de nouvelles solutions, chose faisant l'objet du cas de synthèse de solution.

2.4.1.2. Analyse des risques liés aux principes de solution

Cette analyse fait l'objet du principe 3 de notre modèle. Il s'agit d'analyser la transition de la phase (P2) au contexte (C2) (Figure 4.22).

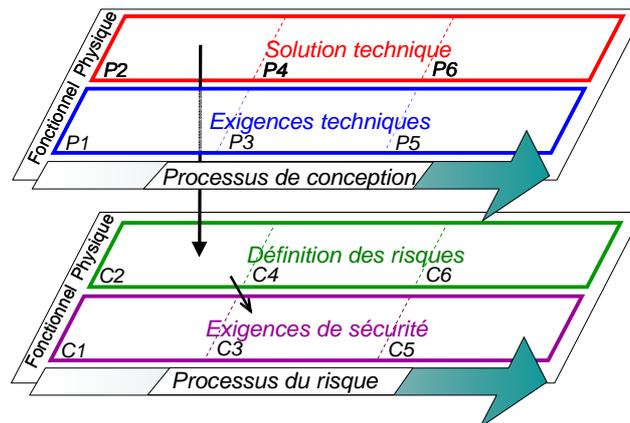


Figure 4.22 : Processus d'analyse des risques et élaboration de l'exigence de sécurité à l'étape de la conception conceptuelle

Le premier principe de solution de "Modifier la température de l'eau tempérée" s'exprime d'une part par la quantité de chaleur cédée par l'eau chaude :

$$Q_c = m_c \times c_e \times (T_m - T_c)$$

avec :

m_c masse d'eau chaude introduite (Kg)

c_e chaleur massique de l'eau ($\text{JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$)

T_m température finale du mélange (K)

T_c température initiale de l'eau chaude (K)

Q_c quantité de chaleur cédée par l'eau chaude (J)

Et d'autre part, par la quantité de chaleur captée par l'eau froide :

$$Q_f = m_f \times c_e \times (T_m - T_f)$$

avec :

m_f masse d'eau froide introduite (Kg)

c_e chaleur massique de l'eau ($\text{JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$)

T_m température finale du mélange (K)

T_f température initiale de l'eau froide (K)

Q_f quantité de chaleur cédée par l'eau froide (J)

En considérant que le système est thermiquement isolé, on a :

$$Q_c + Q_f = 0 \rightarrow T_m = \frac{m_c \cdot c_e \cdot T_c + m_f \cdot c_e \cdot T_f}{m_c \cdot c_e + m_f \cdot c_e} \rightarrow \boxed{T_m = \frac{m_c T_c + m_f T_f}{m_c + m_f}}$$

De cette formule, il ressort que l'eau du mélange peut avoir une température de 60°C. En s'appuyant sur les recommandations concernant l'utilisation de l'eau chaude et sur la norme (AFNOR, 2007), cette caractéristique (la température) de l'eau tempérée peut entraîner des risques de brûlure ($T > 50^\circ\text{C}$).

Par ailleurs, le deuxième principe de solution de "*Modifier le débit de l'eau tempérée*" s'exprime par la loi des nœuds $\boxed{D_c + D_f = D_m}$

Avec :

D_c Débit de l'eau chaude (l/min)

D_f Débit de l'eau froide (l/min)

D_m Débit de l'eau mélangée (l/min)

De cette formule ressort que l'eau du mélange peut avoir un débit de plus de 25 l/min ou moins de 12 l/min. En s'appuyant sur la norme NF 077:2005, cette caractéristique (débit) de l'eau tempérée peut entraîner un risque de gêne lors de l'utilisation ($D > 25\text{l/min}$).

Cette analyse montre qu'il existe deux critères d'évaluation de la sécurité:

- x_1 = Température maximale délivrée par la conception;
- x_2 = Débit maximal délivré par la conception.

En effet, ces critères vont servir comme indicateur d'une insécurité. Ils vont conduire soit à rechercher de nouveaux principes de solutions qui les éliminent, soit le principe de solution est validé et ces critères sont transformés en exigence de sécurité.

Génération des exigences de sécurité du contexte C3 à partir des risques du contexte C2:

En supposant qu'aucune alternative n'a été trouvée afin de réduire/éliminer les risques liés à la température et à la pression de l'eau tempérée, dans ce cas les critères x_1 et x_2 doivent être traduits sous forme d'exigences de sécurité à prendre en considération à l'étape de la conception architecturale. Nous proposons les expressions suivantes des exigences (Figure 4.23):

Domaine Fonctionnel	Domaine Physique
	<u>C2 : Risques d'accidents</u> T>50°C → brûlure P>7 bars → gêne
<u>C3 : Exigences du système</u> SR2.1: Minimiser l'implication de l'utilisateur pour la mesure de la température de l'eau; SR2.2: Maximiser les pertes de charges lors de l'acheminement de l'eau vers l'utilisateur.	

Figure 4.23 : Expressions des exigences de sécurité du robinet à partir de l'analyse des risques des choix technologiques issus de la conception conceptuelle

2.4.2. Analyse de la conception architecturale

Analyser la conception architecturale du robinet mélangeur consiste à analyser la transition de la phase (P₃) à la phase (P₄) (Figure 4.24).

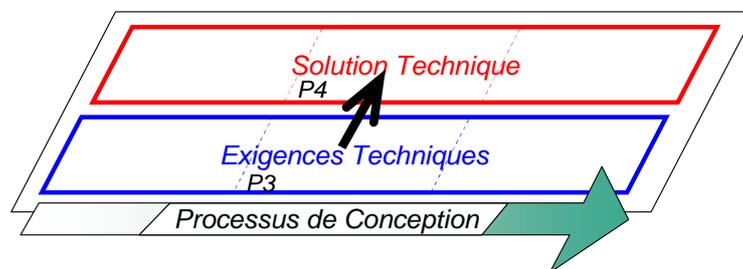


Figure 4.24 : Transition du fonctionnel au physique à l'étape de la conception architecturale

2.4.2.1. Expression des exigences et des paramètres de conception

Nous avons décomposé les fonctions principales FR₁ et FR₂ du robinet mélangeur comme montré dans la Figure 4.25. Cet arbre n'admet pas un caractère exhaustif. Nous nous sommes juste focalisés sur l'activité de l'utilisateur à l'étape de la conception architecturale et sur les paramètres de conception qui en découlent.



Figure 4.25 : Arbre fonctionnel et physique du robinet en conception architecturale

NB: Dans le cadre, les exigences et paramètres qui proviennent de la conception architecturale.

Cette décomposition admet la matrice de conception suivante (Figure 4.26) :

	DP0: Système mélangeur mécanique	DP1: Vanne 1	DP1.1: Tête 1	DP1.1.1: Encastrement 1	DP1.1.2: Liaison hélicoïdale 1	DP1.2: Tête 2	DP1.2.1: Encastrement 2	DP1.2.2: Liaison hélicoïdale 2	DP2: Vanne 2	DP2.1: Tête 1	DP2.1.1: Encastrement 1	DP2.1.2: Liaison hélicoïdale 1	DP2.2: Tête 2	DP2.2.1: Encastrement 2	DP2.2.2: Liaison hélicoïdale 2
FR0: Tempérer l'eau à partir de l'eau chaude et froide	X														
FR1: Modifier la température de l'eau tempérée		X							X	O	O	O	O	O	O
FR1.1: Permettre à l'utilisateur d'agir sur la vanne 1			X		O	O	O	O	X	O	O	O	O	O	O
FR1.1.1: Transmettre le couple 1 à la vanne 1				X	O	O	O	O	O	X	O	O	O	O	O
FR1.1.2: Varier la position de la vanne 1				O	X	O	O	O	O	O	X	O	O	O	O
FR1.2: Permettre à l'utilisateur d'agir sur la vanne 2				O	O	O	X		O	O	O	O	X	O	O
FR1.2.1: Transmettre le couple 2 à la vanne 2				O	O	O		X	O	O	O	O	O	X	O
FR1.2.2: Varier la position de la vanne 2				O	O	O	O	X	O	O	O	O	O	O	X
FR2: Modifier le débit de l'eau tempérée		X	O	O	O	O	O	O	X						
FR2.1: Permettre à l'utilisateur d'agir sur la vanne 1			O	X	O	O	O	O		X		O	O	O	O
FR2.1.1: Transmettre le couple 1 à la vanne 1				O	O	X	O	O			X	O	O	O	O
FR2.1.2: Varier la position de la vanne 1				O	O	O	X	O			O	X	O	O	O
FR2.2: Permettre à l'utilisateur d'agir sur la vanne 2				O	O	O	O	X	O	O	O	O	X		
FR2.2.1: Transmettre le couple 2 à la vanne 2				O	O	O	O	O	X	O	O	O		X	O
FR2.2.2: Varier la position de la vanne 2				O	O	O	O	O	X		O	O	O		X

Figure 4.26 : Matrice de conception de la conception architecturale du robinet

La matrice de conception montre un non couplage à cette étape de la conception. En effet, les couplages s'ils existent proviennent du niveau de la conception conceptuelle. Ces couplages ont conduit à une redondance dans l'expression des exigences aux étapes suivantes de la conception. En termes de qualité de conception, cette étape a moins d'influence car tous les "concepts de solution" issus de cette étape découlent des principes de solutions de l'étape précédente.

2.4.2.2. Analyse des risques liés à l'agencement structurel de la solution

A l'étape de la conception architecturale, l'architecture du mélangeur est la suivante (Figure 4.27) :

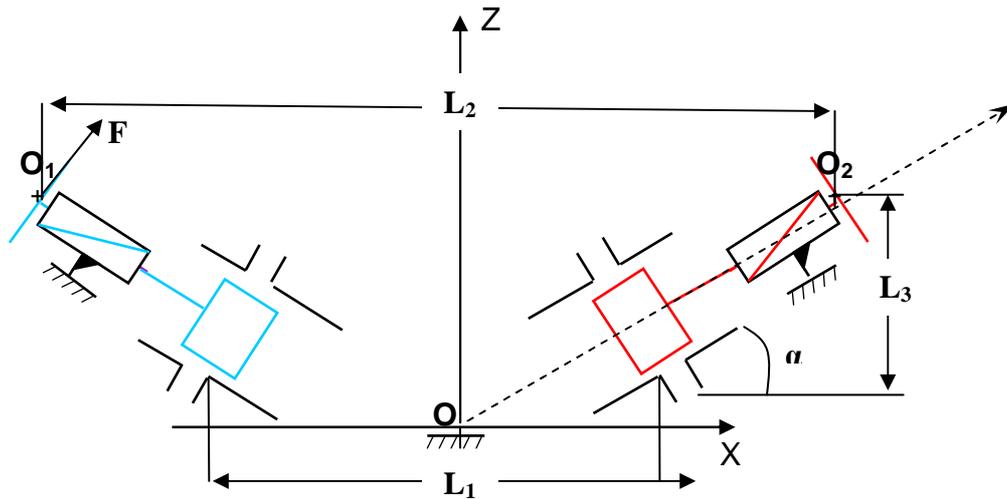


Figure 4.27 : Structure du robinet

Les paramètres structurants de cette architecture et relatifs à l'exigence « $FR_{1.1}$: Permettre à l'utilisateur d'agir sur la vanne 1 » sont les suivants :

L_1 : Distance entre les bases des deux vanes ;

L_2 : Distance entre le centre d'actionnement de la tête 1 et le centre d'actionnement de la tête 2;

L_3 : Distance entre le centre du point d'actionnement et le lavabo ;

α : Angle entre l'axe de la vanne et le lavabo dans le plan (X, Z) ;

β : Angle entre l'axe de la vanne et le lavabo dans le plan (X, Y) ;

F : effort nécessaire pour actionner la vanne 1 (N) ;

T : nombre de tours nécessaire pour varier le débit de la vanne 1.

Les paramètres intrinsèques de la conception qui découlent de cette structure sont les suivants: L_1 , L_2 , L_3 , α , β ainsi que les paramètres de choix des composants (F) et (T).

L_1 est donné par les dimensions du lavabo et est une longueur fixe. (L_2 , L_3 , α , β , F , T) sont des paramètres de conception à déterminer.

Ces paramètres de conception, issus de l'agencement structurel choisi, impliquent certaines caractéristiques de l'homme comme le représente la Figure 4.28. Cette représentation n'a pas un caractère exhaustif.

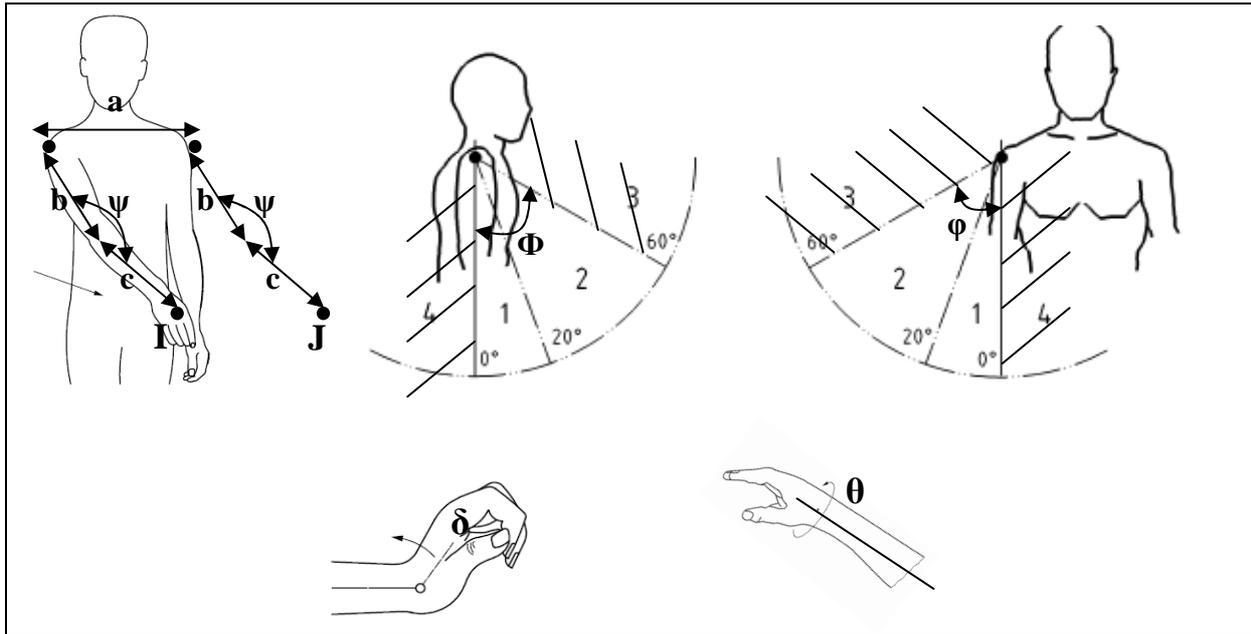


Figure 4.28 : Caractéristiques de l'homme impliquées

Avec : $IJ = \sqrt{(x_I - x_J)^2 + (y_I - y_J)^2 + (z_I - z_J)^2}$; avec $y_I = y_J$ et $z_I = z_J$

$$IJ = x_I - x_J = a + 2 \left(b \times \sin \varphi + c \times \left(3 \frac{\pi}{2} - \psi \right) \right)$$

Paramètres structurants	Caractéristiques de l'homme affectées	Typologie de la caractéristique affectée
L₂	H₁ : distance (IJ) entre les deux mains pour des opérations bimanuelles; H ₁ = IJ	Atteignabilité
L₃	H₂ : Largeur de la main >120mm	Anthropométrie
α	θ : Angle de torsion du poignet coude, 30° ≤ θ ≤ 60°	Pénibilité
β	δ : Angle entre paume de la main relevée et l'avant bras, 30° ≤ δ ≤ 60°	Pénibilité
F	E : effort max acceptable= fct (α, β), 3<E <9N	Pénibilité (posture limite)
T	N , Nombre de répétition de l'action	Pénibilité (répétition)

Figure 4.29 : Correspondance entre paramètres structurants et caractéristiques nécessaires de l'homme

T est fonction de $\frac{\Delta D}{\Delta x}$; ΔD est la variation du débit, Δx est la course parcourue.

La correspondance entre les paramètres de conception et les caractéristiques de l'homme est montrée dans le Figure 4.29.

Génération des exigences de sécurité du contexte 5 à partir des risques du contexte 4:

En supposant qu'aucune alternative n'a pu être trouvée afin de respecter la compatibilité des paramètres de structuration avec les caractéristiques et les capacités humaines, ces critères doivent être traduits en exigences de sécurité à prendre en considération à l'étape suivante de la conception, étape de la conception détaillée. L'exigence élaborée doit être exprimée sous forme d'une fonction d'optimisation mettant en relation deux éléments (internes ou externes à la solution). Nous proposons l'expression suivante des exigences (Figure 4.30):

Domaine Fonctionnel	Domaine Physique
	<p><u>C4 : Risques d'ergonomie</u> $L2 > H1$ $L3 < H2$ $\alpha > \theta$ $\beta > \delta$ $F > E$ $T > N$</p>
<p><u>C5 : Exigences des sous-systèmes</u> SR3.1: Minimiser la distance L_2 entre la vanne 1 (O_1) et la vanne 2 (O_2); SR3.2: Maximiser la distance L_3 entre le lavabo et la vanne 1 (O_1); SR3.3: Minimiser l'angle (OO_1, X) entre l'axe de la vanne 1 et le lavabo; SR3.4: Minimiser les efforts F d'ouverture et de fermeture du robinet; SR3.5: Minimiser $\frac{\Delta D}{\Delta x}$ le nombre de tour délivrée par l'utilisateur pour actionner la vanne 1.</p>	

Figure 4.30 : Expression des exigences de sécurité du robinet à partir de l'analyse des risques des choix technologiques de la conception architecturale

2.4.3. Analyse des risques liés aux détails de la solution

A l'étape de la conception détaillée, on étudie l'interface entre l'homme et le produit. Dans le cas du robinet, cette interface correspond à la surface de saisie (préhension) de la tête du robinet. La Figure 4.31 montre l'interaction entre le robinet et l'utilisateur à l'étape de la conception détaillée. Le paramètre physique permettant d'affecter la facilité de saisie de la tête est la pression de préhension. Ce paramètre dépend de plusieurs paramètres structurants.

Ces paramètres structurants sont relatifs à l'exigence fonctionnelle « *FR_{1.1.1.1}: Permettre à l'utilisateur de saisir la tête 1* » :

I₁ : Forme de la tête (rayon de courbure aux points d'appui) ;

I₂ : Nombre de points d'appui lors de la saisie ;

I₃ : Diamètre nominal de la tête ;

I₄ : Qualité de surface.

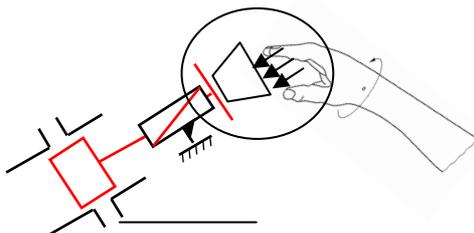


Figure 4.31 : Interaction de l'homme avec la tête du robinet

La correspondance entre les paramètres de conception et les caractéristiques de l'homme à l'étape de la conception détaillée est montrée dans le Figure 4.32.

Paramètres structurants	Caractéristiques de l'homme affectées	Typologie de la caractéristique affectée
I₁	D₁ : Diamètre des doigts de la population cible	Pénibilité
I₂	N₂ : Nombres de doigts à utiliser	Pénibilité
I₃	D₃ : Diamètre d'ouverture des doigts	Pénibilité
I₄	S₄ : Sensibilité cutanée au glissement	Pénibilité

Figure 4.32 : Correspondance entre paramètres structurants et caractéristiques nécessaires de l'homme

A la fin de cette étape, les problèmes de sécurité non solutionnés sont convertis en recommandations d'utilisation comme par exemple :



La température de l'eau peut dépasser les 50°C. Si vous avez des enfants, accompagnez-les lors de l'utilisation du robinet.

3. Cas d'emploi 3: Synthèse des solutions

3.1. Description de la démarche de synthèse

Comment le processus des risques affecte-t-il le processus de la conception ? Dans notre méthode d'intégration de la sécurité, les exigences fonctionnelles (FRs) sont composées d'exigences techniques et de sécurité. Les exigences techniques, nous les notons TRs (abréviation de « Technical Requirements »). Les exigences de sécurité, nous les notons SRs (abréviation de « Safety Requirements »).

La conceptualisation de la solution, appelée aussi synthèse de solution, s'effectue à partir des exigences fonctionnelles établies. Elle consiste en un mappage allant du domaine fonctionnel (quoi) vers le domaine physique (comment). La transition du Quoi au Comment exige un mappage et fait intervenir les techniques de recherche de solutions et de créativité. Le mappage est un processus itératif entre les exigences fonctionnelles et les paramètres de conception qui répondent au mieux aux objectifs. Le processus de mappage est exprimé mathématiquement, comme souligné par Suh, en termes de vecteurs caractéristiques qui définissent les objectifs de conception et la solution technique (Suh, 2001). A chaque niveau hiérarchique de la conception, les exigences associées constituent le vecteur des (FRs et SRs) dans le domaine fonctionnel. De la même manière, les paramètres de conception (noté DP) du domaine physique associé à ce même niveau hiérarchique expriment le vecteur des DP. Ainsi, la relation entre ces deux vecteurs est exprimée comme suit :

$$\{FR\} = [A]\{DP\} \quad (4.1)$$

Avec $FR = TR + SR$

[A] est nommé la matrice de conception caractérisant la conception du produit. L'équation (4.1) représente l'équation de la conception au niveau hiérarchique considéré.

La Figure 4.33 montre le schéma global des opérations de synthèse à la base des exigences techniques et de sécurité définies. Dans ce cas, le domaine physique de sécurité correspondant à la définition des risques reste inactif.

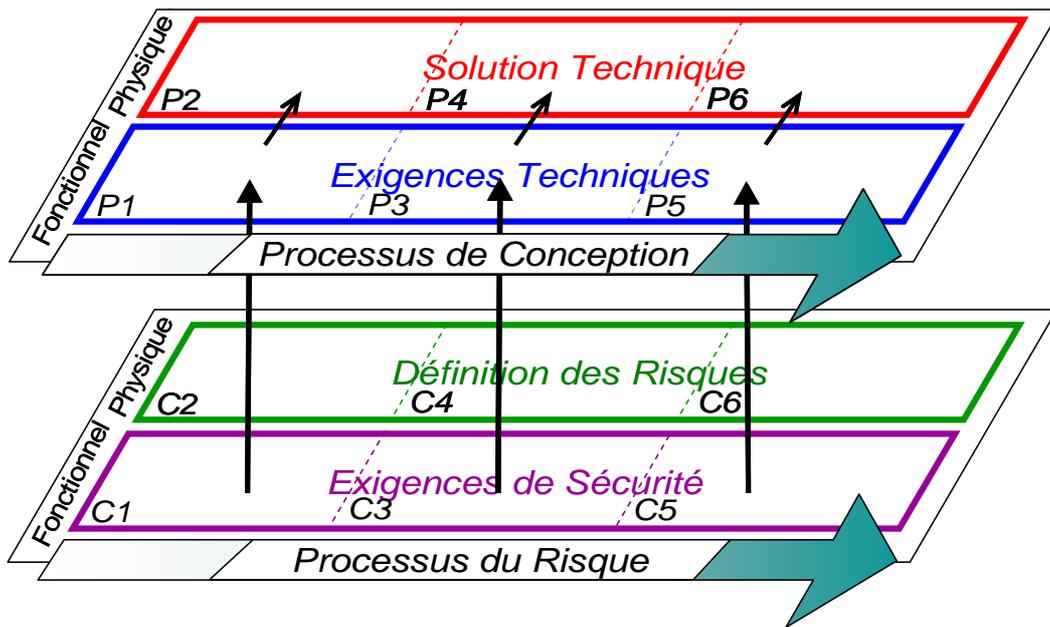


Figure 4.33 : Démarche de synthèse de solution

Afin de parvenir à une bonne et simple conception, lors de la synthèse de solution le principe d'indépendance doit être respecté. L'indépendance des exigences fonctionnelles signifie que dans le cas où les objectifs de la conception sont définis par deux ou plusieurs exigences, chacune doit être satisfaite par la solution technique d'une manière n'affectant pas une autre exigence. Ainsi, la transition du domaine fonctionnel au domaine physique est constituée suivant un mappage direct à chaque niveau hiérarchique. De là, chaque étape de la conception doit s'effectuer de manière à avoir, pour les exigences techniques et de sécurité, une matrice de conception diagonale ou triangulaire. Ainsi, la matrice de conception entre les exigences techniques et de sécurité et les paramètres de conception (DP) est exprimée par l'une des formes suivantes. Nous considérons une conception à deux TRs et une SR.

$$\begin{Bmatrix} TR_1 \\ TR_2 \\ SR \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_i \\ DP_j \\ DP_k \end{Bmatrix} \quad (4.2)$$

$$\begin{Bmatrix} TR_1 \\ TR_2 \\ SR \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_i \\ DP_j \\ DP_k \end{Bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\begin{Bmatrix} TR_1 \\ TR_2 \\ SR \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_i \\ DP_j \\ DP_k \end{Bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\begin{Bmatrix} TR_1 \\ TR_2 \\ SR \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_i \\ DP_j \\ DP_k \end{Bmatrix} \quad (4.5)$$

La synthèse des solutions à partir des exigences technique et de sécurité permettra à la sécurité de faire partie intégrante de la solution technique. L'opération de synthèse peut consister à générer de nouvelles solutions ou à découpler les exigences techniques d'une conception.

3.2. Outils de conception associés

Dans ce paragraphe, nous présentons les outils de conception existants pouvant être utilisés dans la synthèse de solution.

3.2.1. Analyse Fonctionnelle Externe

Cette analyse démarre par une délimitation du périmètre de l'étude; le recensement des éléments considérés existants, non modifiables et en interaction avec le produit dans ses différentes phases de vie. Puis, il s'agit de recenser les différentes phases de vie du produit. L'AFE repose sur une représentation schématique appelée graphe des interactions ou diagramme fonctionnel (Figure 4.34).

