



**HAL**  
open science

**Etude d'un système de supervision et de commande  
d'un procédé complexe comme élément de base d'une  
organisation distribuée comprenant des machines et des  
hommes**

Ahmad Skaf

► **To cite this version:**

Ahmad Skaf. Etude d'un système de supervision et de commande d'un procédé complexe comme élément de base d'une organisation distribuée comprenant des machines et des hommes. Automatique / Robotique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2001. Français. NNT : . tel-00198491

**HAL Id: tel-00198491**

**<https://theses.hal.science/tel-00198491>**

Submitted on 17 Dec 2007

**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.

**UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER - GRENOBLE 1  
SCIENCES & GEOGRAPHIE**

*N° attribué par la bibliothèque*

/\_/\_/\_/\_/\_/\_/\_/\_/\_/\_/\_/\_/\_/\_/\_/\_

**THÈSE**

*Pour obtenir le grade de*

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER**

*Discipline* : Automatique et Productique

présentée et soutenue publiquement

par

**Ahmad SKAF**

le 18 / 12 / 2001

---

***ETUDE D'UN SYSTEME DE SUPERVISION ET DE COMMANDE D'UN  
PROCEDE COMPLEXE COMME UN ELEMENT DE BASE D'UNE  
ORGANISATION DISTRIBUEE COMPRENANT DES MACHINES ET  
DES HOMMES***

---

*Directeur de thèse* : M. Bernard Descotes-Genon  
M. Bertrand David

**JURY**

M. Ladet P.  
M. Millot P.  
M. Girard P.  
M. Descotes-Genon B.  
M. David B.  
M. Binder Z.

Président  
Rapporteur  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur  
Examineur

Thèse préparée au *Laboratoire d'Automatique de Grenoble*

## إهداء لمن ينتظر الإهداء

إلى كل هؤلاء.....

الذين تشخصُ أعينهم إلى السماء...

الذين ينتظرون من خلف زجاج أعينهم الغائرة.....

شيئاً يسمونه الخلاص ... شيئاً قد يشبه المطر.....

شيئاً قد يملأ الساحات بالهزج بالرقص بالحبر.....

شيئاً قد يعكس الآيات..... قد يشطبُ القدر.....

إلى كل هؤلاء.....

من كان ينتظر... من انتظر... من ينتظر.....

لستُ أنا من سيفتح أبواب السموات... لستُ أنا من يُترل المطر.....

فعدراً إن لم أغير الأشياء... فربما يغيرها يزن.....

إليكم أنتم... هؤلاء... كثيراً من دموع القلب مرفقتاً مع إبني يزن.....

أحمد سكاف



## موضوع الدكتوراه :

دراسة نظام مراقبة (supervision) و تحكم (control) في مجموعة أوتوماتيكية معقدة (complex systems) (محطات توليد القدرة)، كعنصر قاعدي (basic) في تنظيم متباعد ذكي (Intelligent Distributed Organization) ، متضمناً عناصر التحكم والإنسان ."

أحمد سكاف

الأستاذة المشرفون:

- البروفيسور : برنار ديكوت-جينون

أستاذ بروفيسور في المعهد الوطني البولتيكنيكي في غرنوبل، أستاذ بروفيسور في جامعة جوزيف فورييه

- البروفيسور : برتراند دافيد

المدير العام لمخبر الأبحاث ICTT ، أستاذ بروفيسور في المدرسة المركزية للهندسة في ليون

## عرض عام :

تشكل هذه الرسالة مساهمة في دراسة الأنظمة مشتركة القيادة (Man-Machine Systems) حيث يقوم العنصر البشري مع حاسب ألي بالتحكم الكامل في النظام. هذه الدراسة انطلقت من البديهة التي تقول أن الإنسان مجبرٌ - في بعض الحالات - على التعايش مع شريك أليغاريتمي. حيث يقوم بمساعدته في عملية القيادة ، أو يطلب منه المساعدة. إذا الإنسان و الحاسب الآلي يشكلان حالة تستحق الدراسة خاصة عندما يدور الحديث عن الأنظمة المعقدة القيادة كالمخطات النووية لتوليد القدرة أو أنظمة التحكم في الطائرات و المخطات الفضائية... الخ.

إن دور العنصر البشري في هذا الإطار يتطور من خلال إما إتمام العمل الذي لا يستطيع الحاسب إتمامه، أو من خلال المراقبة والتدخل في حالات الطوارئ. هذا الواقع الجديد يحتم علينا إعادة النظر في ما يسما الأتمتة، فالترابط العضوي بين الإنسان و الحاسب يعطي هذا المفهوم أبعاداً جديدة يجب أخذها بعين الاعتبار عند تصميم أنظمة التحكم الأوتوماتيكي. هذا هو بالضبط ما دفعنا إلى افتراض نوع جديد من الأتمتة أسميناها (الأتمتة المتجانسة) والذي يهدف إلى تصميم أنظمة تحكم عالية الأمان أسميناها أنظمة تكيكوبشرية.