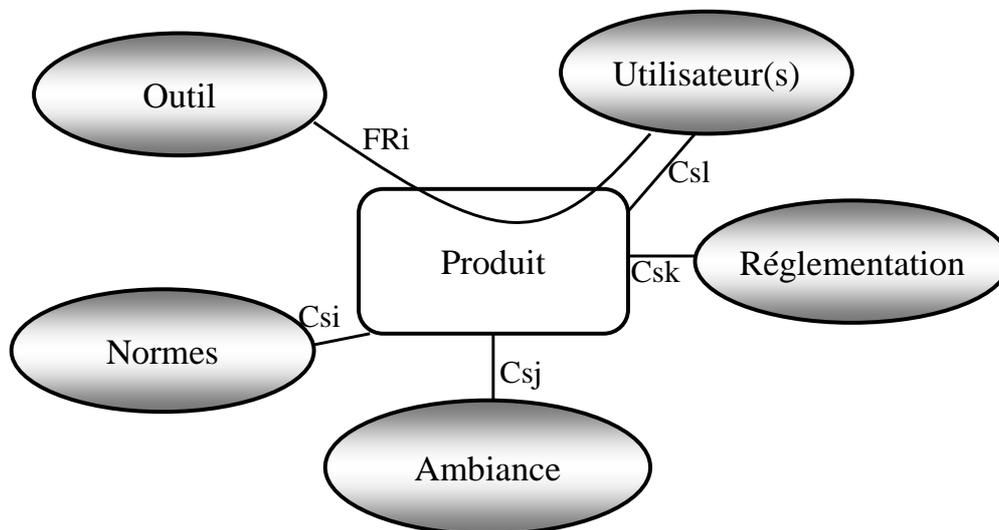


Figure 4.34 : Diagramme des interactions

Le diagramme fonctionnel permet de recenser les exigences fonctionnelles (appelées aussi fonctions de service ou principales) d'un produit. Ce diagramme est constitué du produit, au centre, et, autour, des éléments de son environnement (milieu extérieur). On fait apparaître

les relations (exigences fonctionnelles) entre le produit et le milieu extérieur. Ces relations correspondent au service rendu par le produit et permettent d'élaborer un cahier des charges.

Deux types de fonctions sont mis en évidence:

- **Les exigences fonctionnelles (FR) :** ce sont les exigences pour lesquelles le produit est élaboré, donc en fait celles qui pourraient répondre aux besoins de l'utilisateur. On les dessine par des liens entre deux éléments de l'environnement, liens passant par le "produit".
- **Les contraintes (Cs) :** On les représente par des liens entre le produit et aux moins un élément du milieu d'utilisation. Elles naissent d'une contrainte imposée par un élément extérieur, des insatisfactions d'un produit déjà existant ou encore d'une exigence particulière de l'utilisateur voire de la présence de normes et de réglementations.

Démarche à suivre:

1. Considérer le produit à concevoir comme une boîte noire, et le déposer au centre du diagramme,
2. Rechercher les éléments du milieu d'utilisation (EMU) qui se définissent comme les éléments en relation avec le produit durant la phase d'utilisation considérée.
3. Mettre en évidence la (ou les) relation(s) créée(s) par le produit et au moins deux EMU (fonctions de service) et les relations directes qui existent entre le système et les différents EMU (contraintes).
4. Tracer ces relations, les repérer, et les exprimer par des verbes et un ou des compléments.

Une fois que les FRs (TRs + SRs) sont ressorties, l'étape de conceptualisation du produit peut démarrer. Cette conceptualisation correspond au processus de mappage.

3.2.2. Mappage du fonctionnel au physique

Au niveau hiérarchique le plus élevé, le concepteur développe les concepts de solution basés sur les connaissances disponibles. Afin de compléter la conception jusqu'au détail, les FRs ainsi que les DPs doivent être décomposés de manière à affiner la solution des deux points de vue fonctionnel et physique. Tout au long de ce processus de conception, le concepteur traduit les objectifs de la conception exprimés au niveau fonctionnel le plus élevé en une solution détaillée réalisable exprimée dans le niveau le plus bas du domaine physique

(Figure 4.35). Le passage aux niveaux hiérarchiques inférieurs se fait en tenant compte des choix effectués dans les niveaux hiérarchiques les plus élevés, dans les deux domaines fonctionnel et physique. A chaque niveau hiérarchique la matrice de conception doit respecter l'axiome d'indépendance.

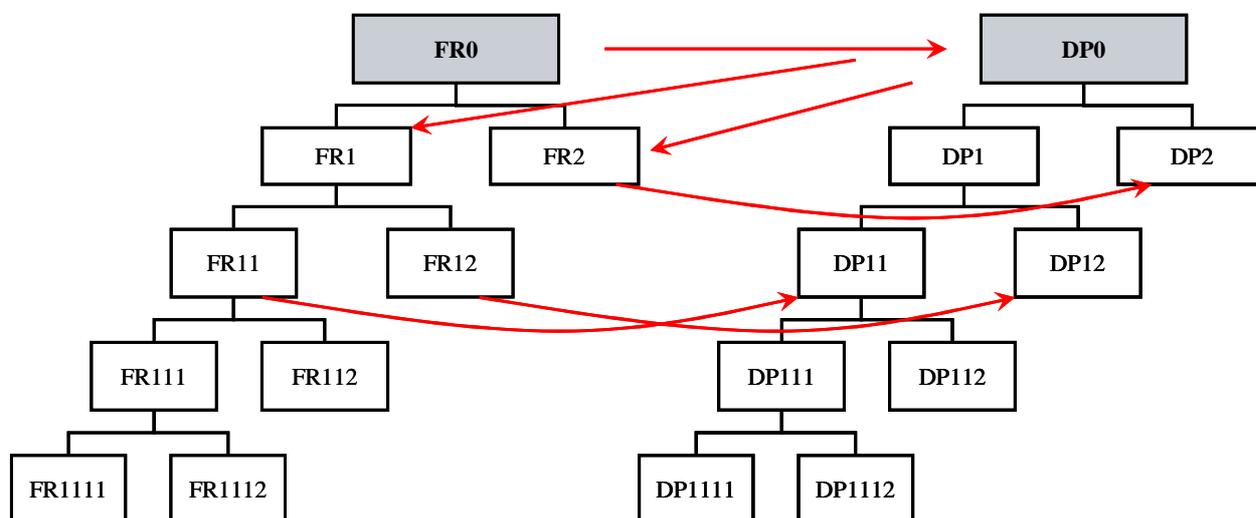


Figure 4.35 : Mappage du domaine fonctionnel au domaine physique

3.2.3. Outils de résolution des problèmes inventifs

Pour la synthèse de solutions nouvelles, nous proposons l'intégration de deux outils de la méthode TRIZ. Le premier outil correspond aux effets fondamentaux et est mis en œuvre lors de la recherche de l'innovation. Le deuxième outil est celui de la résolution des contradictions et est mise en œuvre lors de l'amélioration à travers la résolution des couplages des concepts trouvés.

3.2.3.1. Effets fondamentaux (Cavalucci, 1999)

Les sciences fondamentales tels que la physique, la chimie, la géométrie, etc. sont à la base de tout principe de solution imaginable. TRIZ considère qu'une utilisation efficace de ces effets peut résoudre la quasi-totalité des problèmes techniques. Malgré le fait que ces effets sont bien résumés dans les encyclopédies, leur mise en œuvre lors de la conception reste difficile, étant donné qu'ils sont généralement classés par domaine de spécialité ou même par ordre alphabétique. Afin de rendre cette connaissance accessible, elle a été classée dans TRIZ en termes de fonctions sous forme de tableau. Par la suite, la société Invention Machine fit de la classification d'Alshuller une base de données puissante à plus de 4000 effets.

3.2.3.2. Résolution des contradictions (Cavallucci, 2008; Cortes Robles, 2006)

Comme expliqué dans le chapitre II, TRIZ identifie deux types de contradiction :

- La Contradiction Technique : Lorsque dans un système on améliore une caractéristique technique (ou un paramètre), une autre caractéristique (ou paramètre) s'en trouve détériorée.

TRIZ propose la matrice des contradictions comme outils de résolutions des contradictions techniques. Cet outil fut développé suite à une analyse d'un grand nombre de brevets d'invention. En effet, à l'issu d'une contradiction entre deux caractéristiques du produit, la matrice propose des principes d'invention qui représente le modèle de la solution dirigeant ainsi la résolution du conflit. La première ligne de la matrice représente les paramètres à ne pas détériorer et la première colonne représente le paramètre à améliorer (Figure 4.36). L'intersection entre deux paramètres correspond au principe d'innovation et ainsi au modèle de la solution. Dans sa représentation originelle, la matrice comprenait 39 paramètres et 40 principes.

		<i>Dégradé</i>		
		<i>1 à 31</i>	32	<i>33 à 39</i>
<i>Amélioré</i>			Commodité de fabrication	
<i>1 à 32</i>				
33	Commodité d'utilisation		2, 5, 12	
<i>34 à 39</i>				

Figure 4.36 : Représentation partielle de la matrice de contradiction de TRIZ

Dans notre approche, les contradictions techniques vont apparaitre essentiellement suite à une conception couplée. Cet aspect a été aussi traité par de nombreux auteurs (Duflou, 2007; Thompson, 2009; Zhang, 2007). Ainsi, une conception couplée va faire apparaître un conflit entre deux exigences fonctionnelles et par suite entre deux différents paramètres.

- La Contradiction Physique : Elle oppose directement deux valeurs d'un seul et même paramètre.

A la base de ses analyses de brevets, (Alshuller, 2004) a formalisé 11 principes de séparation permettant de résoudre une contradiction physique. Ces principes sont les suivant (JTRIZ):

1. *Séparer les paramètres contradictoires dans l'espace ;*
2. *Séparer les paramètres contradictoires dans le temps ;*
3. *Associer des systèmes homogènes ou hétérogènes au niveau macro ;*
4. *Transférer le système vers l'anti-système, ou combiner le système avec l'anti-système ;*
5. *Attribuer la propriété P au système et l'anti-propriété P' aux différentes sous parties du système ;*
6. *Transférer un paramètre à un système fonctionnant au niveau micro ;*
7. *Effectuer une transition de phase d'une partie du système ou d'une partie de l'environnement sans introduction de substances étrangères ;*
8. *Utiliser les propriétés de deux phases du système. Le changement de phase est alors piloté par les conditions de fonctionnement du système ;*
9. *Utiliser les phénomènes physiques associés aux changements de phase ;*
10. *Remplacer un état de substance par un mélange des deux phases de cette même substance ;*
11. *Faire apparaître ou disparaître une substance par décomposition moléculaire ou recombinaison moléculaire.*

Dans notre approche, les contradictions physiques vont principalement apparaître suite à l'expression des exigences de sécurité. Généralement, ces exigences vont imposer des seuils d'acceptabilité que les performances techniques nécessaires dépassent. Ce qui se traduit par une contradiction physique de deux caractéristiques d'un même paramètre.

3.3.Exemple d'application : le robinet mélangeur

D'abord, l'étape de synthèse de solution débute par une Analyse du Besoin de l'utilisateur et l'établissement du Cahier des Charges Fonctionnel. Celle-ci a été présentée dans l'analyse du REX. Dans l'application de ce cas d'emploi, nous allons juste développer l'étape de synthèse de solutions en conception conceptuelle. Les autres étapes s'effectuent exactement de la même manière.

3.3.1. Synthèse d'un principe de solution pour l'exigence de sécurité

Comme expliqué auparavant, la synthèse de solutions s'effectue à la base des exigences techniques et de sécurité. A ce niveau de la conception, les exigences techniques proviennent de l'Analyse Fonctionnelle du Besoin. Les exigences de sécurité appartenant au contexte (C1) issues du retour d'expérience doivent être intégrées dans l'arbre fonctionnel de la conception (Figure 4.37). Nous avons extrait l'exigence suivante :

SR₃: *Maintenir une température de l'eau tempérée maximale de 50°C.*

Cette exigence est intégrée à l'arbre fonctionnel comme suit :

0	FR	Tempérer l'eau à partir de l'eau chaude et froide	DP	Système mélangeur mécanique
1	FR	Modifier la température de l'eau tempérée	DP	Vanne 1
2	FR	Modifier le débit de l'eau tempérée	DP	Vanne 2
3	FR	Minimiser la température maximale de l'eau tempérée (S)	DP	Système de refroidissement de l'eau chaude

Figure 4.37 : Intégration de l'exigence de sécurité dans l'arbre fonctionnel de la conception conceptuelle

Présentation du principe de solution proposé pour l'exigence de sécurité SR₃ :

Ce principe de solution propose un conduit de l'eau froide vers l'eau chaude avant son entrée dans la zone de mélange. La température finale de l'eau chaude (T_{fc}) dépend du volume de l'eau froide qui atteint l'eau chaude. Cette température s'exprime par l'expression suivante:

$$T_{fc} = \frac{V_c T_c + V_f T_f}{V_c + V_f}, \text{ avec } T_{fc} = 50^\circ\text{C}, T_c = 60^\circ\text{C} \text{ et } T_f \sim 8^\circ\text{C} \text{ par donnée.}$$

avec :

T_{fc} température finale de l'eau chaude

V_c volume d'eau chaude introduite

T_c température initiale de l'eau chaude

V_f volume d'eau froide introduite

T_f température initiale de l'eau froide

Ce principe de solution impose une température maximale de l'eau chaude d'arrivée de 50°C. Le risque de brûlure par l'eau chaude est éliminé d'une manière transparente à l'utilisateur. La nature de la matrice montre un ajout de DP pour la SR. Bien évidemment l'intégration de ce principe de solution à la conception de base du robinet permet d'éliminer le risque mais n'empêche pas le fait qu'il s'agit d'une conception en complète inadéquation avec

le désir de l'utilisateur qui est d'avoir de l'eau tempérée à un débit souhaité (Figure 4.38). D'où, il est nécessaire de résoudre le couplage de FR₁ et FR₂.

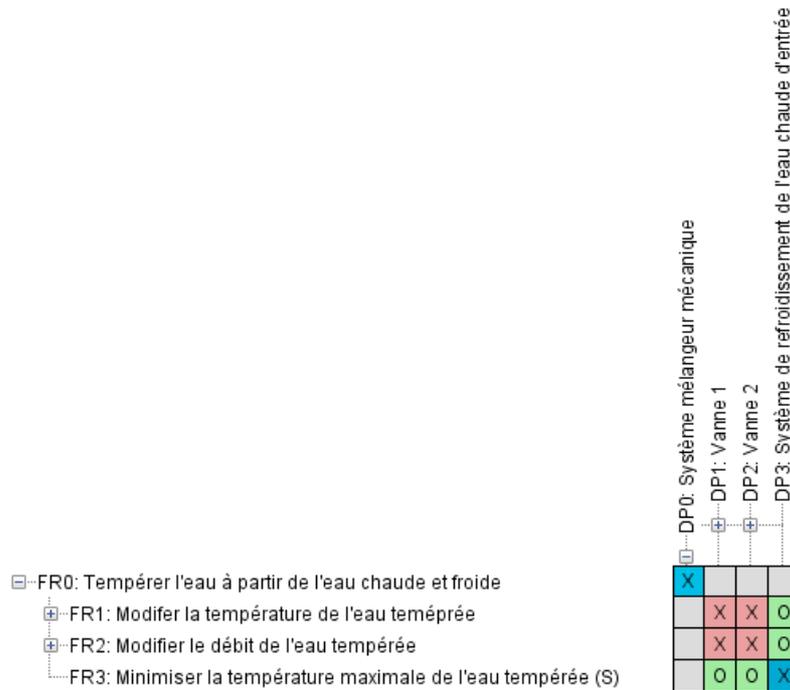


Figure 4.38 : Matrice de conception au niveau de la conception conceptuelle

3.3.2. Découplage de FR1 et FR2

L'analyse de la conception à l'étape de la conception conceptuelle montre un couplage. Ainsi, nous ne pouvons pas régler la température indépendamment du débit. Cette constatation conduit à la recherche d'un nouveau principe de solution qui permet de satisfaire l'indépendance de FR₁ et FR₂. D'abord, ces deux exigences doivent être mieux spécifiées dans leur expression. Nous les redéfinissons comme suit:

FR₁: Modifier la température de l'eau en mélangeant les eaux chaude et froide;

FR₂: Modifier le débit de l'eau tempérée sans affecter la température.

Afin de découpler les exigences fonctionnelles, nous proposons d'utiliser les principes de contradiction de TRIZ. En effet, le concept de solution comporte deux paramètres de conception en opposition; si on améliore la température, le débit est affecté. Or, le changement de ces deux grandeurs est lié à la modification de φ_1 et de φ_2 et par suite à la modification de la section des conduits de l'écoulement de l'eau chaude et de l'eau froide. Agir sur φ_1 affecte T et Q et agir sur φ_2 affecte T et Q. On est alors face à une contradiction

technique: *Modifier la température sans affecter le débit* (quantité de substance). Ainsi les principes de résolution du problème proposés par TRIZ sont les suivants:

Principe 3: La qualité locale;

Principe 17: La transition vers une autre dimension;

Principe 30: Les membranes flexibles et les parois minces;

Principe 39: L'environnement inerte.

Le principe 3 est traduit par: "*Chaque partie de l'objet doit être placée sous des conditions correspondant au mieux au rôle qu'il a à effectuer*". En effet, en considérant que ϕ_1 et ϕ_2 permettent de modifier la température et le débit respectivement, dans ce cas ϕ_1 doit agir en même temps sur la quantité de l'eau chaude et froide mais tout en conservant une somme des deux quantités d'eau constante, alors que ϕ_2 doit agir sur l'eau tempérée après mélange. La Figure 4.39 montre une conception qui permet de modifier la température séparément du débit.

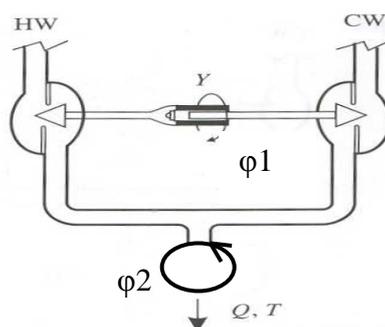


Figure 4.39 : Schématisation du principe de solution du découplage de la température et du débit (adaptée de Suh (Suh, 2001))

3.3.3. Résolution des contradictions Sécurité/Performance technique

Dans le principe de solution proposé dans 3.3.1, la sécurité exige une température d'entrée de l'eau chaude de 50°C. Cette exigence reflète le besoin de ne considérer qu'un robinet dédié uniquement « à se rincer » les mains par exemple, donc à un usage spécifique. Si l'on considère que l'utilisateur désire d'autres usages de l'eau tempérée nécessitant ainsi de l'eau à 60°C, « remplir un récipient » par exemple, ceci se traduira par la contradiction physique suivante : l'eau tempérée doit avoir une température maximale de 50°C pour assurer la sécurité de l'utilisateur mais aussi de 60°C pour les besoins de l'utilisateur. Elle peut être résolue par les principes de séparation de TRIZ. Nous proposons d'appliquer le principe 8 de séparation qui s'écrit : « *Utiliser les propriétés de deux phases du système. Le changement de*

phase est alors piloté par les conditions de fonctionnement du système ». En effet, on peut considérer qu'il existe deux phases d'utilisation du robinet :

- Phase 1 : Rincer les mains ;
- Phase 2 : Remplir un récipient ;

La phase 1 exige une température maximale de 50°C, la phase 2 exige une température de 60°C. Deux modes de fonctionnement du système sont considérés; le premier « mode sécurité » correspond aux conditions de la phase 1, le second « mode toute utilisation » correspond aux conditions de la phase 2. Ainsi, on peut imaginer la mise en place d'un capteur qui détecte le mouvement des mains dans une zone restreinte de la sortie de l'eau. Quand les mains se trouvent dans cette zone, le robinet déclenche le « mode sécurité ». Pour déclencher le mode 2, l'utilisateur doit appuyer sur un bouton ou ouvrir une vanne et avoir toujours ses mains en dehors de la zone de détection.

La synthèse de solution à partir d'une exigence de sécurité montre que cette dernière va exiger un principe de solution. En effet, il s'agit d'une intégration non inhérente à la conception du fait que le risque est relatif à un EMU. D'autre part, cette application montre que l'intégration de la sécurité s'accompagne d'un compromis en ce qui concerne les performances techniques. Ainsi, si l'on veut un robinet sans aucun risque, il est utile de renoncer aux certains besoins qui nécessitent une température supérieure à 50°C. Dans le cas contraire, le risque existera toujours. Cette aspect sous-entend une conception à un objectif bien défini ce qui se traduira par des produits spécialisés (non polyvalents).

Synthèse du chapitre IV

Dans ce chapitre, nous avons présenté la méthode que nous proposons pour l'intégration de la sécurité au plus tôt dans la conception des produits. Les cas d'emploi que la méthode permet sont aux nombres de trois : (1) la génération des exigences de sécurité (notées SRs) à partir de la formalisation du retour d'expérience et de (2) l'analyse systématique des risques des choix technologiques et (3) la synthèse de solution sécuritaire.

Les exigences issues du retour d'expérience, sont principalement exprimées en fonction des caractéristiques de l'environnement du produit. Les analyses des risques permettent d'exprimer les exigences relatives à la solution même et à ses paramètres de conception. Ces analyses consistent à étudier la compatibilité « caractéristiques humaines/ paramètres de conception ». Enfin, la synthèse de solution s'effectue à la base des exigences techniques et de sécurité. Ainsi, la sécurité fait partie intégrante de la solution proposée.

Pour chaque cas d'emploi, nous avons proposé des outils de conception afin de faciliter sa mise en œuvre. Enfin, les concepts de la méthode ont été démontrés à l'aide d'une illustration sur une étude de cas simple : le robinet mélangeur.

Chapitre V

Validation de la méthode Attelage des outils portés

Rien n'est plus dangereux qu'une idée quand on n'en a qu'une.
Paul Claudel

*Innover, ce n'est pas avoir une nouvelle idée mais arrêter
d'avoir une vieille idée.*
Edwin Herbert Land

Sommaire du Chapitre V

Introduction	163
1. Liaison trois points	164
1.1. Description de la liaison	164
1.2. Caractéristiques du produit faisant l'objet de la conception	165
1.3. Description de l'opération d'attelage	169
2. Cas d'emploi 1 : Expression des exigences de sécurité à partir du retour d'expérience	171
2.1. Analyse de l'accident par l'arbre des causes	172
2.2. Analyse de l'accident par la méthode IRAD et élaboration des exigences de sécurité	174
2.3. Conclusion sur l'analyse du retour d'expérience	178
3. Cas d'emploi 2: Expression des exigences de sécurité à partir de l'analyse de la solution technique	179
3.1. Analyse de la conception conceptuelle du point de vue conception	180
3.2. Analyse des risques liés aux choix des principes de solution	182
3.3. Analyse des risques liés à l'agencement structurel choisi	188
3.4. Conclusion sur l'analyse des risques de la liaison trois points	195
4. Cas d'emploi 3: Synthèse de solutions	197
4.1. Synthèse en conception conceptuelle pour la sous-phase d'attelage de l'outil	197
4.2. Synthèse en conception architecturale pour la sous-phase d'attelage de l'outil	203
Synthèse du chapitre V	207

Introduction

Le Cemagref cherche à trouver des voies de solutions pour la sécurisation des liaisons tracteurs-outils exposées dans le chapitre I. Vue la diversité de ces liaisons et l'ambiguïté qui règne dans ce qu'elle apporte à l'utilisateur, nous avons choisi de nous limiter à la liaison des outils portés qui correspond actuellement à la liaison trois points. En effet, cette liaison a « l'avantage » d'être complète en termes d'accidentologie et de problèmes d'ergonomie. Il en découle une partie importante des accidents graves (écrasement, coincement) et des problèmes ergonomiques variés dont on note ; des mauvaises postures, une pénibilité, des efforts physiques importants, des tâches simultanées et précises. D'abord, il s'agit de se recentrer sur les vrais besoins des utilisateurs étant donné que cette liaison a évolué au cours du temps ainsi que son usage. Ceci implique le besoin d'élaborer un cahier des charges fonctionnel. Cette décision provient du souci résidant dans les multiples déclinaisons de la liaison trois points qui ont été tentées sans succès. Il est utile de rappeler que nous avons pu recenser approximativement 300 brevets sur les liaisons d'accrochage mécanique entre 2000 et 2006.

Ce chapitre a pour finalité de montrer l'applicabilité de la méthode IRAD sur une vraie problématique industrielle. La liaison en question, son cahier des charges fonctionnel et les opérations d'attelage associées sont décrits. D'abord, nous appliquons la méthode dans l'analyse d'un scénario d'accident issu du retour d'expérience ; c'est le premier cas d'emploi de la méthode, « analyse des risques en retour d'expérience ». Il s'agit de l'écrasement de l'utilisateur entre le tracteur et l'outil. Cette analyse va nous conduire à exprimer un certain nombre d'exigences de sécurité. Ensuite, nous analysons la liaison trois points, d'abord, du point de vue de sa conception. A la suite de cette partie, nous allons nous concentrer sur la sous-phase d'attelage de l'outil au tracteur. Nous allons analyser les risques associés à la conception de la liaison trois points aux étapes des conceptions conceptuelle et architecturale. Cette analyse va nous amener à exprimer de nouvelles exigences de sécurité et dégager les sources des risques de cette liaison ; deuxième cas d'emploi de la méthode, « analyse des risques sur des solutions technologiques ». Ainsi, à partir des exigences de sécurité et des exigences techniques, nous procédons à la synthèse de quelques principes de solutions qui permettront, de notre point de vue, d'améliorer la sécurité de la liaison ; c'est le troisième cas d'emploi de la méthode, « synthèse de solutions en conception répondant à des exigences de sécurité ». Enfin, nous concluons ce chapitre par une synthèse des éléments exposés. Notons que dans cette application, nous nous limitons aux étapes des conceptions conceptuelle et

architecturale. L'étape de la conception détaillée s'effectue de la même manière mais à une échelle plus réduite (échelle composants).

1. Liaison trois points

1.1. Description de la liaison

La liaison trois points est celle brevetée par H. Ferguson en 1928. Cette liaison a un premier grand avantage : s'adapter à tout type d'outil porté. Depuis, elle n'a connu que des adaptations en vue notamment d'assurer la transmission de l'énergie. Alors que, les tracteurs et les machines agricoles sont en perpétuelle évolution et augmentent en taille, complexité, variété et sophistication.

Actionné par le relevage hydraulique, c'est l'attelage des outils portés. Il peut être situé à l'avant ou à l'arrière du tracteur. L'effort du tracteur est transmis par deux barres inférieures, portant à leur extrémité des rotules de fixation de l'outil. Ces deux barres permettent également la variation de la hauteur de l'ensemble des points par l'intermédiaire de deux chandelles reliées aux bras de relevage. La barre supérieure appelée « le troisième point » assure la fonction de transfert de charge sur l'essieu avant et la régulation de la profondeur de travail. La Figure 5.1 montre les composants principaux de cette liaison.

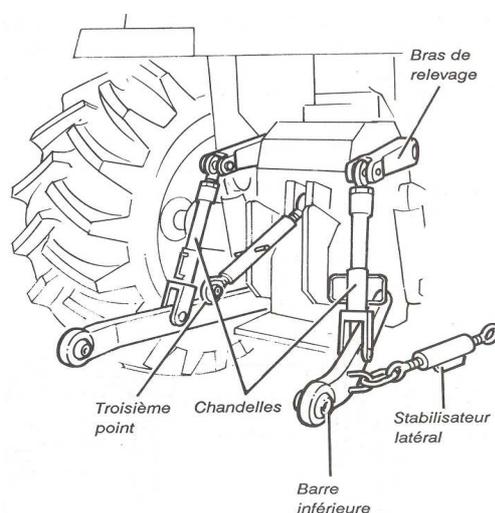


Figure 5.1 : Présentation de la liaison 3 points (Cemagref, 1991)

Cette liaison permet de lever les outils grâce à la puissance hydraulique du tracteur. Les différents éléments dont elle est composée (Figure 5.1) sont réglables, afin de pouvoir adapter les différents points d'attelage du tracteur avec ceux de l'outil et afin de pouvoir modifier le comportement de ce dernier, pendant le travail. Les stabilisateurs latéraux permettent de rigidifier l'ensemble. La liaison trois points est équipée d'asservissements

comme le contrôle de position et le contrôle d'effort. Le contrôle de position permet de maintenir la hauteur de l'outil suivant une consigne de l'utilisateur. Quant au contrôle d'effort, il permet de modifier la profondeur de travail de l'outil suivant les variations de l'effort de traction qu'exerce le tracteur sur l'outil en mesurant cet effort et en le comparant à la consigne que l'utilisateur a établie.

1.2. Caractéristiques du produit faisant l'objet de la conception

Dans ce paragraphe, nous présentons la partie du cahier des charges, que nous avons élaboré sur les liaisons tracteur-outils (Ghemraoui, 2007), qui concerne le besoin de porter un outil par le tracteur.

1.2.1. Délimitation du périmètre de l'étude

La délimitation du périmètre de l'étude est effectuée en fonction de la famille des outils portés. Tenant compte de la variabilité des usages de la liaison trois points, nous allons nous concentrer dans un premier temps sur ces derniers. Pour cet objectif, le Cemagref ne souhaite pas toucher à l'intégrité (des points de vue fonctionnel et structurel) du tracteur et de l'outil, ainsi l'espace de conception s'arrête « côté tracteur » sur l'interface où sont placées les liaisons actuelles et « côté outil » sur l'interface d'accrochage de ce dernier.

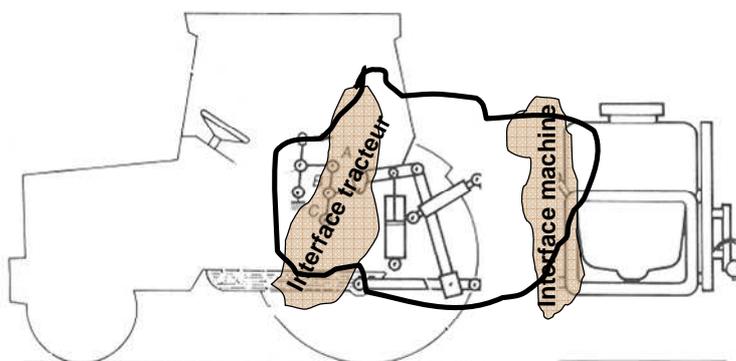


Figure 5.2 : Périmètre de l'étude

Ainsi, appartiennent au périmètre de conception les éléments suivant : liaison trois points (relevage compris), interface d'accrochage de la liaison sur le tracteur et l'interface d'accrochage de l'outil sur la liaison (Figure 5.2).

Le produit doit permettre d'accomplir les différentes fonctions de la liaison trois points actuelle tout en assurant la sécurité des utilisateurs. Ces derniers peuvent être présents dans l'environnement du produit pendant tout son cycle de vie.

1.2.2. Description du profil de vie du système

Définition: Ensemble des situations du produit dans sa phase d'utilisation. Ces situations peuvent être d'emploi ou de non emploi (stockage, entretien,...). (AFNOR, 1996)

Les sous-phases (SP) de vie considérées caractéristiques du produit en **situation d'emploi** et pour les besoins de porter l'outil par le tracteur sont:

- SP d'attelage et de dételage de l'outil ;
- SP de réglage de la position de l'outil ;
- SP de transport de l'outil

Chacune des sous-phases est choisie suivant sa valeur ajoutée dans l'analyse du produit, soit en termes de fonctions nécessaires soit suivant la typologie du risque associé issue du retour d'expérience. Par exemple, les sous-phases d'attelage et de dételage sont caractérisées par des accidents d'écrasement et de coincement. En revanche, la sous-phase de réglage qui correspond au travail de la machine est caractérisée principalement par des problèmes d'ergonomie, des écrasements et de coincements dus à la difficulté des réglages de la liaison. En transport, il s'agit des risques de renversement du tracteur du fait du manque de stabilité en dynamique de l'ensemble (Tracteur-Liaison-Outil).

Il convient de noter que notre problème de sécurité fût traité d'un point de vue purement technique, les aspects économiques et sociaux n'ont pas été intégrés à ce travail.

1.2.3. Recensement des Eléments du Milieu d'Utilisation (EMUs)

Définition : C'est l'ensemble des composantes physiques, humaines... en relation avec le produit pendant son cycle de vie. Pour chaque phase du cycle de vie, on peut distinguer différents éléments.

D'une manière générale, les éléments du milieu d'utilisation de notre produit sont (Figure 5.3):

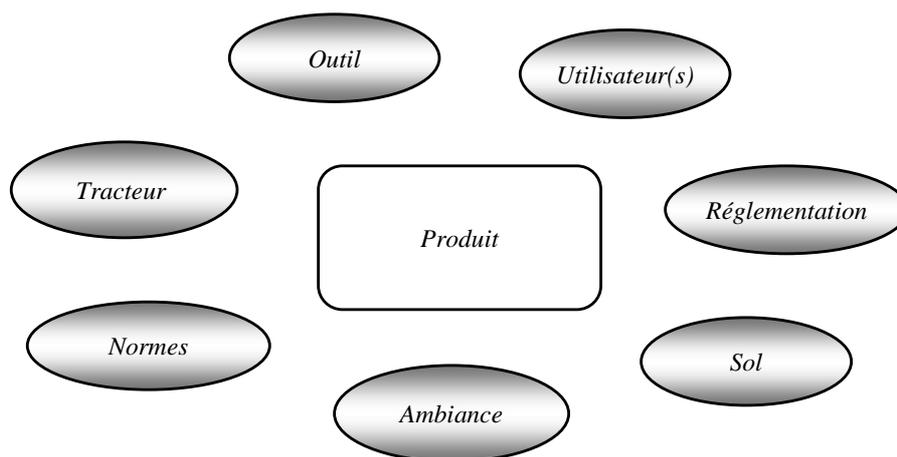


Figure 5.3 : Recensement des EMUs

Les caractéristiques de chaque EMU diffèrent suivant la sous-phase d'utilisation considérée.

Le tracteur, caractérisé par:

- sa catégorie (Figure 5.4): 1, 2, 3 ou 4 (ISO 730-1 : 2009) ;
- l'énergie délivrée: mécanique, hydraulique, électrique, électronique;
- son architecture extérieure: dimensions.

Catégorie	Puissance à la prise de force au régime nominal (kW)
1	$P \leq 48$
2	$P \leq 92$
3	$60 \leq P \leq 185$
4	$110 \leq P \leq 350$

Figure 5.4 : Les catégories de tracteurs suivant l'ISO 730 -1 : 2009

L'outil, caractérisé par:

- sa famille : portée,
- ses fonctions;
- les énergies et puissances requises;
- ses actionneurs et ses commandes.

Le(s) utilisateur(s), considéré(s) comme le cœur de l'étude. Il est nécessaire de le caractériser et d'étudier son interaction avec le produit suivant les différentes étapes du développement du produit. Dans cette étude, nous considérons qu'il existe un seul utilisateur travaillant seul. Les aspects organisationnels n'ont pas été traités dans ces travaux.

Les autres éléments:

- les normes: les normes d'ergonomie et de sécurité;
- les réglementations: code de la route, directives machines et tracteurs;
- les terrains: routes, cultures, sol, ...;
- l'ambiance: graisseur, pluie, boue, gel, poussières, pression, huile, température....

1.2.4. Recensement des fonctions et élaboration du Cahier des Charges Fonctionnel

La fonction globale du produit est « FR₀ : Porter l’outil par le tracteur ». Cette fonction globale sous-entend deux fonctions principales de liaison et de réglage. Ainsi, nous avons recensé les fonctions suivantes (Figure 5.5) :

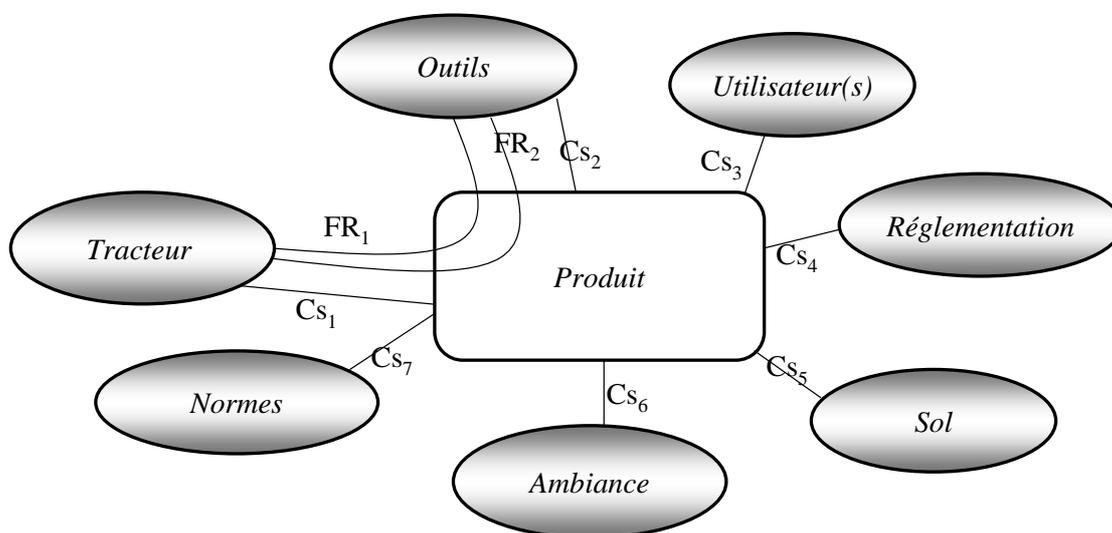


Figure 5.5 : Diagramme des interactions du produit avec son environnement

FR₁ : Lier l’outil au tracteur ;

FR₂ : Régler la position de l’outil par rapport au tracteur ;

Cs₁ : Le produit doit s’adapter au tracteur ;

Cs₂ : Le produit doit s’adapter à l’outil;

Cs₃ : Le produit doit tenir compte de(s) utilisateur(s) ;

Cs₄ : Le produit doit respecter la réglementation ;

Cs₅ : Le produit doit s'adapter au sol ;

Cs₆ : Le produit doit résister à et respecter l’ambiance ;

Cs₇ : Le produit doit tenir compte des normes de sécurité.

Ces EMUs et fonctions sont caractérisés comme indiqué dans le tableau de la (Figure 5.6).

Fonction	EMUs associés	Variables de conception	Variables critères	Mesures
FR ₁ : Lier l'outil au tracteur	- <u>Tracteur</u> dimensions, catégorie (ISO 730-1 :2009) - <u>Outils</u> Accrochage rigide Famille : portée Poids<12T		Poids outil (M) Rigidité de l'attelage (Σ Moments)	$M \approx 0,5 * P$ Σ Moments au point d'appui=0
FR ₂ : Régler la position de l'outil par rapport au tracteur	- <u>Tracteur</u> dimensions, catégorie (ISO 730-1 :2009) - <u>Outils</u> Accrochage rigide Type : portée Poids<12T		Poids outil (M) Déportation (L) Hauteur d'attelage (H)	$P_{hyd} (kW) \approx 0,23 * P (kW)$ $M \approx 0,5 * P$ Rotation (RX) $\approx \pm 6^\circ$ Rotation (RY) $\approx \pm 10^\circ$ Translation Z : $H \geq 1m$
Cs1 : S'adapter au tracteur	- dimensions, - catégorie (ISO 730-1 :2009)	-Choix de matériaux -Dimensionnement		voie $\geq 1,15m$ garde $\leq 1m$
Cs2 : S'adapter à l'outil	- Accrochage rigide - Type : portée - Poids<12T	-Répartition des points d'appui -Dimensionnement		
Cs3 : S'adapter à la réglementation	2006/42/CE	- Exigences de sécurité		
Cs4 : S'adapter aux utilisateurs	- Conditions physiques - Niveau de formation - Espace disponible et stabilité des équipements		-Effort physique - Effort mental - Capacités physiques	
Cs5 : S'adapter à l'environnement	-Humidité -Taux d'oxygène - Température, gel (T) - Poussière (G)	-Choix de matériaux -Protection		- Température $0 < T < 90^\circ C$ - $G > 0,063 mm$
Cs6 : Résister au sol	- Inclinaison (I) - Portance (S)	- Choix de matériau - Choix des surfaces d'appui		$I_{max} = 8,5^\circ$ (ISO 4254-1:2008) $S_{max} = 400 kPa$
Cs7 : S'adapter aux normes	ISO 14121-1:2007, ISO 12100-1:2009, NF EN 614-1:2006...	- Exigences de sécurité	- Mesure des caractéristiques humaines	

Figure 5.6 : Cahier des Charges Fonctionnel du produit pour outils portés

1.3. Description de l'opération d'attelage

Dans cette description de l'opération d'attelage, nous considérons la solution technologique basique parmi l'ensemble des variantes, c'est-à-dire qu'il n'existe pas de vérins hydrauliques à la place des trois barres et des chandelles, pas de crochets à la place des rotules, pas de cadre etc... Ainsi, afin d'accrocher un outil porté à la liaison trois points, l'utilisateur est censé effectuer un certain nombre de tâches de manière « supposée » séquentielle. Cependant, l'analyse de cette activité en situation normale montre qu'il s'agit

principalement de tâches itératives dépendant de la nature de l'environnement, de l'expérience de l'utilisateur, du type de machine et de la catégorie du tracteur. D'une manière générale, l'opération d'accrochage d'un outil porté au tracteur est toujours basée sur les tâches suivantes :

- Abaisser le relevage ;
- Reculer le tracteur et amener les trous des barres inférieures au plus près des trous des points d'accrochage de la machine ;



Figure 5.7 : Attelage trois points et outil - phase d'approche (MAP, 2006)

- A partir du siège du tracteur, placer au mieux les barres inférieures à l'aide des bras de relevage (Figure 5.7) ;
- Eteindre le tracteur, mettre le frein de parking et descendre de la cabine,;
- Ajuster les stabilisateurs afin de mettre en position les points inférieurs ;
- Attacher manuellement les barres inférieures aux outils. Pour cela, placer les trous des barres inférieures du tracteur sur les axes de l'outil. Puis, sécuriser la liaison à l'aide des arrêts axiaux prévus à cet effet (goupille) (Figure 5.8) ;



Figure 5.8 : Accrochage des bras inférieurs (HOSTA, 2004)

- Attacher la barre supérieure avec le troisième point de l'outil. Cette barre peut être rallongée ou raccourcie.

Cette description de l'opération d'attelage est reprise d'un organisme américain de formation sur l'utilisation du matériel agricole (HOSTA, 2004). Telle que décrite, cette opération d'attelage a l'air plutôt facile à réaliser. Mais la pratique montre que c'est une opération itérative, difficile, nécessitant d'importantes capacités physiques et des mauvaises postures causant un grand nombre d'accidents. De plus le réglage des chandelles n'apparaît nulle part, sachant que tous les utilisateurs savent qu'il est quasi-impossible d'accrocher la liaison à la machine sans ajuster d'une manière répétitive les chandelles.

La liaison faisant l'objet de la conception étant décrite, des points de vue composition, fonctionnel et utilisation, nous allons procéder dans le paragraphe suivant à l'application de la méthode IRAD. Cette application permettra de générer des exigences de sécurité à intégrer lors de la synthèse de solution.

2. Cas d'emploi 1 : Expression des exigences de sécurité à partir du retour d'expérience

L'étude effectuée par les conseillers de la CCMSA et publiée dans (MAP, 2006), montre que les utilisateurs de la liaison trois-points sont particulièrement exposés à un risque de coincement et d'écrasement entre le tracteur et l'outil (Figure 5.9).



Figure 5.9 : Position et posture possible pour effectuer l'accrochage (MAP, 2006)

Cette étude considère que les causes de ces risques sont les suivants (MAP, 2006) :

- L'action sur les commandes de relevage, placées à l'arrière du tracteur et accessibles par l'opérateur placé à l'extérieur du poste de conduite,
- La coordination des manœuvres entre le conducteur et l'opérateur chargé de l'attelage lors du rapprochement du tracteur vers l'outil.
- L'instabilité de l'outil en phase d'attelage.
- L'exiguïté de l'espace entre le tracteur et l'outil.

Cependant, une réunion, des représentants des constructeurs en machinisme agricole effectuée en janvier 2002 (CETIM, 2002), considère que les problèmes liés à l'accrochage avec la liaison trois points sont relatifs à l'augmentation de la masse des outils qui conduit à raccourcir les bras de l'attelage. Il en résulte une réduction de l'espace rendant pénible et dangereuse les interventions d'accrochage, de décrochage et de réglage des outils.

Ces données montrent les points de vue, des utilisateurs et des constructeurs. Ils proviennent essentiellement d'analyses non guidées par une méthode. Il est clair qu'elles sont difficilement interprétables par un concepteur mécanicien du fait qu'elles manquent de spécification par rapport à la liaison en cause.

Dans cet exemple d'application et pour ce cas d'emploi de la méthode, nous allons nous limiter au cas du risque d'écrasement entre le tracteur et l'outil lors de l'opération d'attelage ; risques conduisant souvent à des amputations voire à des accidents mortels. Ici, nous considérons que l'utilisateur travaille seul et nous ne considérons que le cas d'instabilité de l'outil.

2.1. Analyse de l'accident par l'arbre des causes

D'abord, dans ce paragraphe nous allons analyser l'accident de manière traditionnelle, par la méthode de l'arbre des causes (AdC) afin de montrer, par la suite, l'apport de notre méthode. Cet arbre a malgré tout l'avantage de guider la recherche des causes. Une vue partielle de cet arbre est donné par la Figure 5.10.

Dans cet arbre, éliminer le risque peut revenir tout simplement à rendre la machine stable ou à éliminer l'utilisateur de la zone d'attelage. Pour ce faire, il s'agit de traiter les événements terminaux, les plus récurrents, de l'une ou l'autre des deux branches de l'arbre.

L'objectif de rendre l'outil stable a permis le passage à la béquille hydraulique (Figure

5.11). Cette évolution n'a pas donné satisfaction du fait de la non prise en considération des exigences d'accrochage et de l'instabilité imposée par le fonctionnement de la liaison même.

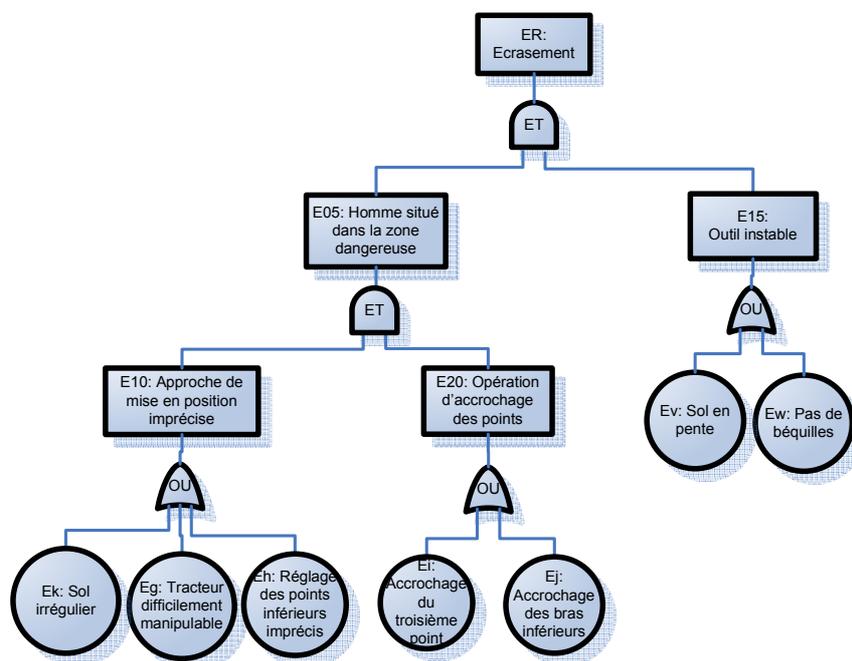


Figure 5.10 : Vue partielle de l'arbre des causes du risque d'écrasement

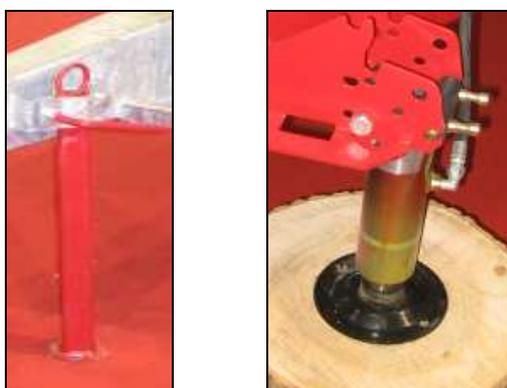


Figure 5.11 : Passage des béquilles mécaniques (à gauche) aux béquilles hydrauliques (à droite)

L'objectif de faciliter l'accrochage des points d'attelage (événements i et j) a permis le passage de points d'accrochage à rotule à des crochets automatiques (Figure 5.12). Cette solution n'a cependant jamais résolu le problème de la difficulté de faire coïncider les points d'accrochage dû à la difficulté de manier le tracteur.

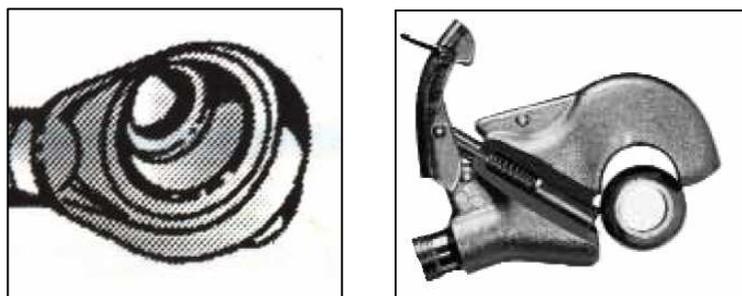


Figure 5.12 : Passage de la rotule au crochet automatique

L'élaboration de cet arbre (même partielle) montre que les événements terminaux sont traités de la même façon. Éliminer le risque revient à éliminer l'un ou l'autre des événements. La seule classification que cette démarche permet, correspond à l'estimation des probabilités d'occurrence de chaque événement. Les actions correctives, qui en découlent, consistent généralement en l'ajout ou en la modification de composants qui sont des solutions moyennement satisfaisantes. A ces constats s'ajoute le fait que l'AdC est utilisé ponctuellement pour définir les événements pouvant entraîner un danger et conduit par suite à des améliorations locales de la sécurité. Enfin, pour être fiable, l'AdC reste une méthode lourde à mettre en œuvre. Elle demande de nombreuses ressources (personnel expert, temps, base de connaissances, ...) et son implémentation s'avère rapidement difficile et nécessite la participation de tous pour être menée à bien.

2.2. Analyse de l'accident par la méthode IRAD et élaboration des exigences de sécurité

Cet accident potentiel est analysé et traduit en exigence de sécurité comme expliqué sur la Figure 5.13. La différence majeure entre l'expression des exigences de sécurité à partir de l'analyse REX et l'analyse des risques relatifs à la conception est que dans le premier cas les risques sont connus. Il s'agit de les positionner par rapport à l'un ou à l'autre des contextes physiques du processus du risque. Ainsi, pour guider ce positionnement, nous avons défini une typologie des objets constituant chaque contexte (voir chapitre III).

Dans ce cas, l'évènement dangereux initial est « l'outil se renverse sur l'utilisateur ». L'arbre des causes montre la présence de deux événements principaux susceptibles de produire ce risque. Étant liés par un « ET », l'élimination de ce risque consiste à éliminer l'un des deux événements. Cependant, ces deux événements ne sont pas de la même nature. L'un est lié à un élément du milieu d'utilisation et ainsi au contexte d'utilisation et l'autre est lié à la procédure d'accrochage qui oblige l'utilisateur à rentrer dans la zone du danger. Dans la suite, nous détaillons le positionnement de ces deux événements par rapport aux différents

contextes de la méthode IRAD et nous exposons leurs effets sur la conception.