تتلخص البحوث في إطار رسالة الدكتوراه هذه في دراسة، تصميم، وتطبيق نظام تعاوي لقيادة مجموعات تكنولوجية معقدة (complexe systems). هذه المجموعات التي إما أن تكون مؤتمتة بشكل كامل أو صعبة الأتمتة. في هذه المجموعات يمكن ملاحظة نوعين من مستويات التداخل بين نظام القيادة و الإنسان، هذين النوعين هما : المراقبة و التنفيذ.

إن حالة المراقبة (supervision) لمنظومة أوتوماتيكية و التدخل في أدائها، تتميز بأن المراقب البشري يؤدي دوراً فعالاً، لذلك يجب تزويده بأدوات برمجية للمساعدة في أخذ القرارات (decisions). هذه الأدوات مفترضٌ فيها أن تقوم بمساعدة الإنسان في نشاطات المراقبة التحليلية (surveillance)، اكتشاف الأخطاء (detection)، التوقع (diagnosis)، و أخذ القرارات (decisions)، و بشكل أكثر عمومية في الحفاظ على أمن المجموعات التكنولوجية. هذه الأدوات تعتمد في تصميمها على نمذجة (modelisation) المعرفة و على طرائق الرموز المنبثقة من الذكاء الاصطناعي.

الحالة الثانية، وهي التنفيذ (Execution)، والتي تتميز بقيام الإنسان بتنفيذ أعمال (tasks) فيزيائية (أعمال الصيانة في محطة توليد قدرة مثلاً). في هذه الحالة نحن مضطرون لمعالجة الأمرين التاليين: الأول هو التجهيز الارغونومي (ergonomic) لأماكن العمل، الثاني هو المساعدة على التنفيذ في حالات التدخل الحساسة (عمليات التليروبوتيك (telerobotic) في مفاعل نووي، في الفضاء... الخ). في هذا المعنى المساعدة يجب أن تتضمن الإنذار، وتصحيح الأخطاء البشرية.

الهدف الحاسلي إذاً، هو طريقة متكاملة للأتمتة ، حيث يتم الأخذ بعين الاعتبار وجود العنصر البشري، ابتداءً من تصميم نظام المراقبة والمراقبة التحليلية، وإنهاءً بالترتيب الإرغونومي لمكان العمل. هذا الأمر استوجب بالضرورة اللجوء إلى فروع متعددة في العلوم الهندسية و الطبيعية لإكمال بناء ما يسمى نظام التحكم والسيطرة على المجموعات المعقدة، فمن المعلوماتية إلى الأوتوماتيك إلى الذكاء الاصطناعي لنتهي بالعلوم النفسية و سيكولوجيا العمل.

في إطار الأعمال ضمن رسالة الدكتوراه قمنا بتطوير أفكاراً عده حول تصميم أنظمة قيادة و مراقبة (supervision) مشتركة بين نظام أوتوماتيكي وبشري، مُركزين على نقطتين أساسيتين:

● أولاً : تصميم نظام مساعدة على المراقبة والمراقبة التحليلية (surveillance)، أخذين بعين الاعتبار أن بناء نظام مساعدة، يمر بمرحلتين : دراسة تحليلية (analysis) للسلوك البشري عند أخذ القرارات. ثم إعطاء معاملات (coefficients) تكنولوجية و أرغونومية (ergonomic) إلى وحدات العمل المبرمجة (actions) في نظام المراقبة و المراقبة التحليلية. في هذا الإطار قمنا بتطوير البرمجيات (softwares) المساعدة على اخذ القرارات (decision making). فلقد انطلقنا -لبناء هذه البرمجيات- من مبدأ أن التحكم من حالة المراقبة (supervisory control) للمجموعات الصناعية بأنواعها (وهذا الموضوع يشكل حقل أساسي من حقول البحوث في مجال هندسة المنظومات وقيادة) يتضمن تابعي: المراقبة (monitoring) لسلوك النظام عن طريق التغذية الراجعة (feedback) و التقييم لتغيرات التحكم بتطبيق قانون التحكم. إن المجموعات الصناعية بكافة أنواعها تملك درجة عالية من التعقيد التكنولوجي يتطلب تصميم مرن لنظام المراقبة و التحكم بمشاركة أدوات برمجية مناسبة. خصوصاً في حالات العمليات الصناعية (industrial processes) كثيرة الاضطراب (عمليات الصيانة في محطات توليد القدرة أو في المصانع الكبرى). وهذا ما أخذناه بعين الاعتبار عند برمجة نظام الفك (dismantling system) المأخوذ كمثل للتطبيق وحاكاة. يرتكز النظام المطور (البرمجية) على الهيكل التالي :

1. جزء توليد سلاسل الفك (sub-system for sequences generation).