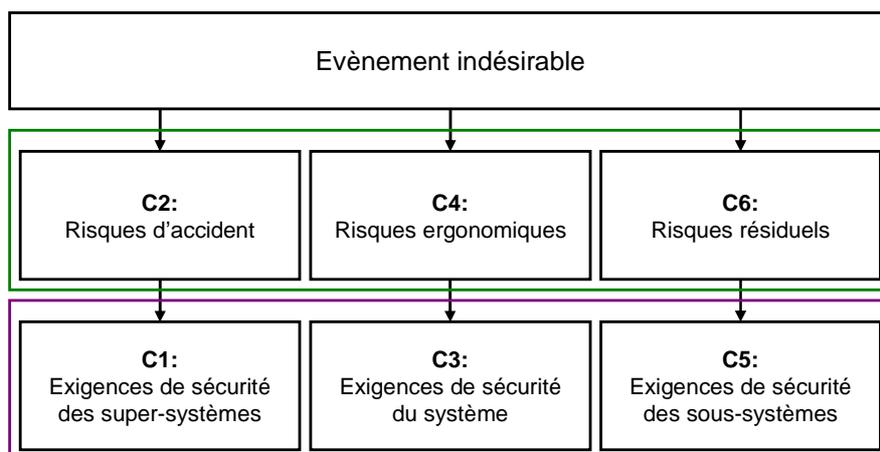


Figure 5.13 : Analyse des problèmes de sécurité dans le processus des risques

2.2.1. Analyse de l'évènement E15 par IRAD : Outil instable

Le premier évènement qui ressort de l'AdC est que l'outil est instable. La suite de l'analyse permet de générer d'autres évènements tel que sol irrégulier (en pente) et l'outil n'admet pas de béquilles ou que ces dernières sont inadaptés au sol et par suite au contexte d'utilisation. Ces informations sont de nature technique et reflètent la solution à considérer afin de résoudre ce problème. Or, dans notre méthode d'analyse des risques, nous cherchons d'abord à situer ce problème par rapport au processus de développement du produit et ainsi par rapport à un contexte physique du processus des risques. En effet, ce risque d'écrasement issu de l'instabilité de l'outil est directement lié à l'énergie potentielle emmagasinée dans celui-ci. Cette énergie est liée à la caractéristique de l'outil (sa masse) la plus importante pour les objectifs de la conception. Par suite, ce risque se situe dans le contexte C₂ « Risque d'accident » et doit se traduire dans C₁ « Exigence de sécurité des super-systèmes » par une exigence de sécurité liée à l'outil et que nous pouvons exprimer par « SR: *Minimiser l'instabilité de l'outil lors de l'accrochage* » ou par « SR: *Prévenir des risques de renversement de l'outil* ». La première formulation sous-entend que l'utilisateur intervient activement dans l'opération d'accrochage. Cependant, la deuxième formulation est juste liée à la caractéristique dangereuse de l'outil et est par conséquent plus abstraite. Elle convient si l'attelage s'effectue manuellement, automatiquement ou semi-automatiquement. Ainsi, nous allons considérer la deuxième formulation. L'étude approfondie de ce phénomène permet d'écrire le modèle du risque générer par le moment qui pourra engendrer le renversement de l'outil. Ceci s'exprime par la relation suivante :

$$\boxed{\text{Risque} = f(\vec{M})}$$

En effet, pour que l'outil ne se renverse pas, il faut que le moment \vec{M} qui lui est fourni lors de l'attelage reste au dessous d'un certain seuil $\|\vec{M}_{\max}\|$ qui est fonction du poids de l'outil. Ainsi, « *SR : Prévenir des risques de renversement de l'outil* » revient à minimiser \vec{M} . On peut alors exprimer cette exigence par une fonction de minimisation du type :

$$(P) \left\{ \begin{array}{l} \text{Min}F(x) = \text{Min} \sum_{i=1}^n p_i \|\vec{M}_i\| \\ F(x) \leq \|\vec{M}_{\max}\| \\ \sum_{i=1}^n p_i = 1; \quad p_i > 0 \end{array} \right.$$

\vec{M}_i : critères d'optimisation et moment i fournit à l'outil ;

p_i : niveau d'importance du critère (poids) \vec{M}_i .

n : nombre total d'actions mécaniques exercées.

Cette exigence est principalement caractérisée par les efforts exercés par le produit sur l'outil lors de son attelage.

2.2.2. Analyse de l'évènement E05 par IRAD : Utilisateur dans la zone dangereuse

Le deuxième évènement qui ressort de l'AdC est que l'utilisateur se situe dans la zone dangereuse. Si nous poursuivons cette étude, nous allons générer d'autres évènements tels que l'opération d'attelage nécessite l'intervention de l'utilisateur et que ceci est lié au besoin de faire correspondre les points d'attelage de la liaison à ceux de l'outil afin de pouvoir accrocher les points inférieurs et le point supérieur. Cette analyse localise la source directe du problème et reflète la solution à considérer afin de résoudre ce problème.

En effet, ce risque d'écrasement issu de la présence de l'utilisateur dans la zone d'attelage est directement lié à la notion de la localisation dans l'espace de l'utilisateur dans l'espace et ainsi à la procédure d'attelage et à la manière avec laquelle la liaison remplit sa fonction. Par suite, ce risque se situe dans le contexte C_4 « Risque ergonomique » et doit se traduire dans C_3 « Exigence de sécurité du système » par une exigence de sécurité liée à l'humain et à la localisation de la zone dangereuse que nous pouvons exprimer par « *SR_{2.1} : Minimiser l'entrée de l'utilisateur dans la zone d'attelage* ». L'étude approfondie de ce

phénomène permet d'écrire le modèle du risque issu de l'intersection entre les membres de l'utilisateur et la zone de danger. Ainsi, cette intersection est définie par une localisation (L), un volume (V), une gravité (G) et une forme (F). Si l'on ne considère pas la dynamique du comportement de l'utilisateur (variabilité des postures possibles) et en considérant que la zone dangereuse est une zone homogène ; dans ce cas, l'intersection est définie par la gravité (G) et le volume (V) de l'intersection. La gravité dépend de la vulnérabilité du membre affecté (λ_i) et la dangerosité de la zone considérée (W_k).

$$\boxed{\text{Risque} = f(\lambda_i, W_k, V)}$$

Ainsi, l'exigence de sécurité $SR_{2.1}$ s'exprime par une fonction de minimisation du type :

$$(Q) \left\{ \begin{array}{l} \text{Min}G(y) = \text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \lambda_i W_k y_i \\ y_i = \frac{V_i}{V_t}; \quad y_i \in [0;1] \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1, \quad \lambda_i > 0 \end{array} \right.$$

y_i : critères d'optimisation qui reflètent le degré de présence de l'utilisateur dans la zone ;

λ_i : vulnérabilité de la partie exposée de l'utilisateur ;

E_k : dangerosité de la zone dangereuse considérée ;

V_i : volume de la partie i affectée de l'utilisateur ;

V_t : volume total de la zone dangereuse ;

n : nombre total des parties affectées de l'utilisateur ;

m : nombre exprimant la variabilité des parties affectées.

2.2.3. Analyse de l'évènement (Ei, Ej) par IRAD : Accrochage des points

Cet évènement final associe le risque à l'accrochage des points inférieurs et du point supérieur.

En effet, ce risque d'écrasement issu de la difficulté d'accrochage des points inférieurs est directement lié au choix du composant en question. Par suite, ce risque se situe dans le contexte C_5 « Risque résiduel » et doit se traduire dans C_6 « Exigence de sécurité des sous-systèmes » par une exigence de sécurité liée à l'humain et à la facilité de l'accrochage des points que nous pouvons exprimer par « $SR_{3.1}$: Minimiser la difficulté d'accrochage des points d'attelage ». Ici, nous avons cherché à palier l'effort effectué par l'utilisateur pour

porter l'outil afin de l'accrocher. Ce phénomène entraîne la fatigue de l'utilisateur, l'instabilité de l'outil et entraîne par suite son renversement. Dans ce cas, le risque est exprimé par l'expression :

$$\boxed{Risque = f(m, \Delta x, \Delta y, \Delta z, F_{max})}$$

Avec : m : poids de la machine ;

Δx : écart de position suivant l'axe des x des points d'attelage système/outil ;

Δy : écart de position suivant l'axe des y des points d'attelage système/outil ;

Δz : écart de position suivant l'axe des z des points d'attelage système/outil ;

F_{max} : Effort maximal supporté par l'utilisateur.

Ainsi, l'exigence de sécurité $SR_{3,1}$ s'exprime par une fonction de minimisation du type :

$$(L) \left\{ \begin{array}{l} MinE(f) = Min \sum_{i=1}^3 \Delta x_i \Delta y_i \Delta z_i f_{ix} f_{iy} f_{iz} \\ f_i = \frac{F_i}{F_{max}} \\ \vec{F}_i = F_{ix} \vec{x} + F_{iy} \vec{y} + F_{iz} \vec{z} \end{array} \right.$$

f_{ix} : le degré de difficulté de la tâche selon l'axe des x ;

f_{iy} : le degré de difficulté de la tâche selon l'axe des y ;

f_{iz} : le degré de difficulté de la tâche selon l'axe des z ;

i : représente la localisation de la zone d'effort, ici il s'agit de trois zones représentant les trois points d'attelage.

2.3. Conclusion sur l'analyse du retour d'expérience

L'analyse du retour d'expérience, d'une part par l'AdC et d'autre part, par la méthode IRAD montre les apports de cette dernière. D'abord, les événements mis en évidence dans l'AdC ne peuvent pas être traités tous de la même façon. En effet, suivant sa nature, l'évènement est considéré en conception conceptuelle, architecturale ou détaillée. Ensuite, son effet sur la conception n'est pas de la même nature selon l'étape à laquelle il intervient. De plus, la résolution des problèmes mis en évidence dans l'AdC conduit à des modifications locales et une remise en cause difficile du concept de solution. Ce qui nécessite une hiérarchisation de ces événements suivant les objectifs internes à l'entreprise en termes de niveau d'intervention sur le produit originel et du niveau de sécurité recherché. Par suite, pour la recherche d'une nouvelle solution ou la conception d'un nouveau produit nous proposons de trouver le modèle du problème et ensuite le modèle de sa solution afin de

l'intégrer de manière abstraite dans les processus de conception. Enfin, on peut bien imaginer l'intérêt d'analyser un produit selon trois points de vue : concepts, architecture et composants. En effet, plus nous avançons dans la conception plus les informations disponibles (paramètres de conception) pour analyser les risques deviennent importantes, mais moins nous avons de liberté pour modifier ou intervenir sur notre solution. Ainsi, la méthode propose de décomposer le système suivant son concept, son architecture et ses composants afin de résoudre au mieux le problème de sécurité. Enfin, dans la conduite d'une analyse par arbre des causes, on recherche généralement les événements terminaux admettant la plus grande probabilité d'occurrence qu'on essaye de réduire. En effet, notre méthode montre que si l'on cherche à éliminer efficacement le risque d'écrasement de l'utilisateur entre le tracteur et l'outil, il faut prendre en considération l'instabilité possible de l'outil à l'étape de la conception conceptuelle.

3. Cas d'emploi 2: Expression des exigences de sécurité à partir de l'analyse de la solution technique

Cette phase d'analyse consiste à évaluer la qualité de la transition des exigences fonctionnelles aux paramètres de conception. Elle correspond à analyser d'une part, les couplages qui existent entre les exigences fonctionnelles (FRs) et d'autre part, les risques liés aux choix techniques effectués.

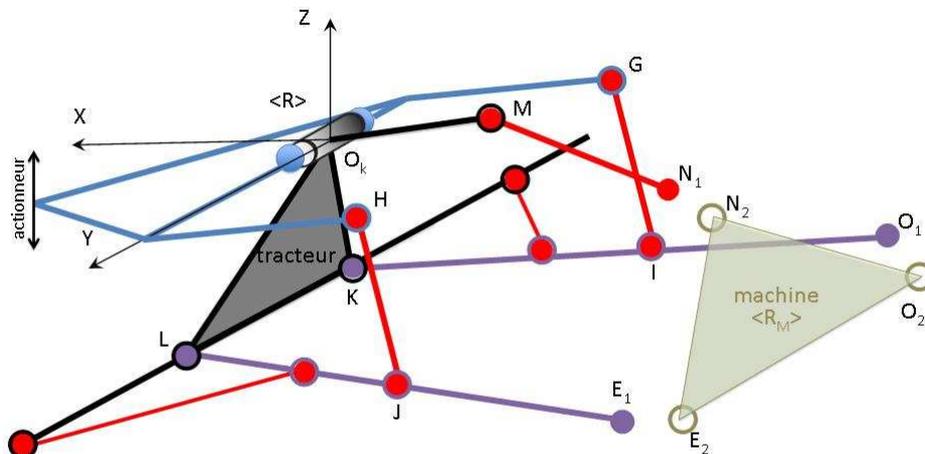


Figure 5.14 : Notation de l'attelage trois points

La Figure 5.14 donne les notations des articulations constituant la liaison trois points. A droite, nous avons la machine et à gauche le tracteur. Ainsi, le système compris entre ces deux plans, représentant l'outil et le tracteur qui sont considérés statiques, fait l'objet de l'étude. Les points d'appui de la liaison trois points avec l'arrière du tracteur correspondent aux points (K, L, M). Quand les trois barres sont considérées dissociées du tracteur, les trois

points (K, L, M) sont notés, du côté du tracteur (K_1, L_1, M_1) et du côté des barres (K_2, L_2, M_2). Ainsi, les trois barres, nous les notons ($K_2-O_1, L_2-E_1, M_2-N_1$). Les trois points (O, E, N) constituent le plan de la liaison trois points avec l'outil. Quand l'outil est décroché du tracteur (cas de la Figure 5.14), nous notons ces trois points, du côté du tracteur (O_1, E_1, N_1) et du côté de l'outil (O_2, E_2, N_2). Les deux barres (G-I) et (H-J) correspondent aux chandelles. Les barres actuellement réglables sont représentées en rouge.

Nous considérons comme référence de description, le repère orthonormé direct (O_k, X, Y, Z) considéré fixe et appartenant à l'arrière du tracteur (Figure 5.15).

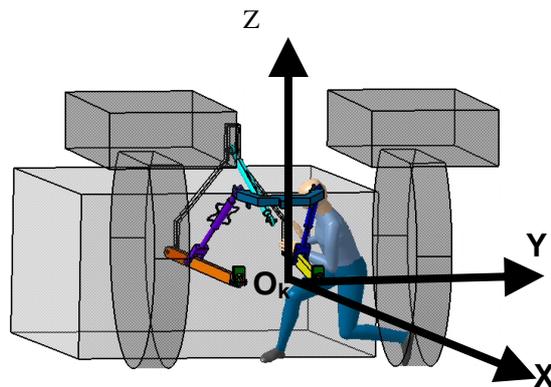


Figure 5.15 : Repère de description

L'axe X correspond à l'axe médian horizontal du tracteur, Y la tangentielle à l'arrière du tracteur et Z la verticale passant pas le milieu de l'arrière du tracteur.

Nous associons à l'outil le repère orthonormé $R_M (O_M, X_M, Y_M, Z_M)$.

3.1. Analyse de la conception conceptuelle du point de vue conception

Analyser la conception conceptuelle de la liaison trois points consiste à analyser la transition de la phase (P_1) à la phase (P_2) (Figure 5.16).

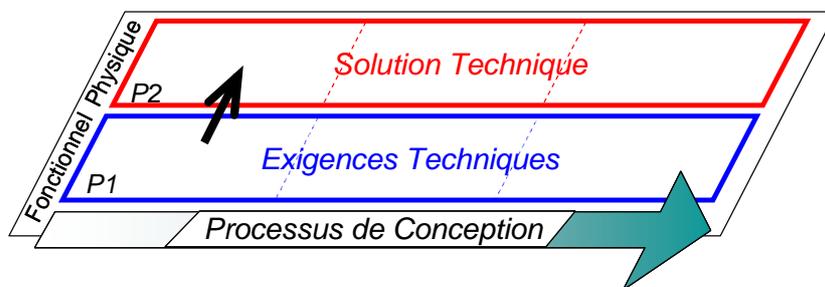


Figure 5.16 : Transition du fonctionnel au physique à l'étape de la conception conceptuelle

3.1.1. Expression des exigences fonctionnelles et des paramètres de conception

Dans l'analyse de la conception, nous allons partir des deux exigences principales décrites dans le cahier des charges fonctionnel du paragraphe 1. Ces deux exigences correspondent à « FR₁ : lier l'outil au tracteur » et « FR₂ : Régler la position de l'outil par rapport au tracteur ». Selon le besoin de l'utilisateur, FR₂ va se décomposer en trois sous-exigences de réglage en rotation autour de X et Y et en translation selon Z. Cependant, FR₁ va se retrouver décomposée, aussi en trois sous-exigences, mais ceci est relatif au choix d'effectuer une liaison en trois points et par suite trois barres. Cette décomposition fonctionnelle et physique est montrée à la figure 5.17 comme suit :

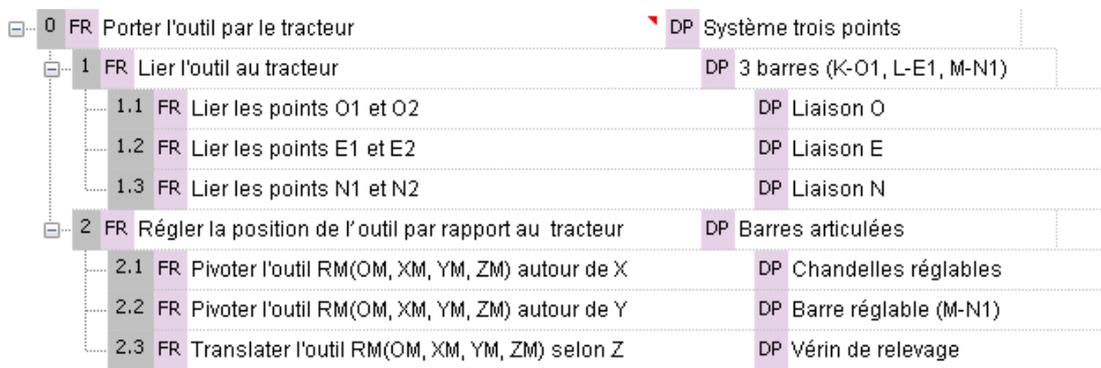


Figure 5.17 : Arbres fonctionnel et physique de la liaison trois points

Cette décomposition admet la matrice de conception suivante des FRs (Figure 5.18):

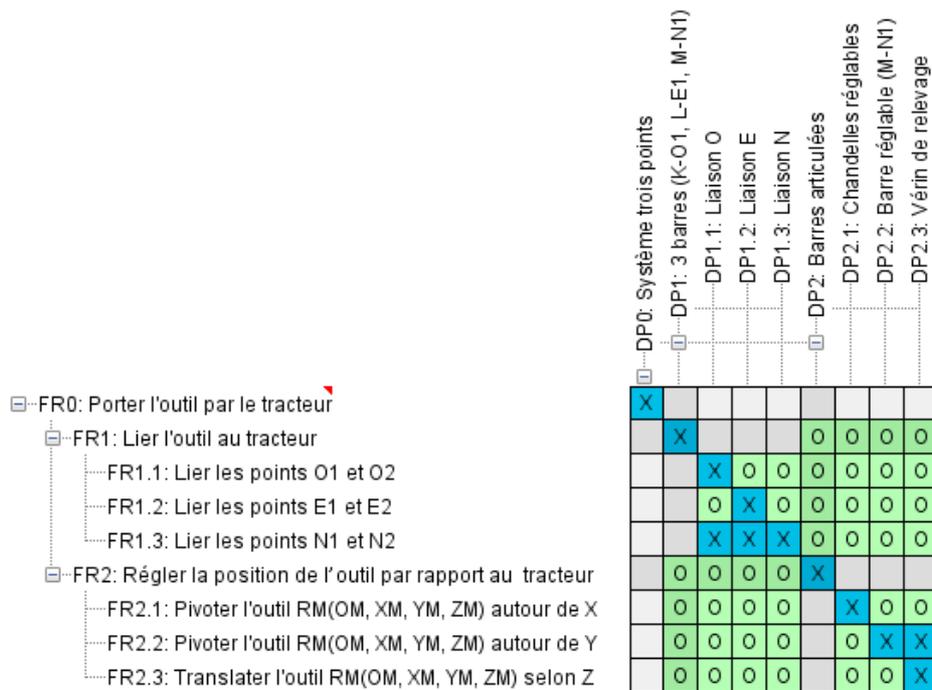


Figure 5.18 : Matrice de conception de la liaison trois points

Cette matrice montre, pour les deux exigences principales FR_1 et FR_2 , une conception découplée et par suite acceptable. La redondance, relative au découplage, provient principalement du séquençement dans la satisfaction des exigences qui d'une part, exige que les deux points inférieurs doivent être accrochés avant le point supérieur et d'autre part, considère que la variation de la position selon Z affecte la rotation autour de Y.

3.1.2. Conclusion sur l'analyse de la conception de la liaison trois points

L'analyse de la conception conceptuelle, de la liaison trois points, d'un point de vue purement technique montre une conception acceptable (découplée). Ceci implique que dans une démarche classique de conception cette solution est validée. Or, le retour d'expérience montre un nombre important d'accidents et des difficultés d'utilisation. D'après, l'analyse effectuée dans le paragraphe 2, les risques existent quand le produit conçu crée des moments suffisamment importants pour renverser l'outil. Cependant, cette exigence manque de spécifications (très abstraite), on ne sait pas à quelle phase d'utilisation elle est associée ni quels concepts de la liaison sont impliqués. La concrétisation d'une exigence de sécurité fait l'objet des analyses des risques effectuées au cours de la conception et est relative aux choix effectués.

3.2. Analyse des risques liés aux choix des principes de solution

Cette analyse consiste à définir la transition de la phase P_2 au contexte C_2 (Figure 5.19). Cette transition est guidée par l'étude de la compatibilité des caractéristiques de l'homme avec les paramètres de la conception (Principe 3 du modèle).

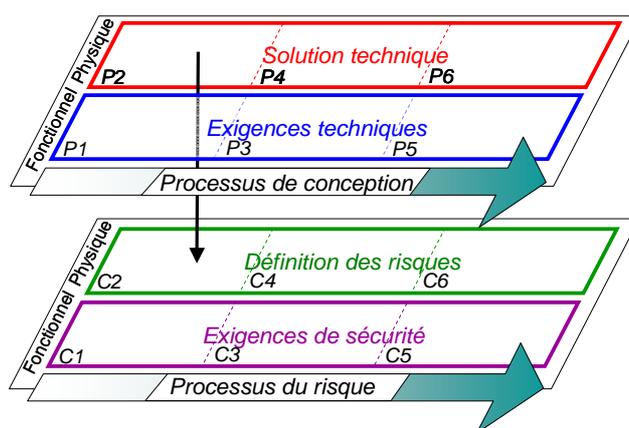


Figure 5.19 : Processus d'analyse des risques à l'étape de la conception conceptuelle

Nous allons limiter l'analyse des risques aux principes de solutions relatifs à la sous-phase d'attelage de l'outil. A l'étape de la conception conceptuelle, on s'intéresse à étudier l'énergie utilisée dans les principes de solutions retenues. Cette énergie est relative aux

grandeurs physiques exprimant l'effet physique à la base de la solution. Généralement, la première exigence de sécurité la plus globale est issue du retour d'expérience et est relative au contexte d'utilisation. Cependant, dans ce paragraphe, nous allons montrer comment on aurait pu analyser les risques relatifs à la conception d'un nouveau produit. Pour ce faire, nous allons partir de la décomposition fonctionnelle et des choix physiques exposés dans la matrice précédente.

i. Principe de solution 1 « système d'accrochage en trois points » de l'exigence « FR₀ : Porter l'outil par le tracteur » :

On cherche à attacher l'outil aux trois points (K, L, M). On suppose que ces points K, L et M admettent les coordonnées suivantes dans le repère <R> :

$$K = \begin{bmatrix} x_K \\ y_K \\ z_K \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix} \quad M = \begin{bmatrix} x_M \\ y_M \\ z_M \end{bmatrix}$$

Lors de l'analyse des risques, nous cherchons à écrire les équations physiques régissant le principe de solution choisi. Ceci va permettre de localiser le risque par rapport d'une part, à l'exigence fonctionnelle concernée et d'autre part, à la grandeur physique du principe de solution concerné. Ainsi, ce principe de solution propose de conserver l'équilibre de l'ensemble « tracteur-liaison-outil » à travers l'accrochage en trois points. Les équations physiques de ce principe correspondent au Principe Fondamental de la Statique (PFS). Ainsi, le torseur des efforts en chacun des points s'écrit :

$$\{\tau_K\}_{/R} = \begin{Bmatrix} \vec{F}_K \\ \vec{M}_K \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X_K & 0 \\ Y_K & 0 \\ Z_K & 0 \end{Bmatrix} ; \quad \{\tau_L\}_{/R} = \begin{Bmatrix} \vec{F}_L \\ \vec{M}_L \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X_L & 0 \\ Y_L & 0 \\ Z_L & 0 \end{Bmatrix} ;$$

$$\{\tau_M\}_{/R} = \begin{Bmatrix} \vec{F}_M \\ \vec{M}_M \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X_M & 0 \\ Y_M & 0 \\ Z_M & 0 \end{Bmatrix} ; \quad \{\tau_G\}_{/R} = \begin{Bmatrix} \vec{F}_G \\ \vec{M}_G \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -P_{zG} & 0 \end{Bmatrix}.$$

Ces torseurs font apparaître l'élément à l'origine de l'énergie emmagasinée dans l'ensemble liaison-outil; il s'agit de l'énergie potentielle de l'outil : $E_p = mgh$, h étant la position du centre de gravité de l'outil par rapport au sol, m sa masse. Afin de donner un ordre de grandeur de cette énergie, notons que la masse moyenne d'un outil est de 6T d'où,

$$P_{zG} = mg \approx 60KN.$$

Cette énergie est relative à l'outil qui est un élément du milieu d'utilisation, ainsi il est impossible de l'éliminer. Elle va alors générer une exigence de sécurité. Cette exigence doit être satisfaite par la solution retenue. Ainsi, l'objectif dans la suite de la conception est de compenser cette énergie et faire en sorte qu'elle ne se dissipe pas d'une manière non maîtrisée. En effet, cette énergie est dissipée quand la machine perd sa stabilité. Dans ce cas d'emploi, nous ne proposons pas de solutions aux problèmes de sécurité rencontrés, nous allons juste nous limiter à montrer comment peuvent être détectés les problèmes de sécurité au plus tôt lors de la conception avec la décomposition fonctionnelle de la solution existante et exprimer les exigences de sécurité qui en découlent.

Dans le cas d'analyse des risques, il n'est pas difficile de situer ce dernier, par rapport aux contextes proposés du risque, étant donné qu'il est le résultat de l'étape considérée du processus de conception. Il s'agit d'une énergie mécanique qui peut engendrer l'écrasement ou le coincement de l'utilisateur (suivant la norme (ISO, 2007)). Ce risque peut apparaître lorsqu'il y a perte d'équilibre de la machine lors de son accrochage. Si la machine perd son équilibre ceci implique que son centre de gravité bouge. La machine change de repère ce qui veut dire qu'elle n'est pas statique lors de son accrochage. Ainsi, pour que cette énergie potentielle ne se dissipe pas, il convient d'accrocher la machine au tracteur sans aucun mouvement de cette dernière. D'où, les points d'accrochage du système doivent pouvoir venir coïncider avec ceux de la machine. Le modèle du risque issu de l'équilibre de l'ensemble « Liaison- Outil » s'exprime par la relation suivante :

$$\boxed{Risque = f(\Delta\theta, \Delta\varphi, \Delta\psi, \Delta x, \Delta y, \Delta z)}$$

Avec $(\Delta\theta, \Delta\varphi, \Delta\psi, \Delta x, \Delta y, \Delta z)$ décrivent les écarts de position entre les points d'accrochage de la liaison et ceux de l'outil. Ainsi, l'exigence de sécurité SR_1 s'écrit « *Minimiser l'instabilité de l'outil lors de son accrochage* » et s'exprime par une fonction de minimisation du type :

$$(P) \left\{ \begin{array}{l} MinF(v) = Min \sum_{i=1}^6 p_i v_i \\ v_i = \Delta\theta/\theta_{max} ; \Delta\varphi/\varphi_{max} ; \Delta\psi/\psi_{max} ; \Delta x/x_{max} ; \Delta y/y_{max} ; \Delta z/z_{max} ; \\ \theta; \varphi; \psi \in [0; \pm \pi/2] \\ x; y; z \in [0; 100mm] \\ \sum_{i=1}^6 p_i = 1; \quad p_i > 0 \end{array} \right.$$

v_i : critères de minimisation exprimant la variation des écarts de position entre les points d'accrochage du système et ceux de l'outil;

p_i : niveau d'importance du critère v_i .

Ainsi, « $SR_{1,1}$: Minimiser l'instabilité de l'outil lors de son accrochage » revient à minimiser $(\Delta\theta, \Delta\varphi, \Delta\psi, \Delta x, \Delta y, \Delta z)$ ce qui revient à accrocher l'outil sans aucun déplacement de la part de ce dernier. Ceci va impliquer la conception d'un mécanisme de mise en position. La question que l'on peut se poser est la suivante : *pourquoi cette exigence relative à un même risque s'écrit-elle différemment en analyse du retour d'expérience?* La réponse est simple, à la différence du retour d'expérience où l'on cherche à se déconnecter de la solution et à se focaliser sur l'environnement du produit, lors de l'analyse des risques, nous cherchons à localiser notre exigence par rapport aux choix techniques effectués. Ainsi, dans ce principe de solution nous avons choisi d'accrocher notre outil au tracteur en trois points et nous avons choisi de l'accoupler manuellement.

En supposant qu'aucune alternative n'a été trouvée afin de minimiser l'instabilité de l'outil et ainsi réduire/éliminer les risques liés à son poids, ce critère (I_1 = instabilité de l'outil) doit être traduit sous forme d'une exigence de sécurité, dans le contexte (C3) à prendre en considération à l'étape suivante de la conception, étape de la conception architecturale. La génération de l'exigence de sécurité correspond au passage du contexte C2 au contexte C3 (Figure 5.20).

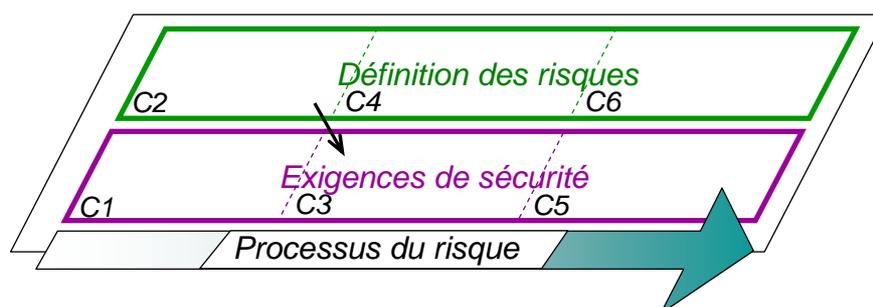


Figure 5.20 : Processus de génération d'une exigence de sécurité issue de la conception conceptuelle

Dans le cas échéant, nous avons connaissance du fait que l'outil peut perdre de stabilité. Nous proposons l'expression suivante de l'exigence (Figure 5.21) :

$SR_{2,1}$: Minimiser l'entrée de l'utilisateur dans la zone d'accrochage;

Domaine Fonctionnel	Domaine Physique
	C2 : Risques d'accidents I ₁ = Instabilité de l'outil
C3 : Exigences de sécurité du système SR _{2,1} : Minimiser l'entrée de l'utilisateur dans la zone d'accrochage	

Figure 5.21 : Génération d'une exigence de sécurité à partir du risque de la conception conceptuelle

ii. **Principe de solution 2 : « 3 barres de liaison (K-O1, L-E1, M-N1) » de l'exigence « FR₁ : Lier l'outil au tracteur » :**

Ce choix de la solution technique (3 points d'accrochage) nécessite le positionnement des points d'accrochage de la machine (O₂, E₂, N₂) par rapport à ceux du tracteur (K₁, L₁, M₁), l'outil est supposé dans une situation statique et posé au sol. Ainsi, afin que l'utilisateur puisse mettre en position les 3 points (O₁, N₁, E₁) du bout des 3 barres par rapport (O₂, N₂, E₂), il est nécessaire de pouvoir les positionner suivant les 3 directions (X, Y, Z). Dans ce cas, « SR₁ : Minimiser l'instabilité de l'outil lors de son accrochage » va se décomposer suivant ce choix technologique (3 barres) en trois sous-exigences de sécurité s'écrivant :

SR_{1,1} : Minimiser les écarts entre O₁ et O₂ suivant X, Y et Z sans affecter E₂ et N₂ ;

SR_{1,2} : Minimiser les écarts entre E₁ et E₂ suivant X, Y et Z sans affecter O₂ et N₂ ;

SR_{1,3} : Minimiser les écarts entre N₁ et N₂ suivant X, Y et Z sans affecter O₂ et E₂.

Ce principe de solution génère une première tâche possible de l'utilisateur qui consiste à *lier manuellement le tracteur à la machine par des barres*.

Si l'on suppose, que la barre est sollicitée en traction ou en compression, les efforts internes calculés, lors du dimensionnement des barres, suivant le Principe Fondamental de la Statique (PFS) à partir de l'action extérieure agissant sur la barre considérée s'écrivent

$N = F$. L'effort normal N est donc égal à l'effort appliqué F.

D'autre part on a: $\sigma = \frac{N}{S}$; avec σ est la *contrainte* dans le matériau et N dépend du

couple (matériau, poids). D'où, $N = \sigma \times S$ et par suite la barre sera dimensionnée, en étape de conception architecturale, en fonction de l'effort N qu'elle doit supporter et qui s'écrit comme $N=f(m)$; m étant la masse de l'outil.

Ici, nous considérons que l'accrochage des barres s'effectue grâce à l'utilisateur. Ainsi, le poids de chaque barre ne doit pas dépasser le poids maximal (P_m) que l'humain est susceptible de soulever (275 N). Le risque s'écrit alors comme :

$$\boxed{\text{Risque} = f(m_i)} ; m_i \text{ masse de chaque barre.}$$

D'où, la masse de la barre (m_i) doit respecter la relation suivante :

$$P = m_i g < P_m \rightarrow m_i < \frac{P_m}{g} \rightarrow \rho V < \frac{P_m}{g} \rightarrow S < \frac{P_m}{g \rho L}$$

D'où, la relation entre N et P_m :
$$\boxed{N < \sigma \frac{P_m}{g \rho L}}$$

Il se peut qu'il existe un conflit entre la tenue mécanique qui nécessite
$$\boxed{N > \sigma \frac{P_m}{g \rho L}}$$
 et

la sécurité qui exige que
$$\boxed{N < \sigma \frac{P_m}{g \rho L}} \quad (*)$$
. Dans ce cas, il faut se référer aux outils de résolution des contradictions de TRIZ qui fait l'objet du cas de synthèse de solution. Ainsi, dans les étapes qui suivent, le choix du matériau et du poids (ainsi que les dimensions) des barres doit respecter la relation (*).

En effet, ce risque exprime la difficulté potentielle de soulever la barre. Par suite, il se situe dans le contexte C_4 « Risque ergonomique » et doit se traduire dans C_3 « Exigence de sécurité du système » par une exigence de sécurité liée à l'humain que nous pouvons exprimer par « $SR_{2,2}$: *Minimiser le poids des barres lors de l'attelage* » qui s'exprime mathématiquement par :

$$(L) \left\{ \begin{array}{l} \text{Min}E(N, \sigma) = \text{Min}(N - \sigma \frac{P_m}{g \rho L}) \\ N, \sigma, P_m, L, \rho > 0 \\ E < 0 \end{array} \right.$$

Génération des exigences de sécurité du contexte 3 à partir des risques du contexte 2:

En complément, si aucune alternative n'a été trouvée afin de satisfaire $SR_{1,1}$, $SR_{1,2}$ et $SR_{1,3}$, celles-ci doivent être traduites sous forme d'exigences de sécurité, dans le contexte (C3) à prendre en considération à l'étape de la conception architecturale. Dans le cas échéant,

on sait qu'il existe un moment où l'outil peut perdre sa stabilité. Nous proposons alors les expressions suivantes des exigences (Figure 5.22) :

SR_{2,3}: Minimiser l'entrée de l'utilisateur dans la zone d'attelage lors de la mise en position et l'accrochage de O₁ ;

SR_{2,4}: Minimiser l'entrée de l'utilisateur dans la zone d'attelage lors de la mise en position et l'accrochage de E₁ ;

SR_{2,5}: Minimiser l'entrée de l'utilisateur dans la zone d'attelage lors de la mise en position et l'accrochage de N₁.

Domaine Fonctionnel	Domaine Physique
	<p><u>C2 : Risques d'accidents</u> I₁=Instabilité de l'outil ; I₂=Poids de la barre ; I₃=Instabilité de l'outil lors de l'accrochage de O₁ ; I₄=Instabilité de l'outil lors de l'accrochage de E₁ ; I₅=Instabilité de l'outil lors de l'accrochage de N₁.</p>
<p><u>C3 : Exigences de sécurité du système</u> <i>SR_{2,1}</i> : Minimiser l'entrée de l'utilisateur dans la zone d'accrochage ; <i>SR_{2,2}</i> : Minimiser le poids des barres lors de l'attelage ; <i>SR_{2,3}</i> : Minimiser l'entrée de l'utilisateur dans la zone d'attelage lors de l'accrochage de O₁ ; <i>SR_{2,4}</i> : Minimiser l'entrée de l'utilisateur dans la zone d'attelage lors de l'accrochage de E₁ ; <i>SR_{2,5}</i> : Minimiser l'entrée de l'utilisateur dans la zone d'attelage lors de l'accrochage de N₁.</p>	

Figure 5.22 : Génération d'une exigence de sécurité à partir du risque

3.3. Analyse des risques liés à l'agencement structural choisi

L'analyse des risques de la conception architecturale s'effectue comme l'indique la figure 5.23.

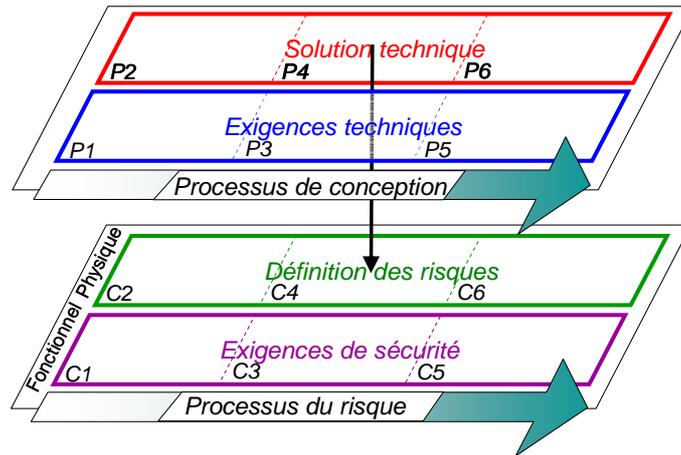


Figure 5.23 : Processus d’analyse des risques à l’étape de la conception architecturale

Pour l’analyse de la conception architecturale, nous partons de l’architecture de la solution trois points et de ses paramètres structurants. Tenant compte de la variabilité des mesures des tracteurs et par suite ceux de la liaison selon les constructeurs, nous avons préféré prendre les mesures d’un tracteur spécifique. Il s’agit d’un tracteur de la marque Massey Ferguson qui est à la disposition de l’Unité TSAN (Figure 5.24).



Figure 5.24 : Vue arrière du tracteur considéré

A cette étape de la conception, nous avons la décomposition fonctionnelle de la Figure 5.25. Ici, nous ne montrons que les exigences concernant l’utilisateur et relatives à la sous-phase d’attelage de l’outil.

0	FR Porter l'outil par le tracteur	DP	Système trois points
1	FR Permettre à l'utilisateur d'accrocher O1 par rapport à O2	DP	Rotule+Broche
2	FR Permettre à l'utilisateur d'accrocher E1 par rapport à E2	DP	Rotule+Broche
3	FR Permettre à l'utilisateur d'accrocher N1 par rapport à N2	DP	Rotule+Broche

Figure 5.25 : Arbre fonctionnel et physique de la conception architecturale

Dans cette décomposition, nous allons analyser une seule FR, les autres s'effectuant de la même manière. La structure de la liaison trois points à l'étape de la conception architecturale est la suivante (Figure 5.26 et Figure 5.27) :

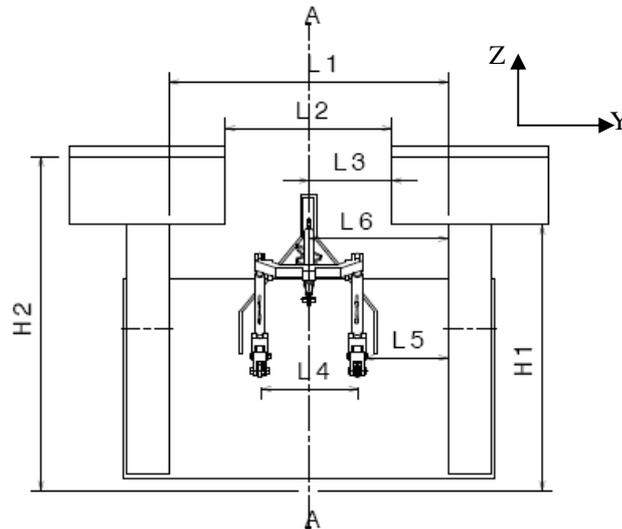


Figure 5.26 : Structure de la liaison trois points et paramètres structurants (Vue de face)

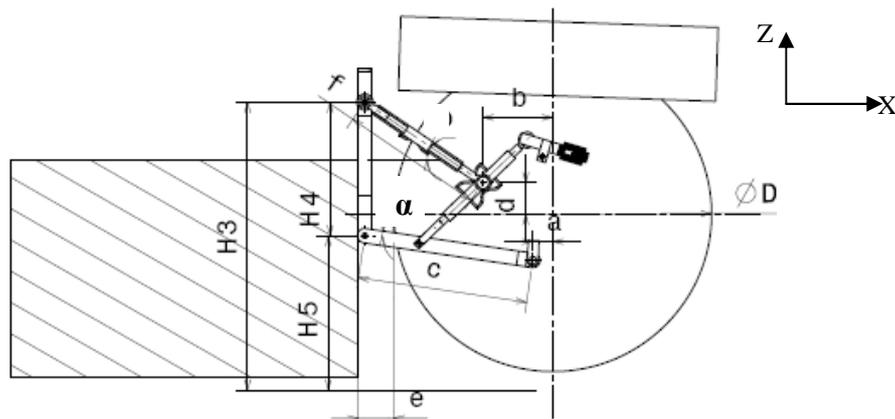


Figure 5.27 : Structure de la liaison trois points et paramètres structurants (Vue de côté)

Ainsi, les paramètres structurants de cette liaison et relatifs à l'exigence « FR_3 : Permettre à l'utilisateur d'accrocher N_1 par rapport à N_2 » sont les suivants :

- L_1 : Distance entre les roues ;
- L_2 : Distance entre les gardes boues du tracteur ;
- L_3 : Distance entre le point supérieur et la garde boue ;
- L_4 : Distance entre les points inférieurs ;
- L_5 : Distance entre le point inférieur et la roue ;

$$\Rightarrow L_5 = \frac{L_1 - L_4}{2} ;$$

L₆: Distance entre le point supérieur et la roue ;

a: Distance des points d'appui inférieurs à l'axe vertical des roues arrières du tracteur ;

b: Distance du point d'appui supérieur à l'axe Z passant par le centre de la roue du tracteur ;

c: Longueur des barres inférieures de traction ;

d: Distance du point d'appui supérieur et l'axe des X passant par le centre de la roue du tracteur ;

f: Longueur de la barre supérieure ;

α: Angle entre l'axe de la barre inférieure et l'axe X ;

β: Angle entre l'axe de la barre supérieure et l'axe X;

D: Diamètre de la roue ;

e: Ecart entre la roue et l'outil

$$\Leftrightarrow e = a + c \cos(\alpha) - \frac{D}{2};$$

H₁: Hauteur minimale des gardes boues ;

H₂: Hauteur maximale des gardes boues ;

H₃: Hauteur du point supérieur

$$\Leftrightarrow H_3 = \frac{D}{2} + d + f \tan \beta;$$

H₄: Distance entre le point supérieur et les points inférieurs ;

H₅: Hauteur du point inférieur par rapport au sol ;

$$\Leftrightarrow H_5 = H_3 - H_4;$$

P : Poids de la barre.

Ces paramètres de conception, issus de l'agencement structurel choisi, impliquent certaines caractéristiques de l'homme comme le représente la Figure 5.28. Cette représentation n'a pas un caractère exhaustif.

La Figure 5.29 montre la position et la posture de l'utilisateur lors de l'accrochage du troisième point.

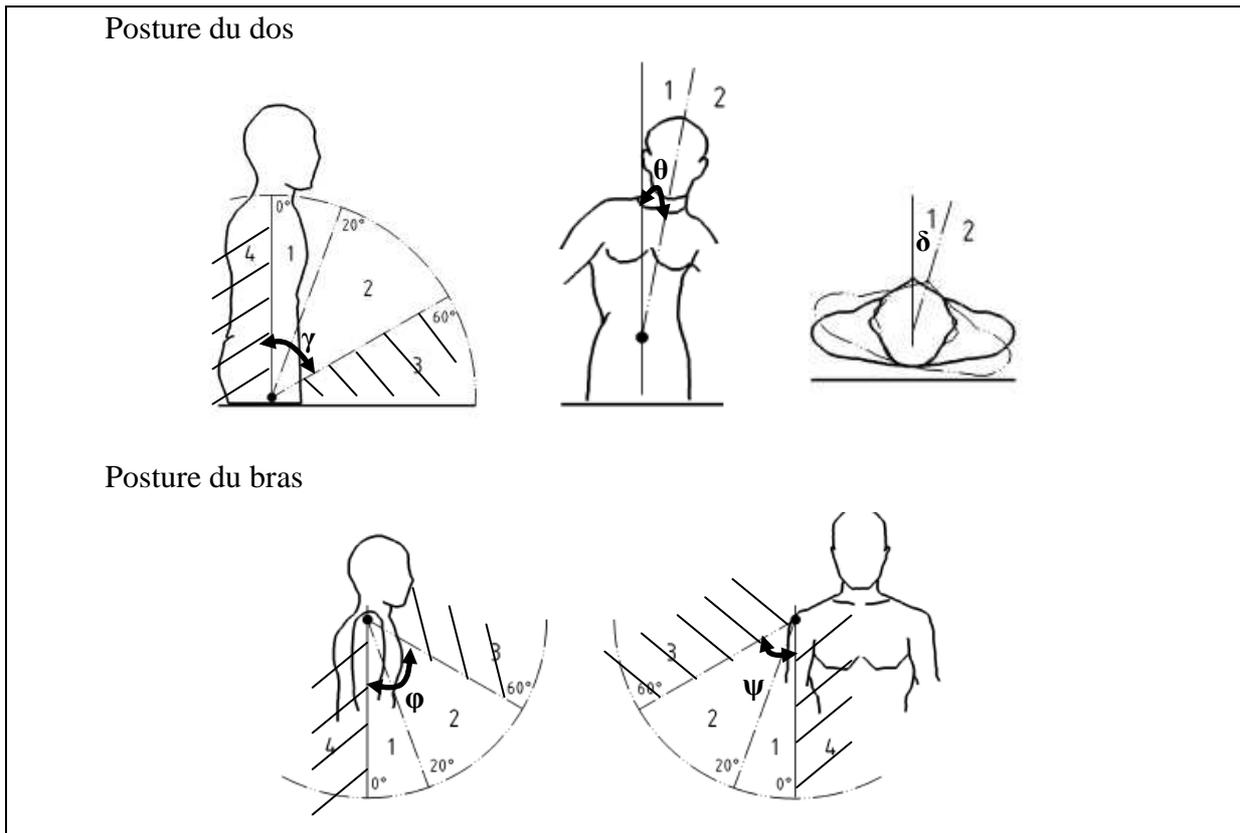


Figure 5.28 : Caractéristiques affectées de l'homme

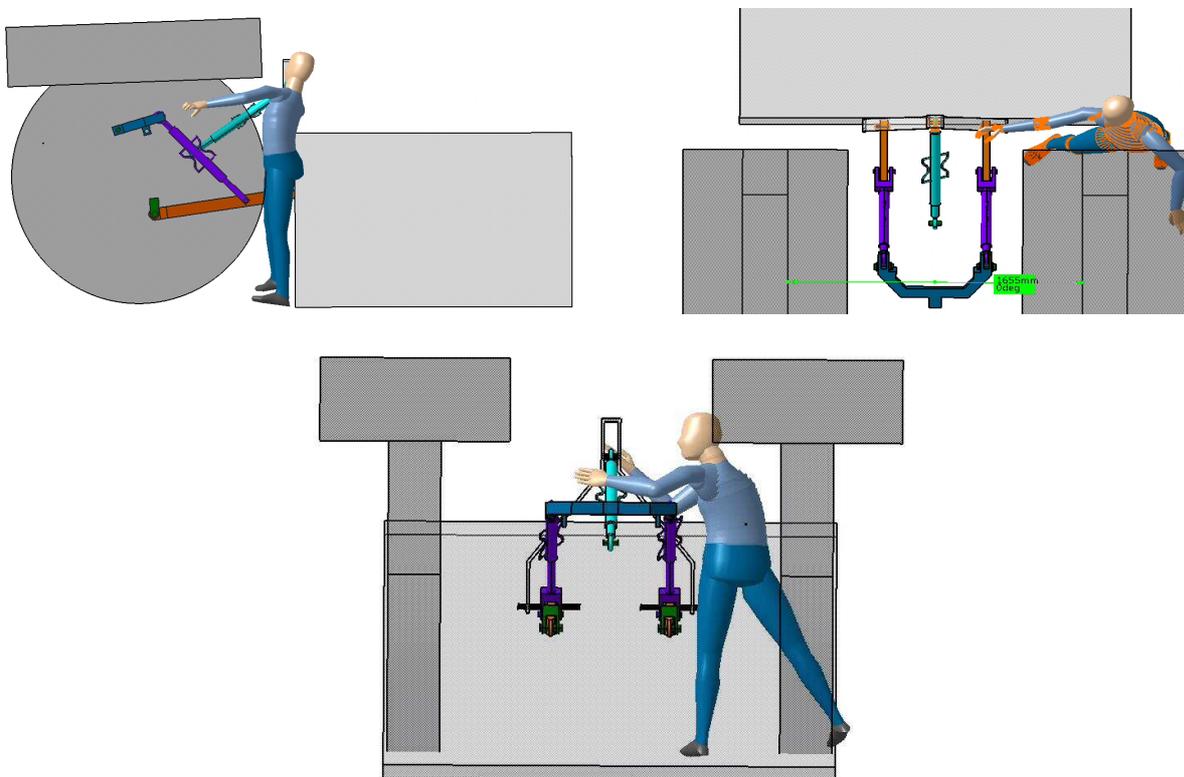


Figure 5.29 : Position de l'homme par rapport à la liaison trois points lors de l'accrochage du point supérieur

La correspondance entre les paramètres de conception et les caractéristiques de l'homme est montrée dans le Figure 5.30.

Paramètres structurants	Caractéristiques de l'homme affectées	Typologie de la caractéristique affectée
H₁	H : hauteur du corps	Anthropométrie
	ε : Flexion du cou $-40^\circ \leq \varepsilon \leq 0^\circ$	Pénibilité
	g : Flexion des genoux	Pénibilité
L₆-L₃; H₃	γ : Flexion du dos $0^\circ \leq \gamma \leq 60^\circ$	Pénibilité
	H : hauteur du corps	Anthropométrie
L₄; H₃	φ : Angle avant entre le haut du bras et le corps $0^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$	Pénibilité
	L : Longueur du bras	Anthropométrie
L₅	δ : Torsion du tronc $0^\circ \leq \delta \leq 60^\circ$	Pénibilité
	E : Epaisseur du corps	Anthropométrie
c	ψ : Angle de côté entre le haut du bras et le corps $0^\circ \leq \psi \leq 60^\circ$	Pénibilité
	L : Largeur du corps	Anthropométrie
e	E : Epaisseur du corps	Anthropométrie
	L : Largeur du corps	Anthropométrie
P	F : Effort maximal acceptable	Pénibilité

Figure 5.30 : Correspondance entre paramètres structurants et caractéristiques nécessaires de l'homme

Ici, pour chaque paramètre structurant nous avons considéré une seule caractéristique de l'homme. Généralement, pour une activité donnée de l'homme et par suite pour un seul paramètre structurant, plusieurs (n) des caractéristiques (c_i) de l'homme peuvent être impliquées. Dans ce cas, il est utile d'affecter des ordres de priorités (w_i) pour chaque (c_i). Ainsi, le choix de la meilleure alternative est celle qui satisfait l'équation :

$$\begin{cases} \text{Min} \sum_{i=1}^n w_i c_i \\ \sum_{i=1}^n w_i = 1 \end{cases}$$

Génération des exigences de sécurité du contexte 5 à partir des risques du contexte 4:

En supposant qu'aucune alternative n'ait été trouvée afin de respecter la compatibilité des paramètres de structuration avec les caractéristiques et les capacités humaines dans ce cas, ces critères doivent être traduits en exigences de sécurité à prendre en considération à l'étape suivante de la conception, étape de la conception détaillée (Figure 5.31).

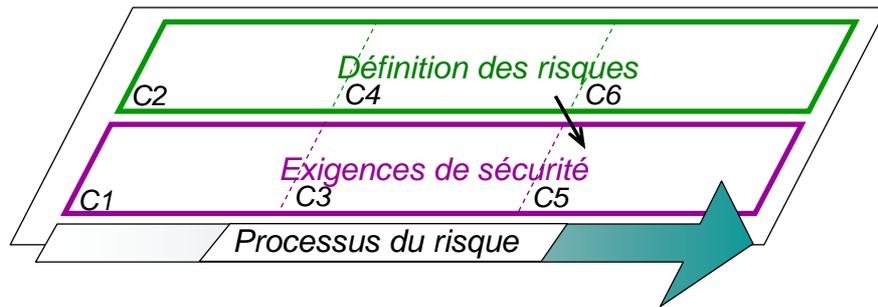


Figure 5.31 : Processus de génération d’une exigence de sécurité issue de la conception architecturale

L'exigence élaborée doit être exprimée sous forme d'une fonction d'optimisation mettant en relation deux éléments (internes ou externes à la solution). Nous proposons l'expression suivante des exigences (Figure 5.32):

Domaine Fonctionnel	Domaine Physique
	<p><u>C4 : Risques d’ergonomie</u> $H_1 < H$ $\gamma = f(L_6 - L_3; H_3) > \gamma_{max}$ $\phi = f(L_4; H_3) > \phi_{max}$ $\delta = f(L_5) > \delta_{max}$ $\psi = f(c) > \psi_{max}$ $e < E$ $F > F_{max}$</p>
<p><u>C5 : Exigences des sous-systèmes</u> <i>SR_{3,1}</i>: Maximiser la hauteur H_1 de la zone d’attelage ; <i>SR_{3,2}</i>: Minimiser $\frac{L_6 - L_3}{H_3}$; <i>SR_{3,3}</i>: Minimiser $L_4 + H_3$ <i>SR_{3,4}</i>: Maximiser L_5 <i>SR_{3,5}</i>: Maximiser c <i>SR_{3,6}</i>: Maximiser e <i>SR_{3,7}</i>: Minimiser P le poids de la barre</p>	

Figure 5.32 : Expression des exigences de sécurité de la liaison 3 points à partir de l’analyse des risques des choix technologiques issus de la conception architecturale

3.4. Conclusion sur l'analyse des risques de la liaison trois points

Cette analyse des risques permet de faire ressortir l'élément à l'origine de l'énergie dans l'ensemble (Tracteur – Liaison – Outil) lors de l'attelage. En effet, les risques sont principalement dus à l'énergie potentielle relative au poids de l'outil. Le facteur principal permettant à cette énergie de se dégager réside dans l'instabilité de l'outil qui provient du fait que la liaison ne permet pas de mettre en position les trois points d'accrochage suivant les trois axes (X, Y, Z) sans le déplacement de l'outil. Ce manque de fonctionnalité pousse l'utilisateur à effectuer des opérations imprévisibles telles que : monter sur les bras, essayer de soulever un peu l'outil, créant ainsi des moments pouvant entraîner le renversement de l'outil.

Ainsi, si l'on reprend l'analyse de la conception, de la liaison trois points, en y intégrant les exigences de sécurité générées lors de l'analyse des risques à l'étape de la conception conceptuelle, nous aurons les arbres fonctionnel et physique suivants (Figure 5.33):

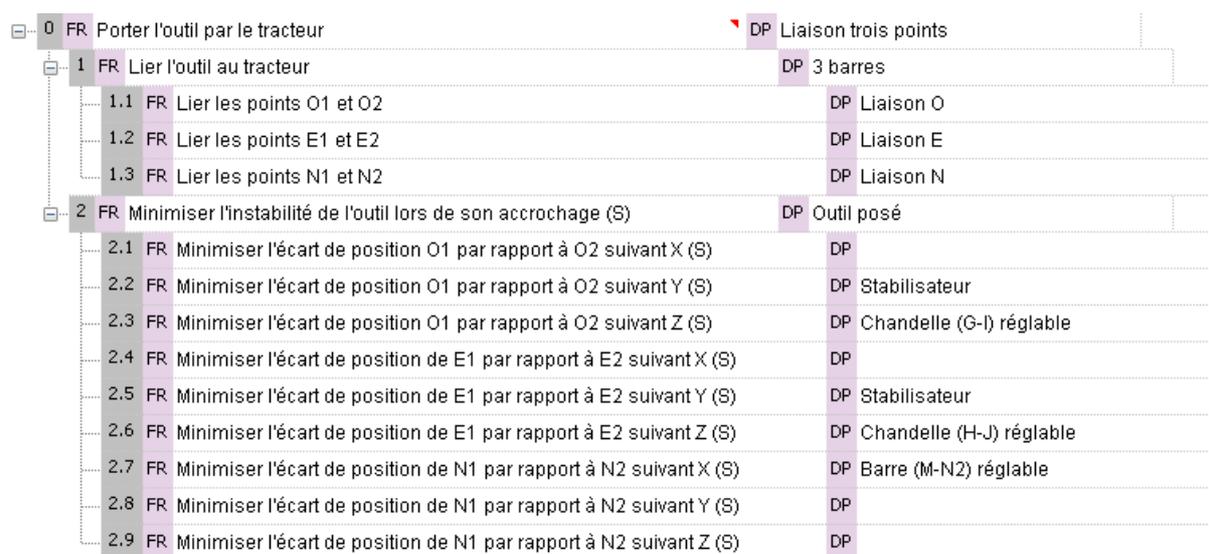


Figure 5.33 : Arbre fonctionnel et physique de la liaison trois points intégrant les exigences de sécurité

Ici, chaque exigence de sécurité nous l'avons décomposée, pour le besoin de mise en position, suivant les trois axes (X, Y, Z). La matrice de conception relative à cette décomposition est la suivante (Figure 5.34) :

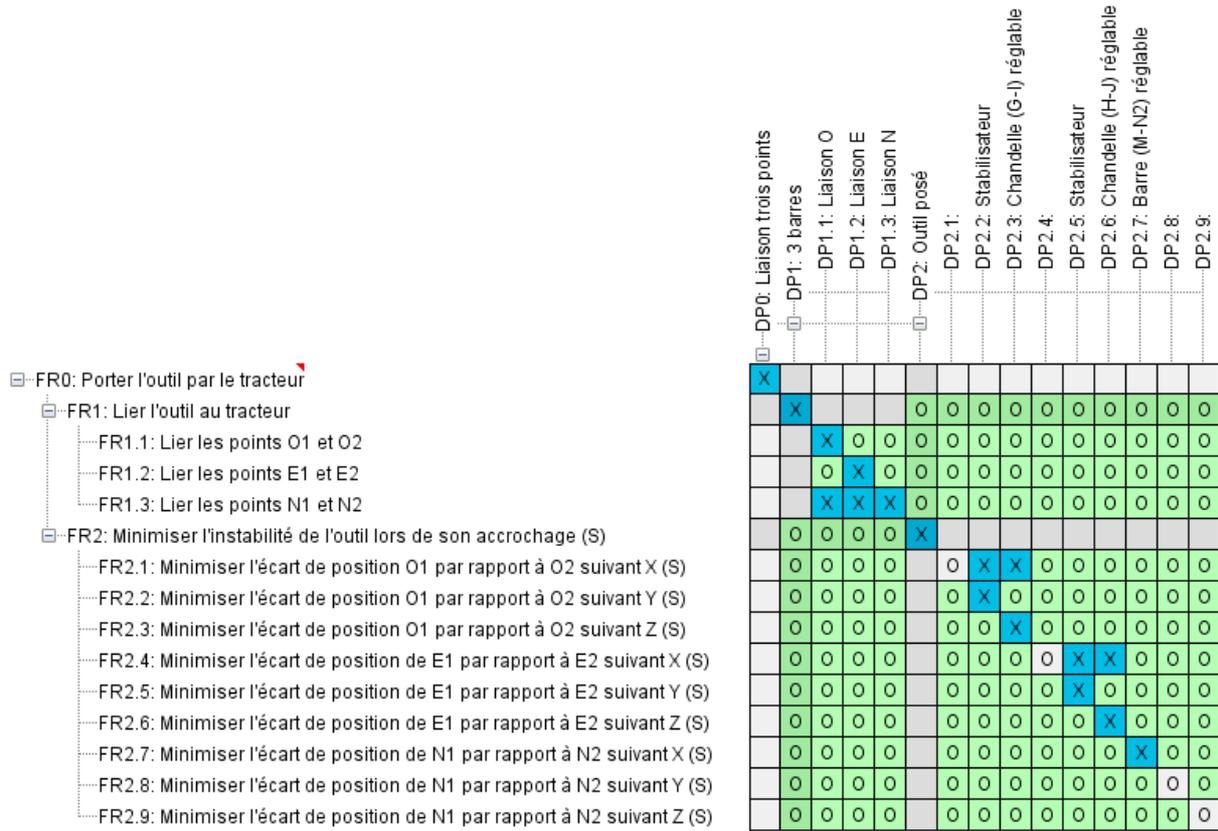


Figure 5.34 : Matrice de conception de la liaison trois points tout besoin confondu

Dans cette matrice, les croix dans le triangle inférieur proviennent principalement du séquençement dans la satisfaction des différentes exigences. Les croix dans le triangle supérieur reflètent le manque de DPs.

D'une part, pour l'exigence de sécurité FR₂, nous avons 9 FRs pour 5 DPs. Il s'agit donc d'une conception couplée. Cependant, le logiciel Acclaro® de la société « Axiomatic Design Solutions Incorporation » ne montre pas les couplages (pas de case en rouge) tant que le nombre de FRs est différent de celui des DPs. Les couplages sont alors relatifs au manque de DPs. En effet, si nous regardons la nature des exigences qui n'admettent pas de DPs, il s'agit principalement du besoin de mise en position (correspondant à la minimisation des écarts de position) des points d'accrochage par rapport à l'outil. En fait, la liaison trois points ne différencie pas le besoin de mise en position des points (O₁, E₁ et N₁) avant l'accrochage de l'outil du besoin de réglage de la position de l'outil auquel est associé le repère (R_M (O_M, X_M, Y_M, Z_M)). En effet, le besoin de mise en position n'est pas directement issu du besoin de l'utilisateur. Il est le résultat des choix technologiques, en l'occurrence le choix d'accrocher en trois points et de l'exigence de sécurité, relative au retour d'expérience, qui exige de prévenir des risques de renversements de l'outil. Ceci justifie le manque de prise en compte

de ces exigences dans la liaison trois points originelle. Si cette liaison répond aujourd’hui à la majorité des exigences de mise en position, c’est parce que certaines sont satisfaites par voie de conséquence des choix technologiques effectués (du fait des besoins de réglage), d’autres à travers l’adaptation de la solution existante du fait du retour d’expérience.

4. Cas d'emploi 3: Synthèse de solutions

4.1. Synthèse en conception conceptuelle pour la sous-phase d’attelage de l’outil

Comme expliqué auparavant, la synthèse de solution s’effectue à partir des exigences techniques et des exigences de sécurité. A ce niveau de la conception, les exigences techniques proviennent de l’Analyse Fonctionnelle du Besoin. Les exigences de sécurité appartenant au contexte C_1 sont issues du retour d’expérience. Ces exigences sont intégrées dans l’arbre fonctionnel de la conception.

En sous-phase d’attelage, l’exigence technique qui correspond à la fonction principale du produit s’exprime par : « Lier l’outil au tracteur ». A cette exigence s’ajoute l’exigence de sécurité extraite du retour d’expérience et qui s’écrit comme suit:

SR_{L1} : *Prévenir des risques de renversement de l’outil lors de son accrochage.*

Cette exigence est intégrée à l’arbre fonctionnel comme suit (Figure 5.35) :



Figure 5.35 : Intégration de l’exigence de sécurité dans l’arbre fonctionnel lors de la synthèse de solution

Afin de porter l’outil par le tracteur, deux principes de solutions (notées ALT) sont possibles. Le premier consiste en un accrochage par des points indépendants (ALT1). Le deuxième consiste en un accrochage sur une interface rigide (ALT2). Dans ce dernier cas, il s’agit de points d’accrochage dépendants. Pour le besoin d’accrochage rigide, ALT1 doit être basé au moins sur trois points. L’interface peut être orientée verticalement, horizontalement ou obliquement. Nous allons en l’occurrence considérer qu’il s’agit de trois points d’accrochage et d’une interface verticale. Ces deux principes possèdent les mêmes équations physiques, et ainsi, admettent les mêmes risques potentiels (cf. paragraphe 3.2 partie i). Dans ce paragraphe, nous allons développer ces deux alternatives et montrer les résultats de chacune en termes de sécurité et de conception. Ainsi, la décomposition de l’exigence de

sécurité relative à l'accrochage en trois points s'effectue comme exposé dans le paragraphe 3. Cependant, l'exigence de sécurité principale FR_2 va se décomposer, dans le cas de l'accrochage par une interface, en six sous-exigences, exigeant la mise en position de l'interface suivant les six mouvements possibles (du fait qu'il s'agit d'un plan et non plus d'un point).

4.1.1. ALT1 : Accrochage en 3 points indépendants

Ce principe de solution propose d'accrocher en un plan à travers des points indépendants (nous considérons qu'il s'agit de 3 points). De ce principe de solution va découler un premier sous-principe (noté ALT1) pour l'exigence « lier ». En considérant que l'accouplement s'effectue manuellement, ALT1 propose de lier l'outil au tracteur par **trois barres**. Afin qu'on puisse lier l'outil au tracteur tout en maintenant sa stabilité, il convient de lier ces trois barres sans bouger l'outil. Ainsi, il est nécessaire de pouvoir amener les 3 points (notés O_1, E_1, N_1) du bout des 3 barres dans une zone d'approche (Figure 5.36) suivant les 3 translations (X, Y et Z).

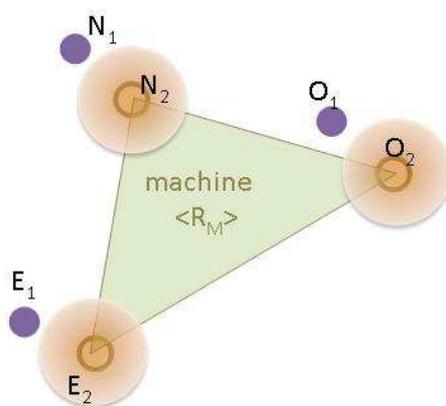


Figure 5.36 : Schématisation des zones d'approche entre les points d'accrochage du système (O_1, E_1, N_1) et ceux de l'outil (O_2, E_2, N_2)

Ce qui nous amène à la décomposition fonctionnelle suivante de l'exigence de sécurité (Figure 5.37):

0	FR Porter l'outil par le tracteur	DP Systèmes en trois points
1	FR Lier l'outil (O_2, E_2, N_2) au tracteur	DP 3 barres (K-O1, L-E1, M-N1)
1.1	FR Lier point O_2 à O_1	DP Liaison O
1.2	FR Lier point E_2 à E_1	DP Liaison E
1.3	FR Lier point N_2 à N_1	DP Liaison N
2	FR Prévenir des risques de renversement de l'outil lors de son accrochage (S)	DP Outil posé immobile
2.1	FR Minimiser les écarts entre O_1 et O_2 suivant X, Y et Z sans affecter E_2 et N_2 (S)	DP Réglage barre (K1-O1) indépendant
2.2	FR Minimiser les écarts entre E_1 et E_2 suivant X, Y et Z sans affecter O_2 et N_2 (S)	DP Réglage barre (L1-E1) indépendant
2.3	FR Minimiser les écarts entre N_1 et N_2 suivant X, Y et Z sans affecter O_2 et E_2 (S)	DP Réglage barre (M1-N1) indépendant

Figure 5.37 : Décomposition de l'exigence de sécurité en sous-exigences selon les choix physiques effectués

En effet, ce principe de solution (Figure 5.38) correspond à la liaison actuelle. Sauf, que nous considérons que les barres sont indépendantes l'une de l'autre et donc ne sont pas reliées par le relevage. Ainsi, l'utilisateur n'a qu'à mettre en position les 3 barres et les accoupler avec les points de l'outil. Pour ce faire, les trois barres sont variables en longueur (barres en rouge dans la Figure 5.38) et la machine est toujours posée, rien n'affectera sa stabilité pendant l'accrochage. Le seul effort demandé de l'utilisateur est de porter les barres l'une à la suite des autres. Ces barres sont normalement dimensionnées afin de supporter une masse équivalente à 10T. Ainsi, l'analyse du risque lié à ce concept va générer une exigence de sécurité, à l'étape de la conception architecturale, qui consiste à tenir compte du poids maximal (P_m) acceptable pour une telle structure. L'avantage de ce principe de solution est qu'il permet (1) de faciliter l'attelage (étant donné qu'il nécessite moins de précision) et (2) une procédure d'attelage avec plus d'espacement : d'abord, accrocher la barre inférieure du côté opposé de la porte de la cabine, ensuite la barre supérieure et enfin la deuxième barre inférieure.

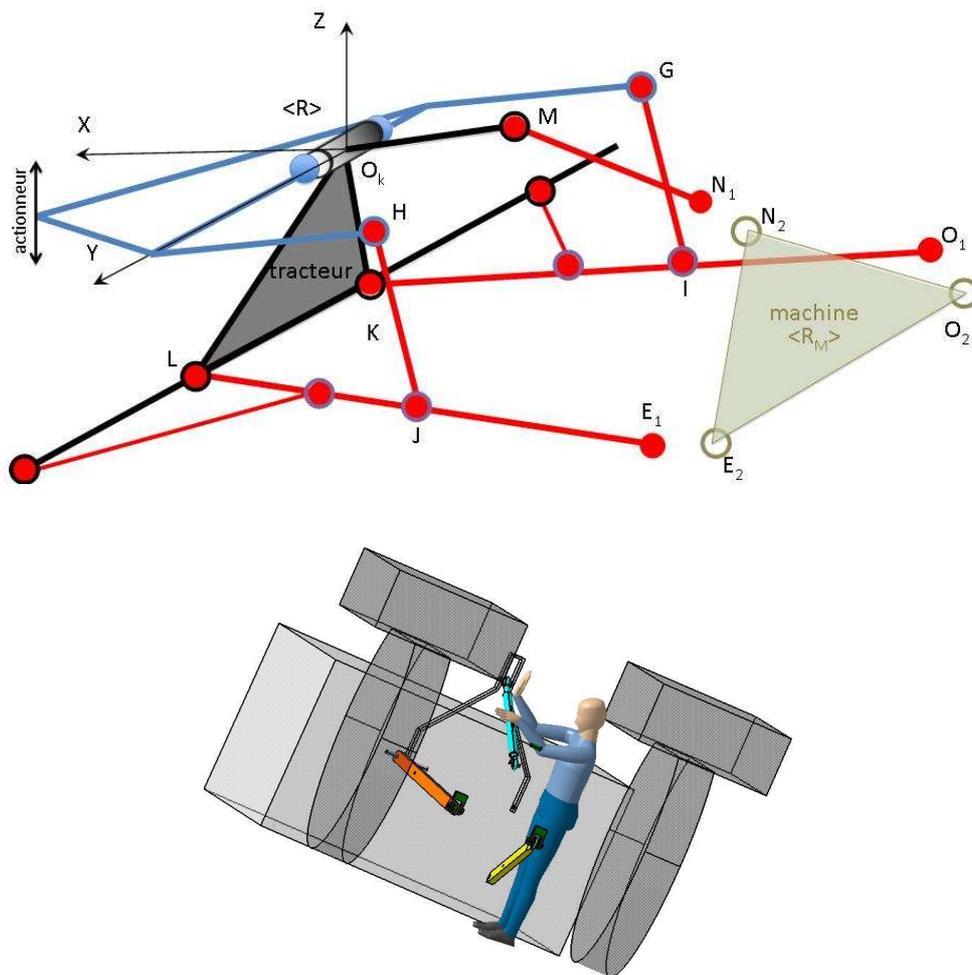


Figure 5.38 : Schématisation du principe de solution ALT1

La matrice de conception de ce principe de solution est la suivante (Figure 5.39) :

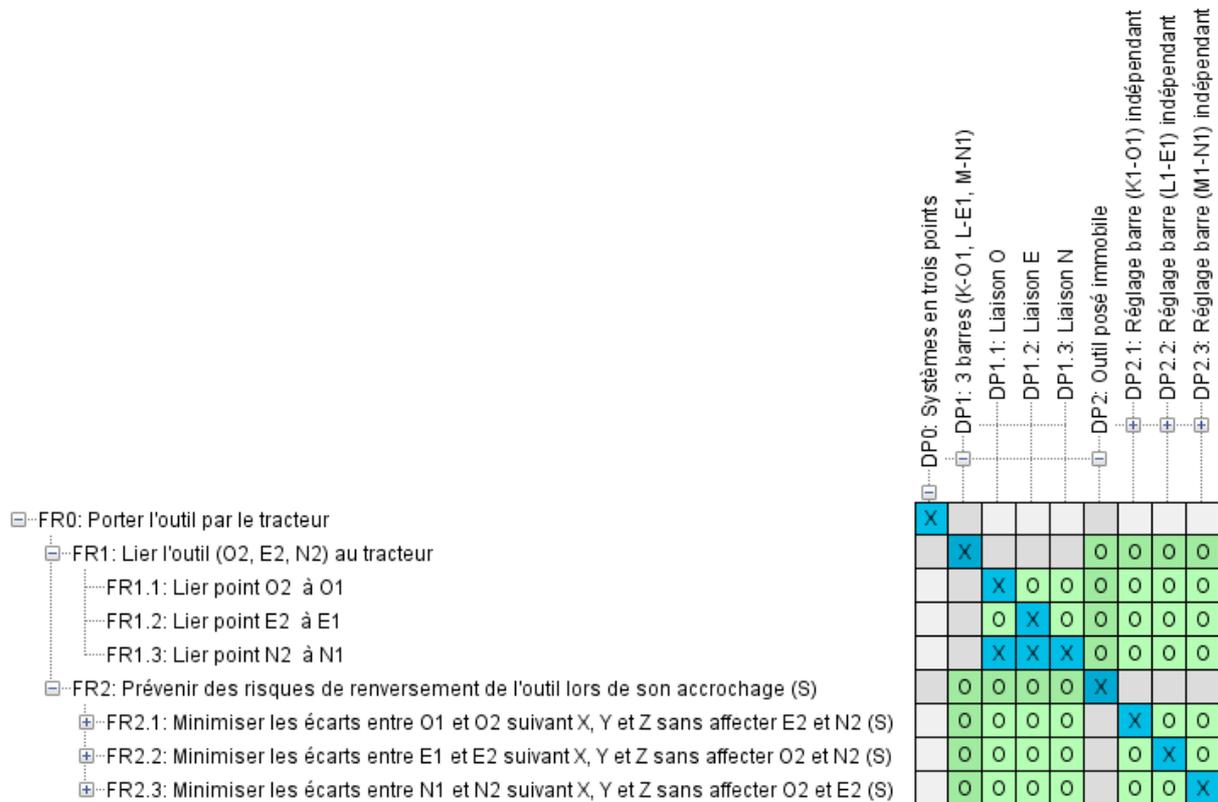


Figure 5.39 : Matrice de conception de ALT1

Cette matrice montre que les exigences de sécurité sont satisfaites. De plus, il s'agit d'une conception non couplée. Ainsi, la sécurité est intégrée à la conception conceptuelle du produit. Ici, l'exigence de sécurité a imposé des DP du fait qu'elle est relative à un élément du milieu d'utilisation. En d'autres termes, le risque est considéré comme existant et c'est au produit de le compenser. Les barres inférieures sont considérées réglables. Les chandelles n'existent plus et les deux barres inférieures sont indépendantes. Ensuite, il peut y exister un séquençement de l'opération d'accrochage provenant de la procédure que nous avons proposée ci-avant.

4.2.2. ALT2 : Accrochage en une interface rigide

Ce principe de solution propose d'accrocher en un plan à travers une interface d'accrochage plane qui peut être de forme triangulaire, courbée ou hexagonale. En l'occurrence, nous la considérons triangulaire. Si l'on considère que cette opération va s'effectuer manuellement, un premier principe de solution (noté ALT2') pour la fonction lier va découler de ALT2. ALT2' propose de lier l'outil au tracteur par trois barres à travers l'interface rigide. Ce principe de solution est rapidement rejeté car il suppose que l'opérateur

va soulever en même temps trois barres avec une interface et va devoir les régler. Ainsi, l'analyse du risque lié à ce concept va générer une exigence de sécurité qui consiste à tenir compte du poids maximal (Pm) acceptable pour une telle structure. Mais ce poids est dans tous les cas au moins trois fois supérieur à celui proposée par le concept ALT1.

ALT2* : Mise en position automatique de l'interface

Ainsi, de ALT2 découle un nouveau principe de solution (noté ALT2*) qui propose une mise en position automatique de l'interface. On peut imaginer de remplacer les 3 barres par trois vérins avec des rotules à petites amplitudes. Cependant afin de pouvoir lier l'outil au tracteur tout en maintenant la stabilité de l'outil, il convient de mettre cette interface en position par rapport à l'interface de l'outil, dans une zone d'approche, suivant les 6 degrés de mobilité (3 translations X, Y, Z et 3 rotations RX, RY, RZ).

Il s'agit donc de remplacer la structure en trois barres par une hexapode ; solution qui fait l'objet du brevet (US 6321851 B1: 2001) (Figure 5.40).

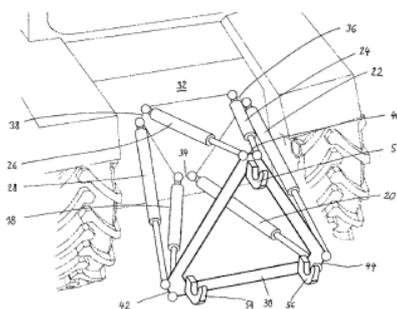


Figure 5.40 : Brevet US 6321851 B1 : 2001

L'hexapode répond à la décomposition fonctionnelle suivante (Figure 5.41) :

0	FR Porter l'outil par le tracteur	DP Système à interface rigide
1	FR Lier l'interface N1O1E1 par rapport à celle à l'outil N2O2E2	DP 2 Interfaces rigides complémentaires
1.1	FR Lier O1 à O2	DP Liaison en O
1.2	FR Lier E1 à E2	DP Liaison en E
1.3	FR Lier N1 à N2	DP Liaison en N
2	FR Prévenir des risques de renversement de l'outil lors de son accrochage (S)	DP Mécanisme 6 axes
2.1	FR Minimiser l'écart entre l'axe X' de l'interface avec l'axe XM de l'outil (S)	DP vérin hydraulique
2.2	FR Minimiser l'écart entre l'axe Y' de l'interface avec l'axe YM de l'outil (S)	DP vérin hydraulique
2.3	FR Minimiser l'écart entre l'axe Z' de l'interface avec l'axe ZM de l'outil (S)	DP vérin hydraulique
2.4	FR Minimiser l'écart entre l'interface avec celle de l'outil suivant RX (S)	DP vérin hydraulique
2.5	FR Minimiser l'écart entre l'interface avec celle de l'outil suivant RY (S)	DP vérin hydraulique
2.6	FR Minimiser l'écart entre l'interface avec celle de l'outil suivant RZ (S)	DP vérin hydraulique

Figure 5.41 : Décomposition de l'exigence de sécurité en sous-exigences selon les choix physiques effectués

La matrice de conception de l'hexapode est la suivante (Figure 5.42) :

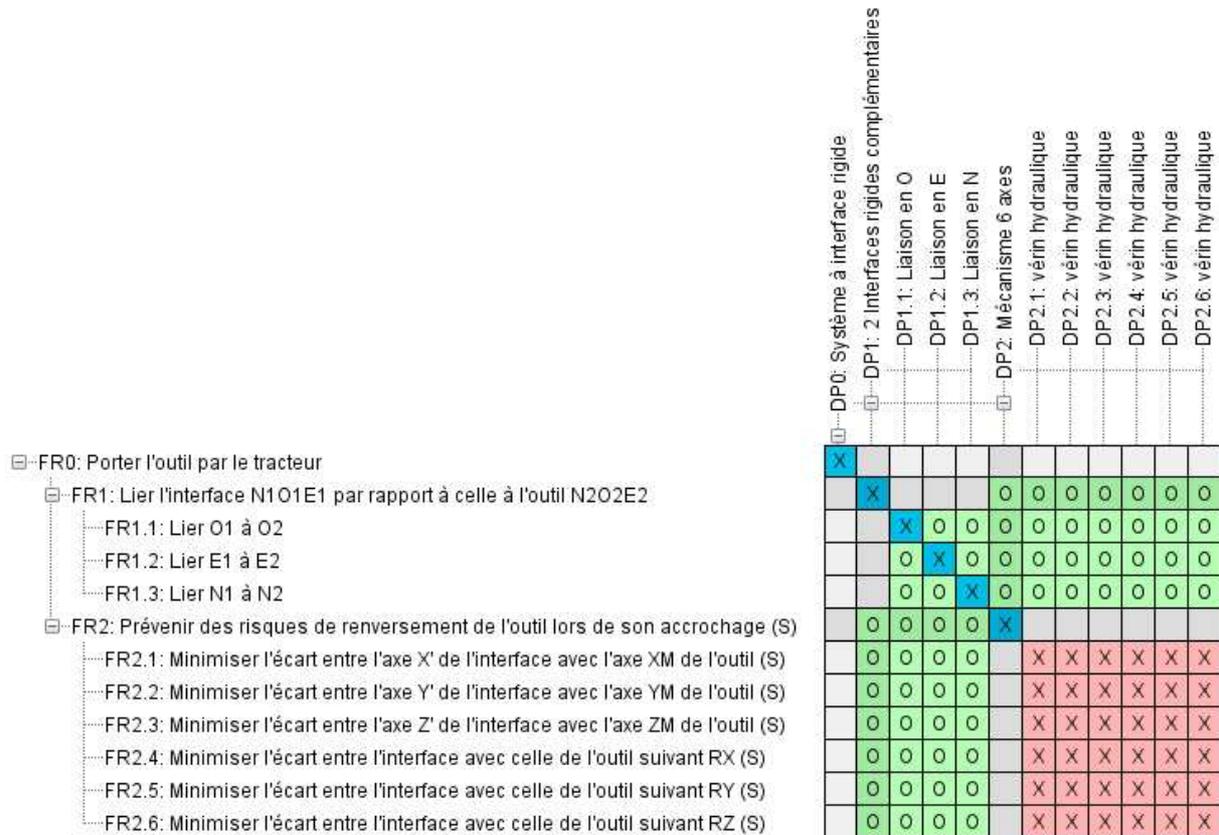


Figure 5.42 : Matrice de conception de ALT2*

Cette matrice de conception montre d'une part, que les exigences de sécurité sont satisfaites et d'autre part, une conception complètement couplée. Dans cette solution, nous considérons que l'accouplement s'effectue de manière manuelle. Ce qui justifie le besoin de mise en position suivant les six degrés de mobilité afin de ne pas gêner la stabilité de l'outil. La mise en position de l'interface est alors automatique. Etant donné que la mise en position est indépendante de l'utilisateur celle-ci va exiger un pilotage asservi de l'hexapode suivant sa position dans la zone d'approche. Ceci peut se faire à travers des capteurs qui calculent la différence de position entre les deux interfaces.

Cependant, du fait du couplage, tous les mouvements possibles sont dépendants les uns des autres. Ainsi, l'utilisation et le contrôle de cette solution s'avère difficile. De plus, du point de vue de l'utilisateur, l'hexapode ne privilégie aucun degré de liberté, ce qui n'est pas forcément intéressant vis-à-vis de ses besoins.

4.2.3. Comparaison entre ALT1 et ALT2*

Chacune des deux solutions ALT1 et ALT2* répond aux objectifs de la sécurité. Les

deux, pour la sous-phase d'attelage, consistent en l'ajout de paramètres de conception. Cependant, l'analyse de la conception complète (en considérant les besoins d'accrochage et de réglage), montre que ALT1 correspond à une intégration inhérente alors qu'ALT2* ajoute trois mouvements qui persistent une fois l'outil est accroché au tracteur. Ces mouvements ne sont pas nécessaires du point de vue de l'utilisateur. Ainsi, si nous avons à choisir entre les deux conceptions, la solution ALT1 est plus intéressante.

4.2. Synthèse en conception architecturale pour la sous-phase d'attelage de l'outil

A ce niveau de la conception, les exigences techniques expriment essentiellement l'activité humaine relative aux principes de solution choisis à l'étape de la conception conceptuelle. Généralement, les exigences de sécurité appartenant au contexte (C2) issues de l'analyse des risques sont intégrées dans l'arbre fonctionnel de la conception. Dans cette application, nous allons partir de la solution trois points. Ainsi, nous allons considérer que nous avons validé les principes de solutions de cette liaison ; à savoir : 3 points, 3 barres et vérins de relevage.

Nous considérons ainsi que les problèmes de sécurité n'ont pas été résolus à l'étape de la conception conceptuelle et les exigences de sécurité proviennent alors de l'analyse des risques. Ainsi, les trois sous-exigences de sécurité notées FR2.1, FR2.2, et FR2.3 non satisfaites vont générer des exigences de sécurité. Nous avons alors, à l'étape de la conception architecturale, la décomposition fonctionnelle suivante de l'exigence de sécurité (exigences encadrées dans la Figure 5.43) :

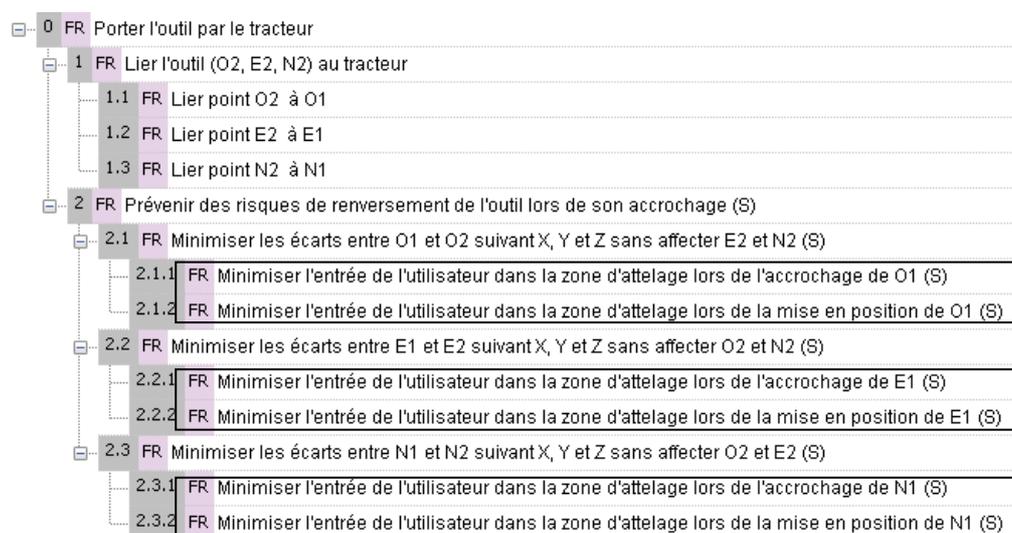


Figure 5.43 : Intégration de l'exigence de sécurité dans l'arbre fonctionnel de la conception architecturale

Nous pouvons imaginer deux alternatives pour répondre à cette exigence (ALT3 et ALT5):

4.2.1. ALT3 : Coupleur par cadre

La première alternative répond aux décompositions fonctionnelle et physique suivantes (Figure 5.44) :

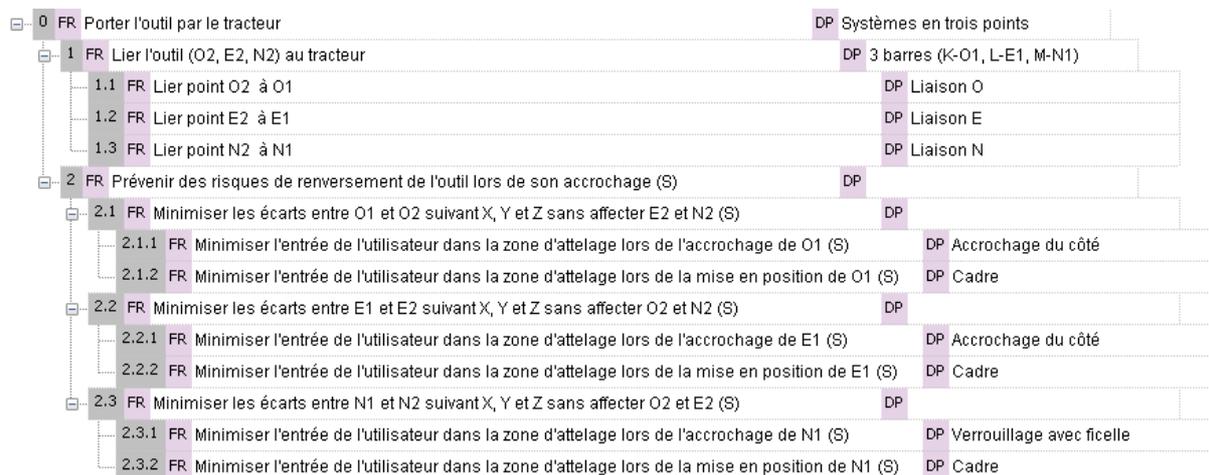


Figure 5.44 : Arbres fonctionnel et physique de la conception architecturale du coupleur par cadre

Ces exigences peuvent être satisfaites par la solution suivante (Figure 5.45) :

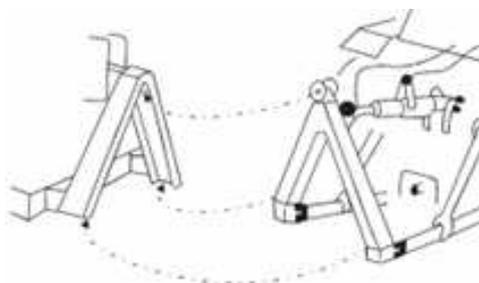


Figure 5.45 : Coupleur en A

Il s'agit ici de sortir l'homme de la zone d'attelage en liant les 3 points. Ainsi, cette solution remet en cause le concept de base de la solution (3 points). Comme expliqué précédemment, l'accouplement par cadre (interface rigide) nécessite un positionnement suivant les 6 degrés de liberté. Or, la solution proposée ne permet absolument pas le positionnement autour de Z. Ceci va compliquer d'avantage l'opération d'accrochage.

Ce problème de mise en position autour de Z, peut être résolu comme le montre la solution suivante (FR2850525 A1 : 2004) :

4.2.2. ALT4 : Pivotement du cadre autour de Z

Pour palier ce problème, la solution suivante donne un principe de solution (Figure 5.46) :

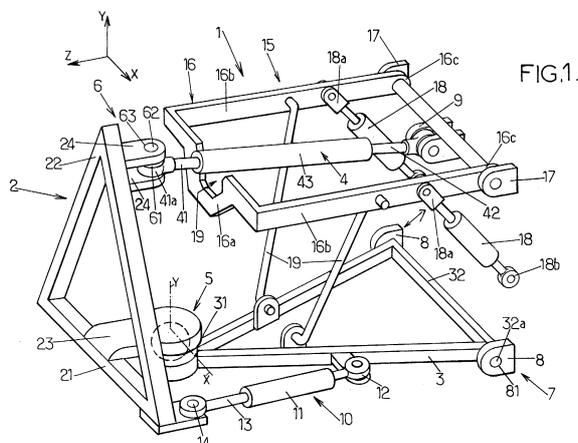


Figure 5.46 : Schématisation du principe de solution de ALT5 (FR2850525 A1 : 2004)

Il s'agit d'abord de remplacer les 3 points par deux points et une sphère. La rotation autour de Z s'effectue par l'actionnement du vérin 11, pivotant ainsi le cadre par rapport aux liaisons (14, 5 et 62).

4.2.3. ALT5 : Découplage des deux points inférieurs

Comme montré précédemment, la conservation de l'indépendance de la mise en position des trois barres (ALT1) permet de satisfaire l'exigence de sécurité. Or, la solution actuelle, demande de rendre les deux points inférieurs dépendants pour les besoins de mise en position de l'outil par rapport au tracteur. Ainsi, nous sommes face à une contradiction physique qui nécessite d'une part, l'indépendance des deux points inférieurs pour les besoins de sécurité et d'autre part, leur dépendance pour les besoins techniques. Cette contradiction revient à découpler ces deux positionnements (Figure 5.47). En effet, le couplage est apparu suite à l'agencement structurel qui consiste à relier le système de relevage (pour la fonction réglage) aux trois barres.

Dans la solution actuelle, le découplage de $FR_{2.1}$ et $FR_{2.2}$ fût réalisé par l'ajout de chandelles. Ainsi, le positionnement des deux points O_1 et E_1 est d'une part, non couplé par la présence de deux chandelles indépendantes et d'autre part, couplé par les vérins de relevage qui sont co-commandés. En fait, $FR_{2.1}$ et $FR_{2.2}$ ont été couplées par les vérins de relevage et ensuite découplées par l'ajout des chandelles. Ceci s'est traduit par une redondance dans la sous-phase d'attelage.

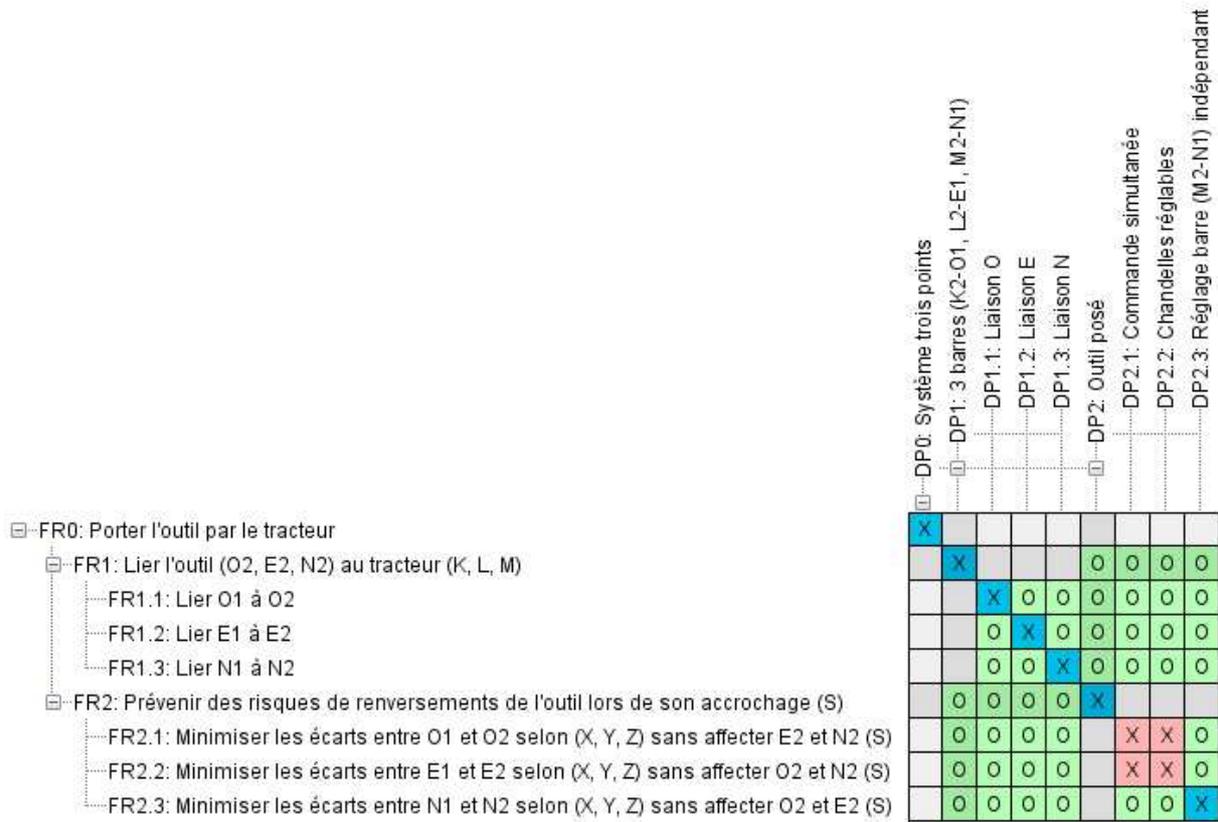


Figure 5.47 : Couplage dans la liaison trois points relatif à l'agencement structurel

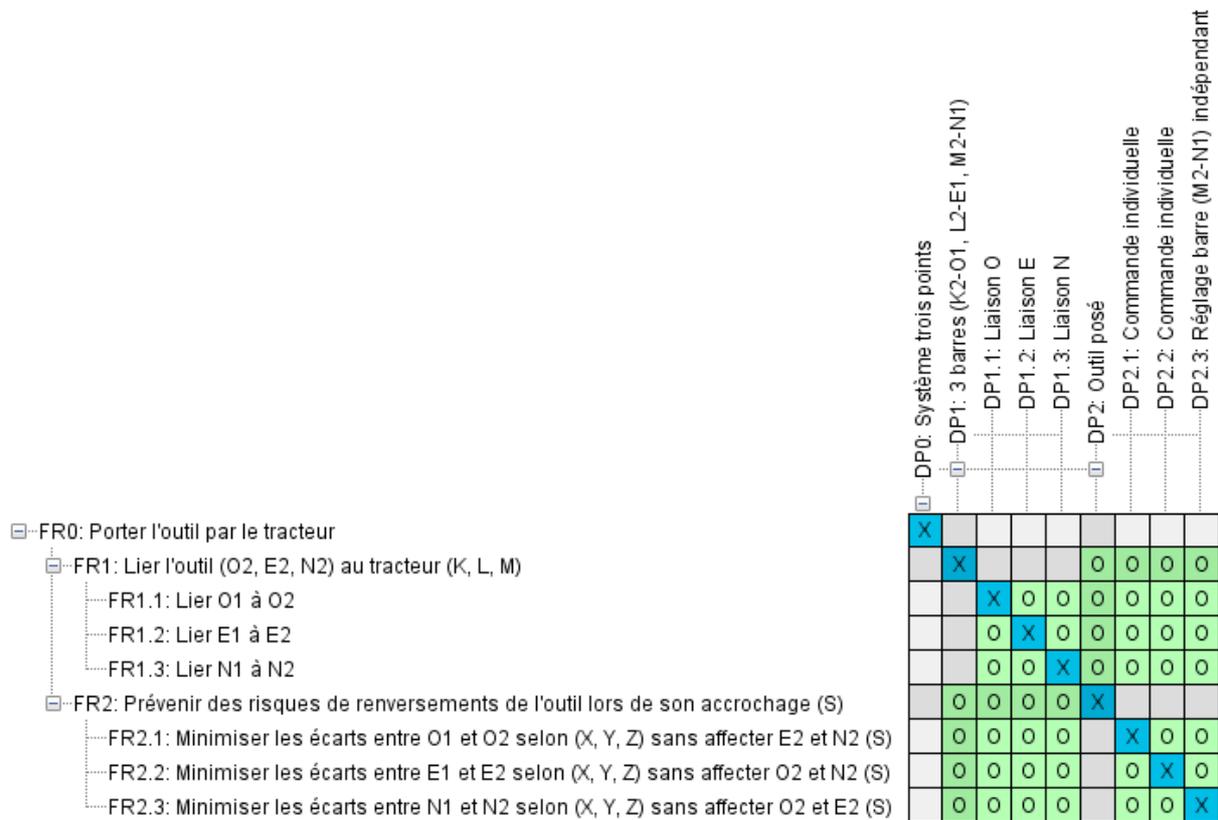


Figure 5.48 : Matrice de conception de ALT6

Cependant, pour résoudre cette contradiction physique, TRIZ propose de « *Utiliser les propriétés des deux phases du système. Le changement de phase est alors piloté par les conditions de fonctionnement du système* ». Ceci peut être interprété par la prise en compte des conditions de fonctionnement des deux sous-phases d'attelage et de réglage. Ainsi, FR_{2,1} et FR_{2,2} peuvent être découplées en considérant que les vérins de relevage sont commandés indépendamment en sous-phase d'attelage et simultanément en sous-phase de réglage. Cette alternative conduit à la matrice représentée par la Figure 5.48.

Cette alternative peut être schématisée comme suit (Figure 5.49) :

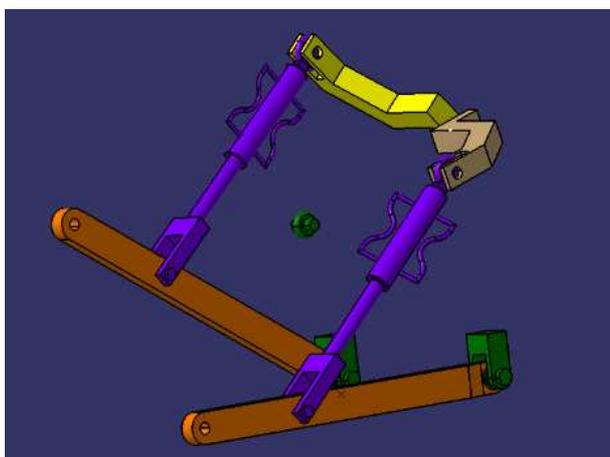


Figure 5.49 : Actionnement des points inférieurs indépendamment à partir des vérins de relevages

Elle correspond à l'amélioration de la conception conceptuelle de la commande des trois points. Cette solution permet de réduire les risques lors de l'attelage. Elle permet de résoudre la difficulté de faire pivoter l'outil autour de l'axe X lors du réglage. Cependant, il manque la mise en position des points d'attelage selon X.

Synthèse du chapitre V

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'application de la méthode IRAD que nous avons proposée dans le chapitre précédent. L'application s'est effectuée au cas du système d'attelage des outils portés : la liaison trois points. Nous avons montré comment prendre en main notre méthode pour une analyse structurée du retour d'expérience, une analyse des risques relatifs aux choix effectués à chacune des étapes de la conception et la synthèse des solutions. Nous avons élaboré un certain nombre d'exigences de sécurité relatives à la liaison des outils portés, que nous avons ensuite affinés suite à l'analyse des risques de la conception. L'évolution du cahier des charges au cours de la conception a bien été démontrée.

Ainsi, dans le cas des LTO, nous avons mis en évidence que les risques sont principalement relatifs au besoin de mise en position de la liaison par rapport à l'outil avant accrochage. Ce besoin, dû à la limitation de l'humain (il ne peut pas soulever l'outil pour le mettre en position), est partiellement pris en compte dans la liaison trois points. En synthèse de solutions, nous avons proposé un certain nombre de principes de solutions pour la sécurisation de cette liaison lors de l'accrochage de l'outil.

Cependant, nous avons quelques constats en ce qui concerne la sécurisation de la liaison des outils portés. En effet, l'analyse des risques montre que la liaison tracteur-outils peut permettre une seule activité manuelle (qui doit être complètement manuelle) qui consiste à mettre en position les points d'attelage du tracteur et ceux de l'outil. Ceci doit cependant imposer un bon dégagement à l'arrière du tracteur. Ainsi, dans l'objectif d'éliminer les risques d'écrasement entre l'outil et le tracteur lors des opérations d'attelage, la typologie globale de la solution cible doit permettre un positionnement de l'interface d'accrochage suivant tous les degrés de liberté.

Conclusions Générales et Perspectives

Dans la conception des produits techniques, la sécurité des utilisateurs est prise en compte à la fin du processus de conception et plus particulièrement à l'étape de la conception détaillée. De par les caractéristiques inhérentes de chacune des deux disciplines de conception et de la sécurité, pour être efficaces les méthodes actuelles d'analyse des risques nécessitent une description détaillée du produit. Cependant, le retour d'expérience montre que ce type d'intégration séquentielle de la sécurité ne permet pas d'atteindre les résultats escomptés.

L'objectif scientifique de cette thèse était de proposer une méthode de préconception basée sur les outils méthodologiques existants et permettant l'intégration structurée et formelle de la sécurité des utilisateurs.

Pour atteindre cet objectif scientifique, nous avons initialement basé la méthode sur une description systématique du processus de conception qui a l'avantage de donner une certaine typologie des représentations du produit au cours de son processus de développement et qui correspond à des activités spécifiques de l'ingénierie. L'idée principale fût d'identifier, d'exprimer et d'intégrer les exigences de sécurité tout au long du processus de conception. Ainsi, la synthèse des solutions techniques s'est effectuée simultanément sur la base des exigences de sécurité et des exigences techniques. Ce qui nous a amené par la suite à intégrer la conception axiomatique à notre méthode. L'apport de la conception axiomatique à ce niveau du développement de la méthode est la description hiérarchique simultanée des exigences fonctionnelles et des solutions techniques associées. Le cadre étant élaboré, nous sommes rapidement confrontés au problème de détermination et d'intégration des

objectifs de la sécurité dans les différentes étapes de la conception. Pour résoudre ce problème, nous avons considéré qu'il existe une correspondance entre les choix techniques de la conception et les risques qui en découlent. Ainsi, nous avons créé un processus du risque qui évolue en même temps que la conception du produit. Afin de déterminer la nature de la correspondance à chaque étape de la conception, nous nous sommes concentrés sur les paramètres de conception qui sont à l'origine de l'énergie contenue dans la solution physique choisie. Cette énergie est génératrice des risques potentiels. Nous avons alors proposé d'étudier les interactions possibles entre l'homme et ces paramètres. Au final, nous avons une méthode de conception intégrant la sécurité de manière systématique et constituée de deux processus parallèles de conception et du risque. Le premier est décomposé en six phases : trois fonctionnelles et trois physiques. Le deuxième est constitué de six contextes : trois fonctionnels et trois physiques. La méthode, nous l'avons baptisée IRAD, acronyme anglais de méthode de conception innovante pour l'évaluation des risques (*Innovative Risk Assessment Design*).

En effet, pour des applications pratiques, IRAD permet trois cas d'emploi : (1) l'expression des objectifs de sécurité à partir de l'analyse du retour d'expérience ; (2) l'expression des objectifs de sécurité à partir de l'analyse des risques relatifs aux choix de la conception; (3) la synthèse des solutions « sécuritaires » à la base des exigences fonctionnelles de sécurité et techniques. Nous avons retiré de l'état de l'art un nombre d'outils de conception permettant de faciliter la mise en œuvre de chacun des cas d'emploi. Afin de faciliter la compréhension des différents concepts proposés, nous avons montré l'applicabilité de la méthode sur un cas d'étude simple le robinet mélangeur, chose ne faisant pas partie de notre cahier des charges initial.

L'objectif industriel consistait à trouver des voies de solution pour la sécurisation du système d'interfaçage entre le tracteur et l'outil agricole. Cet objectif fût en partie satisfait. D'abord, nous avons élaboré un Cahier des Charges Fonctionnel d'une cinquantaine de pages, non inclus dans ce document, exprimant les besoins de différentes liaisons tracteur-outils existantes. Ce cahier des charges a permis de lever certains verrous quand au vrai besoin de ces liaisons. Ensuite, nous nous sommes limités dans nos études applicatives à la liaison trois points. Ce choix fût effectué pour les raisons suivantes :

- D'abord, nous avons cherché à un moment de ces travaux, à réduire le champ de l'étude, trop vaste et à l'aérer en termes de besoins techniques. En effet, lors de la

recherche des solutions technologiques nous étions confrontés à un produit remplissant des mobilités très variés pour l'espace disponible qui est principalement caractérisé par son exigüité.

- Ensuite, les évolutions technologiques concernaient principalement la liaison trois points et depuis 1928 aucune solution significativement novatrice n'a été proposée.
- Enfin, du point de vue accidentologique, élément constituant le cœur de nos travaux, cette liaison reste la plus accidentogène avec une variabilité remarquable des problèmes de sécurité. Elle est à l'origine d'une part, d'une grande partie des accidents les plus graves et d'autre part des problèmes d'ergonomie majeurs.

Ainsi, nous avons pu analyser la liaison trois points, des points de vue de sa conception et des risques qui en découlent. Nous avons montré la faisabilité et l'applicabilité de notre méthode et son apport par rapport aux méthodes traditionnelles. A l'issue de cette application, nous avons dégagé les exigences de sécurité de cette liaison et quelques principes de solution permettant d'améliorer sa sécurité. En synthèse à ce travail, nous avons tracé les grandes lignes d'une liaison sécuritaire pour les outils portés.

Enfin, notre méthode est principalement caractérisée par son aspect générique et par suite son applicabilité à tout domaine d'application. De nombreux travaux restent donc encore à mener pour développer ses potentialités. Les perspectives que nous proposons à la suite de ce travail de thèse sont les suivantes :

Point de vue scientifique et méthodologique

D'abord, il nous paraît utile à moyen terme de consolider les propositions faites dans cette thèse principalement en ce qui concerne l'expression des exigences de sécurité. Même si nous avons proposé d'exprimer ces dernières sous forme de fonctions d'optimisation, cet aspect reste à creuser. A cet effet, nous considérons qu'il est intéressant de regarder plus en profondeur les travaux portant d'une part, sur l'ingénierie des exigences et d'autre part, sur les méthodes d'optimisation et de décision multicritères.

Cependant à plus long terme, il conviendra de définir des ontologies et par suite de développer une base des classes se basant sur les différentes phases et contextes proposées dans notre méthode. En effet, cette dernière pour être efficace et rapide, nécessite d'une part

l'intégration d'un ergonome dans la boucle de la conception et d'autre part une capitalisation formelle des standards et du retour d'expérience.

Ensuite, il nous paraît intéressant et utile d'y intégrer les autres aspects de la sécurité, tels que les aspects organisationnels et comportementaux de l'humain. Ces aspects n'ont pas été étudiés dans nos travaux. Ces études doivent cependant, de notre point de vue, différencier les différents types d'exploitation en agriculture.

Enfin, de par sa nature générique et méthodique, nous pensons que notre méthode peut être étendue pour intégrer tout type d'exigences relatives aux différentes phases du cycle de vie du produit, tels que les exigences d'éco-conception (pollution, déchets, démantèlement...) ou les exigences de fabrication. Ce premier aspect est très demandé dans notre société d'aujourd'hui et fait partie du plan stratégique du Cemagref. Il faudra trouver la nature de la correspondance qui existe entre la conception et les aspects environnementaux. Il conviendra ainsi de l'intégrer dès les phases amont de la conception en suivant la même démarche que nous avons effectuée pour atteindre nos propositions.

Point de vue applicatif

D'un point de vue applicatif, nous pensons qu'il serait intéressant d'une part, d'affiner certains principes de solutions proposés dans cette thèse et appuyer la méthode en étendant l'étude menée sur d'autres besoins de liaisons (à savoir l'attelage des outils semi-portés et traînés et les éléments de transmission de puissance).

Cependant, il convient à plus long terme d'étudier la simplification fonctionnelle de ces liaisons, c'est-à-dire d'étudier le problème suivant les types d'exploitations que l'on retrouve dans le domaine agricole. *Pourquoi ne pas imaginer quatre catégories de tracteur suivant les types d'exploitation au lieu des quatre catégories suivant la puissance à la prise de force ?* Cet aspect, de notre point de vue, permettra de converger vers des solutions plus spécifiques mais plus robustes et plus sécuritaires. De plus, la classification actuelle des tracteurs n'est pas intéressante pour l'utilisateur qui a généralement besoin d'un seul tracteur s'adaptant à tous ses outils quelque soit la catégorie de ces derniers. A notre sens, concevoir suivant le type d'exploitation va permettre de mieux répondre aux besoins de l'utilisateur. Par ailleurs, si l'on recherche toujours une solution universelle, il conviendra d'ouvrir le périmètre de la conception en y intégrant l'architecture du tracteur et celle de l'outil.

De nombreux travaux tant théoriques que pratiques restent donc encore à mener pour affiner les concepts de notre méthode et développer ses potentialités.

Références Bibliographiques

- AFNOR (1996). NF EN X 50-100, Analyse Fonctionnelle – Caractéristiques fondamentales. *Editée par Association Française de NORmalisation (AFNOR).*
- AFNOR (2000). NF EN ISO 10075-2, Principes ergonomiques relatifs à la charge de travail mental - Partie 2: Principes de conception.
- AFNOR (2005a). NF EN 1005-4, Sécurité des machines - Performance physique humaine - Partie 4 : évaluation des postures et mouvements lors du travail en relation avec les machines. *Editée par Association Française de NORmalisation (AFNOR).*
- AFNOR (2005b). NF EN 1325-2, Vocabulaire du management de la valeur, de l'analyse et de la valeur et de l'analyse fonctionnelle - Partie 2 : management par la valeur. *Editée par Association Française de NORmalisation (AFNOR).*
- AFNOR (2007). NF X 50-152, Management par la valeur - Caractéristiques fondamentales de l'analyse de la valeur. *Editée par Association Française de NORmalisation (AFNOR).*
- AFNOR (2008a). NF EN 547-1+A1, Sécurité des machines - Mesures du corps humain - Partie 1 : principes de détermination des dimensions requises pour les ouvertures destinées au passage de l'ensemble du corps dans les machines. *Editée par Association Française de NORmalisation (AFNOR).*
- AFNOR (2008b). NF EN 1005-3+A1, Sécurité des machines - Performance physique humaine - Partie 3 : Limites des forces recommandées pour l'utilisation de machines. *Editée par Association Française de NORmalisation (AFNOR).*
- AFNOR (2009). NF EN 614-1+A1 Sécurité des machines - Principes ergonomiques de conception: Terminologie et principes généraux. *Editée par Association Française de NORmalisation (AFNOR).*
- Ahn, Y.-J., Lee, K-W, (2006). Application of Axiomatic Design and TRIZ in Ecodesign. *TRIZ Journal.*
- Altshuller, G. (2004). *40 Principes d'innovation.*
- Altshuller, G. (2006). *Et soudain apparut l'inventeur: les idées de TRIZ.*

- Belmonte, F. (2008). Impact des postes centraux de supervision de trafic ferroviaire sur la sécurité (pp. 232): Université de Technologie de Compiègne.
- Bernard, A., Hasan, R., (2002). Working situation model for safety integration during design phase. *Annals of the CIRP Manufacturing* **51**, 119-122.
- Brown, C. A. (2006). Axiomatic Design and the Evolution of Conventional Alpine Ski Bindings. *Axiomatic Design Solutions Incorporation*, <http://www.axiomaticdesign.org/AxiomaticDesignandSkiBindings.pdf>.
- Cavallucci, D. (2002). Integrating Altshuller's development laws for technical systems into the design process. *Annals of the CIRP*, **50**, 115-120.
- Cavallucci, D., Rousselot, F., Zanni, C., (2008). On contradiction clouds. *in proceedings of TRIZ Future Conference 2008, Netherland, November 5-7*.
- Cavalucci, D. (1999). Contribution à la conception de nouveaux systèmes mécaniques par intégration méthodologique, *Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Soutenue le 14 décembre*.
- Cavalucci, D., Lutz, P. (2000). Intuitive design method, a new approach on design method integration. *in proceedings of International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, June 21-23*.
- Cemagref (1991). Les tracteurs agricoles: technologies de l'agriculture. *Collection FORMAGRI*, Lavoisier Tec&Doc.
- CCMSA, (2005). Données statistiques relatives aux accidents du travail des salariés et non salariés agricoles lors des opérations d'attelage ou dételage, *Caisse Centrale de la Mutualité Sociale Agricole*. Août.
- CETIM, (2002). Compte rendu de la réunion Attelage trois points CRITT Z3T Vierzon. 29 Janvier.
- CNRTL Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales. <http://www.cnrtl.fr/>.
- Cortes Robles, G. (2006). Management de l'innovation technologique et des connaissances: synergie entre la théorie TRIZ et le Raisonnement à Partir de Cas, *Thèse de Doctorat, Soutenue le 19 juillet*.
- Daniellou, F. (1992). *Le statut de la pratique et des connaissances dans l'intervention ergonomique de conception*: Université de Toulouse le Mirail.
- Dastous, P.-A., Nikiema, J., Maréchal, D., Racine, L., Lacousière, J-P., (2008). Risk management : all stakeholders must do their part. *Journal of loss prevention in the process industries*, **21**, 367-373.
- De La Garza, C. (2005). L'intégration de la sécurité lors de la conception de machines à risques pour les opérateurs : comparaison de logiques différentes de conception. *Pistes*, **7**.

- De La Garza, C., Fadier, E. (2007). La retour d'expérience en tant que cadre théorique pour l'analyse de l'activité et la conception sûre. @ctivités, **4**.
- Directive (2006). 2006/42/CE, Parlement Européen et du Conseil, relative aux machines. Journal officiel de l'Union européenne.
- Directive (2003). 2003/37/CE, Parlement Européen du Conseil, réception par type des tracteurs agricoles ou forestiers, de leurs remorques et de leurs engins interchangeables tractés, ainsi que des systèmes, composants et entités techniques de ces véhicules. Journal officiel de l'Union européenne.
- Dubois, S. (2004). Contribution à la formulation des problèmes en conception de systèmes techniques: Etude basée sur TRIZ Thèse de Doctorat, ENSAM Bordeaux, soutenue le 9 novembre.
- Duflou, J. R., D'hondt, J., (2007). Applying TRIZ for systematic manufacturing process innovation: the single point incremental forming case. in *proceedings of TRIZ Future Conference 2007, Frankfurt Germany, November 6-8*.
- Fadier, E. (1994). Etat de l'art dans le domaine de la fiabilité humaine. *Edition OCTARES*.
- Fadier, E., De La Garza, C., (2007). Towards a proactive safety approach in the design process: The case of printing machinery. *Safety Science*, **45**, 199–229.
- Fadier, E., De La Garza, C., Didelot, A., (2003). Safety Design and human activity: construction of a theoretical framework from analysis of a printing sector. *Safety Design*, **41**, 759-789.
- Fadier, E., DeLaGarza, C., (2006). Safety design: Towards a new philosophy. *Safety Science*, **44**, 55-73.
- Ge, P., Lu, S. C.-Y., Suh, N. (2002). An axiomatic approach for target cascading of parametric design of engineering systems. *Annals of the CIRP*, **51**, 111-114.
- Gogu, G. (1997). Méthodologie d'innovation et de conception, Cours IFMA.
- Gonçalves-Coelho, A.-M., Mourão, J-F, Pereira, Z-L., (2005). Improving the use of QFD with Axiomatic Design. *Concurrent Engineering: Research and Applications*, **13**, 233-239.
- Ghemraoui, R. (2007). Liaisons tracteur-outils : Cahier des Charges Fonctionnels. *Cemagref*, **1**, 48 pages.
- Ghemraoui, R., Mathieu, L., Tricot, N., Anselmetti, B., (2008). Vers une meilleure caractérisation des utilisateurs en phase de conception: application à la liaison tracteur-outils. *Congrès LambdaMu 16, Avignon Octobre*.
- Ghemraoui, R., Mathieu, L., Tricot, N., (2009a). Systematic Human-Safety Analysis Approach based on Axiomatic design Principles. *Fifth International Conference on Axiomatic Design, Portugal, March*.

- Ghemraoui, R., Mathieu, L., Tricot, N., (2009b). Méthode d'intégration systématique des facteurs humains à toutes les phases de la conception. *11ème Colloque National AIP Primeca, Laplagne, Avril.*
- Ghemraoui, R., Mathieu, L., Tricot, N., (2009c). Design Method for Systematic Safety Integration. *Annals of the CIRP - Manufacturing Technology*, **58**, pp. 161-164. *Avec présentation orale à l'Assemblée Générale du CIRP 2009.*
- Hasan, R. (2002). Contribution à l'amélioration des performances des systèmes complexes par la prise en compte des aspects socio-techniques dès la conception : proposition d'un modèle original de SITUATION DE TRAVAIL pour une nouvelle approche de conception, *Université Henri Poincaré, Nancy I.*
- Hasan, R., Bernard, A., Ciccotelli, J., Martin, P., (2003). Integrating safety into the design process: elements and concepts relative to the working situation. *Safety Science*, **41**, 155-179.
- Hasan, R., Martin, P., Bernard, A., (2004). Solving Contradictions Problems Related to Safety Integration in Design Process. *TRIZ Journal.*
- Helander, M. G. (2007a). Using design equations to identify sources of complexity in human-machine interaction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, **8**, 123-146.
- Helander, M. G. (2007b). Editorial of Conceptualizing axiomatic design for human factors design. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, **8**, pp.97-99.
- Heo, G., Lee, T., Do, S.H. (2007). Interactive system design using the complementarity of axiomatic design and fault tree analysis. *Nuclear engineering and technology*, **39**, 51-62.
- Hollnagel, E. (2008a). The changing nature of risks. *published online: <http://erik.hollnagel.googlepages.com/Changingnatureofrisks.pdf>.*
- Hollnagel, E. (2008b). Risk + barriers = safety? *Safety Science*, **46**, 221-229.
- Hollnagel, E. (1999). Accident and barriers (pp. 175-180). *7th European Conference on Cognitive Science Approaches to Process Control*, 21-24 September, France.
- HOSTA. (2004). Using 3-point hitch implements, *Hazardous Occupations Safety Training in Agriculture*. The Pennsylvania State University.
- ISO (2002). ISO 14738, Sécurité des machines - Prescriptions anthropométriques relatives à la conception des postes de travail sur les machines. *Editée par International Standards Organization (ISO).*
- ISO (2005). NF EN ISO 15537, Principes de choix et d'utilisation de sujets d'essai pour l'essai des aspects anthropométriques des produits industriels et leur conception. *Editée par International Standards Organization (ISO).*
- ISO (2007). ISO 14121-1, Sécurité des machines - Appréciation du risque - Partie I : Principes. *Editée par International Standards Organization (ISO).*

- ISO (2008). NF EN ISO 15536-1, Ergonomie - Mannequins informatisés et gabarits humains - Partie 1 : exigences générales. *Editée par International Standards Organization (ISO)*.
- ISO (2009). ISO 12100-1+A1, Sécurité des machines - Notions fondamentales, principes généraux de conception - Partie 1: Terminologie de base, méthodologie. *Editée par International Standards Organization (ISO)*.
- JTRIZ, *Journal TRIZ*. www.triz-journal.com
- Karwowski, W. (2005). Ergonomics and human factors: the paradigms for science, engineering, design, technology and management of human-compatible systems. *Ergonomics*, **48**, 436-463.
- Kjellen, U. (2007). Safety in the design of offshore platforms: Integrated safety versus safety as an add-on characteristic. *Safety Science*, **45**, 107-127.
- Lo, S., Helander, M.G. (2007). Use of axiomatic design principles for analysing the complexity of human-machine systems. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, **8**, 147-169
- Mann, D., Dewulf, S. (2003). *Matrix 2003: Updating the TRIZ Contradiction Matrix*: CREAX press.
- MAP, (2006). Les liaisons tracteurs-outils: Pour des opérations d'attelage et de dételage aisées et sûres *Educagri édition*.
- Marsot, J. (2005). QFD: A methodological tool for integration of ergonomics at the design stage *Applied Ergonomics*, **36**, 185-192.
- Nadeau, J.-P., Pailhès, J., (2007). Analyse et structuration du problème lors d'une séance de créativité. *10ème colloque National AIP PRIMECA, 17-20 Avril, La Plagne – France*
- Pahl&Beitz (2007). Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K.-H, Engineering design: A systematic approach. *3rd edition Berlin: Springer-Verlag*.
- Petiot, J.-F. (2004). Conception intégrée orientée client: Processus, méthodes et outils. *Mémoire d'HDR, Ecole Centrale Nantes, 27 avril*.
- Polet, P. (2002). Modélisation des franchissements de barrières pour l'analyse des risques des systèmes homme-machines: Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.
- Sagot, J.-C., Couin, V., Gomes, S., (2003). Ergonomics in product design: safety factor. *Safety Science*, **41**, 137-154.
- Scaravetti, D. (2004). Formalisation préalable d'un problème de conception, pour l'aide à la décision en conception préliminaire, *Thèse de Doctorat, ENSAM Bordeaux, soutenue le 3 Décembre*.
- Seliger, G. (2001). Product innovation – Industrial approach. *Annals of the CIRP*, **50**, 425-443.

- Shahrokhi, M. (2006a). Intégration d'un modèle de situation de travail pour l'aide à la formation et à la simulation lors de la conception et l'industrialisation de systèmes, *Ecole Centrale de Nantes*.
- Shahrokhi, M., Bernard, A., (2006b). Barrier analysis through industrial design processes. *Ergo IA*.
- Shahrokhi, M., Bernard, A., (2006c). *Human Modelling In Industrial Design*: Springer Series in Advanced Manufacturing, ElMaraghy, Hoda A.; ElMaraghy, Waguih H. (Eds.) 2006, XXII, 576 p. 264 illus., Hardcover, ISBN: 1-84628-004-4.
- Shahrokhi, M., Bernard, A., (2006d). Modelling of the occupational hazards entities in a general model of products, processes and resources. *Integrated design and production: CPI 2005*, **2**, 113-128.
- Shupp, B., Hale, A., Pasman, H., Lemkovitz, S., Goossens, L. (2006). Design support for systematic integration of risk reduction into early chemical process design. *Safety Science*, **44**, 37-54.
- Sklet, S. (2004). Comparison of some selected methods for accident investigation. *Journal of Hazardous Materials*, **111**, 29–37.
- Sklet, S. (2006). Safety barriers: Definition, classification and performance. *Journal of loss prevention in the process industries*, **19**, 494-506.
- Sohlenius, G. (1992). Concurrent Engineering. *Annals of the CIRP*, **41**, 645-655.
- Suh, N. (1990). The principles of design. *Oxford University press*.
- Suh, N. (2001). Axiomatic Design: Advances and Applications, *Oxford University Press*.
- Suh, N. (2005). Complexity in engineering. *Annals of the CIRP*, **54**, 46-63.
- Suh, N. (2007). Ergonomics, Axiomatic Design and Complexity Theory. *Theoretical Issues in Ergonomics*, **8**, 101-121.
- Thompson, M.-K., Kwon, O-H, Park, M-J, (2009). The application of Axiomatic Design theory and conflict techniques for the design of intersections: Part 1. *in proceedings of International Conference on Axiomatic Design, Lisbon, March 25-27*, 121-128.
- Villemeur, A. (1988). Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. *Collection de la direction des études et recherches d'EDF, Eyrolles*.
- Yang, K., Zhang, H., (2000). A comparison of TRIZ and Axiomatic Design *TRIZ Journal*, Août 2000.
- Yannou, B. (2001). *Préconception de Produits*: Mémoire d'HDR, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Zhang, R., Liang, Y., (2007). A conceptual design model using Axiomatic Design and TRIZ. *International Journal of Product Development*. **4**. pp 68-79.

Références Techniques

- US 6321851 B1. (2001). Hitch mechanism for coupling implements to a vehicle. *United States Patent Application Publication, November.*
- FR2850525 A1. (2004). Tools hanging system for construction vehicle, has upper and lower supports with ends connected to tool-holder and vehicle by pivoting unit and having adjustable pivoting unit on one axis that is perpendicular to another axis. *French Patent Application Publication. June.*
- ISO 730-1 : 2009. Tracteurs agricoles à roues. Attelage trois points monté à l'arrière. Partie 1 : catégories 1N, 1, 2N, 2, 3N, 3, 4N et 4. *Editée par International Standards Organization (ISO).*
- NF EN 12965+A2:2009. Tracteurs et matériels agricoles et forestiers - Arbres de transmission à cardans de prise de force et leurs protecteurs – Sécurité. *Editée par Association Française de NORmalisation (AFNOR).*
- NF ISO 15171-1:2001. Indice de classement : E48-057-1. Raccordements pour transmissions hydrauliques et pneumatiques et usage général - Raccords hydrauliques pour diagnostics - Partie 1 : raccord pour connexion n'étant pas sous pression. *Editée par Association Française de NORmalisation (AFNOR).*
- NF ISO 1724 : 2004. Véhicules routiers - Connecteurs pour liaisons électriques entre véhicules tracteurs et véhicules tractés - Connecteur à 7 contacts de type 12 N (normal) pour les véhicules à tension nominale de 12 V. *Editée par Association Française de NORmalisation (AFNOR).*
- ISO 11783-1 : 2008. Tracteurs et matériels agricoles et forestiers - Réseaux de commande et de communication de données en série - Partie 1 : système normalisé général pour les communications de données avec les équipements mobiles. *Editée par International Standards Organization (ISO).*
- NF ISO 11001-2: 1997. Tracteurs agricoles à roues et instruments. Coupleurs rapides trois points. Partie 2 : coupleur par cadre en A. *Editée par Association Française de NORmalisation (AFNOR).*
- ISO 500-1:2004. Tracteurs agricoles - Prises de force montées à l'arrière des types 1, 2 et 3 - Partie 1 : spécifications générales, exigences de sécurité, dimensions du bouclier protecteur et de la zone de dégagement. *Editée par International Standards Organization (ISO).*

Résumé :

Les travaux de recherche exposés dans ce mémoire sont relatifs à l'élaboration d'une méthode d'intégration de la santé-sécurité à la conception des produits. L'intégration de la santé-sécurité dans la conception est aujourd'hui considérée comme un processus séquentiel. Ce type d'approche ne permet pas d'atteindre les résultats escomptés en termes d'amélioration de la sécurité. La méthode proposée consiste à prendre en compte celle-ci dès les premières phases de conceptualisation du produit. Nous avons proposé trois principes fondamentaux régissant la conception sécuritaire. Elle est basée sur les méthodes de conception systématique et axiomatique et permet trois cas d'emploi. Nous proposons ainsi, un processus du risque évoluant simultanément avec un processus de conception. Ce processus des risques est constitué de six contextes, exprimant chacun un nouveau point de vue des risques. Cette méthode, baptisée IRAD permet au concepteur d'exprimer les exigences de sécurité d'une part, à partir de l'analyse structurée du retour d'expérience (cas d'emploi 1) et d'autre part, à partir de l'analyse systématique des risques liés aux choix technologiques effectués au cours de la conception (cas d'emploi 2). Suite à cette démarche, le cahier des charges du produit s'avère évolutif et dépendant du développement du produit. La conception de produits sécuritaires s'effectue alors à travers l'intégration des exigences de sécurité dans la synthèse des solutions (cas d'emploi 3). Les exigences de sécurité découlant de la mise en œuvre de la méthode se présentent sous forme d'équations d'optimisation. L'applicabilité de la méthode IRAD a été enfin démontrée sur le cas des liaisons tracteur-outils.

Mots-clés : *méthode de conception, santé-sécurité, exigence de sécurité, conception axiomatique, conception systématique, retour d'expérience, analyse des risques, intégration au plus tôt, méthode IRAD, liaisons tracteur-outils.*

Abstract:

The research presented in this dissertation is related to the human-safety discipline integration into the product design discipline. Currently, human-safety is considered sequential to the product design. This mean of safety integration has reached its limits. In fact, risk reduction analysis for safety barriers implementation intervenes in the end of the design process, in the detailed design phase, and are rapidly increasing in variety, size, complexity and sophistication. The proposed method (called IRAD) allows human-safety integration in the early design process. IRAD is based on the axiomatic and systematic design approaches and allows three use cases. Thus, we proposed a risk process evolving simultaneously with a design process. This risk process is divided into six contexts, each one giving a new viewpoint of risks. IRAD is a systematic method for designer to extract safety requirements through from the one hand, a structured experience feedback analysis (Use case 1) and from the other hand, a systematic analysis of risks related to the physical design choices all along the design process (Use case 2). In result, the requirements document is evolving with and depending on the product development. Safety solution is carried out through safety requirements integration in the design synthesis (Use case 3). Three safety design principles are thus proposed. Safety requirements are formulated as optimization equations. Finally, IRAD is applied to the tractor-implements hitch context.

Keywords : *design method, safety and health, safety requirements, axiomatic design, systematic design, experience feedback, risk analysis, early design, IRAD method, tractor-implements hitch.*