2. جزء اختيار أفضل سلسلة فك (sub-system for selecting the best sequence) .generation

3. جزء تخطيط عمليات الفك (sub-system for dismantling operation) .planning

4. جزء توليد خطة الفك (sub-system for generation the dismantling plan).

هذه الأربعة أجزاء تشكل ما نسميه المراقبة العامة (Global supervision)، النوع الآخر هو المراقبة المحلية (Local supervision)، هذه الأخيرة تزيد من ليونة نظام المراقبة بشكل عام، كما توضح ذلك الأشكال في الفصل السابع من هذه الرسالة .

إتماداً على التصميم المقترح، يعالج بناء البرمجية المساعدة لأخذ القرارات بالارتكاز على مفاهيم Multi-agent systems، فيبدأ بعرض تركيبية (structure) تلك البرمجية، من ثم يعرض المودل لكل أجزاء تلك البرمجية باستخدام لغة UML التي تعتمد على طريقة Oriented object methodology، أخيراً نجد بعض التوضيحات عن كيفية تحقيق (Implementation) تلك البرمجية باستخدام لغة البرمجة C++ .

إن هذه البرمجية التعاونية (co-operative software) للمساعدة على التحكم والمراقبة واخذ القرارات عبر مودل وظيفي (functional model) للنظام الأوتوماتيكي-البشري. تمثل نوعاً من ما يمكن أن يُسمى الأتمتة المتكاملة ، حيث يتم الأخذ بعين الاعتبار الوجود البشري، ابتداءً من تصميم نظام المراقبة والمراقبة التحليلية، وإنهاءً بالترتيب الإرغونومي لمكان العمل.

إن إقتراحنا التصميم السابق لنظام المراقبة مع البرمجية المرفقة يشكل خطوة نحو إعادة تصميم المنظومات التكنولوجية المعقدة إعتماً على إعتبار العنصر البشري كجزء أساسي في حلقة الأتمتة الكاملة. فتطور التكنولوجيا المطرد سيؤدي إلى تضخم في مستوى الأتمتة، و بالنتيجة إلى تضخم في تعقيد المجموعات التكنولوجية وبالتالي إلى ازدياد حالات توقفها الطارئ وتخفيض مستوى أمانها. إذاً فعالية وأمان تلك المجموعات أمران لا ينفصلان ووجود العنصر البشري، بجانب البرمجيات الذكية، في حلقة التحكم أمر لا مفر منه.

•ثانياً : دراسة عملية تنفيذ المهمات الروبوتية (telerobotic)، أو الأعمال المنفذة مع روبوت. في هذا المجال يبدو أن تصميم أرغونومي لأماكن العمل ولشاشات المراقبة أمر حتمي، طبعاً مع دراسة تحليلية لإمكانية إدخال مستقر للعنصر البشري في حلقة التحكم. مع الاحترام، انطلاقاً من التصميم، للمقدرات البشرية، علماً أن ذلك الاحترام سيعكس على الأداء العام للمجموعات التكنولوجية.

إن أغلبية النتائج التي توصلنا إليها، قمنا بتأكيدتها باستخدام قاعدتين للمحاكاة ROBCAD و MAN ، كما قمنا بتطوير برنامج مراقبة ExpertWL، الذي يمكن من خلاله إدارة الإنذار (alarms) أو ما يسمى "التهيار" دوائر الإنذار في محطات توليد القدرة، فواحدة من مشاكل صالات التحكم في محطات التوليد هي الإنذار واكتشاف مصدره، من أجل المعالجة السريعة لمصدر العطل دون الاضطرار إلى إيقاف المجموعة بشكل كامل.

هذا العمل يشكل حلقة في سلسلة أعمال بدأت مع بداية التطور الهائل في تكنولوجيا المعلومات وستستمر طالما هناك تطور في هذه التكنولوجيا. إن هذا العمل مع كل الطموح بأن يكون عملاً مميزاً يبقى خطوة بسيطة لفهم الواقع والدفع به في اتجاه التطوير البناء. أخيراً إن ما يبرر هذا العمل هو الرغبة في الإرتقاء إلى المثالية وإلى فهم الواقع ولكن فهماً مختلفاً عن فهم الآخرين.

أحمد سكاف

في العاشر من شهر أذار لعام 2002

غرنوبل-فرنسا

A mes parents,  
A ma femme,  
A mon cher fils Yazan,

## Remerciements

Aucun travail ne peut être achevé sans que son objectif soit bien défini, que l'environnement qui favorise son développement soit acquis et que l'entourage de celui qui est chargé de ce travail soit présent et collaborant. Ce travail est le fruit de la réunion de ses trois éléments. Avant de commencer l'exposer, il m'est très agréable d'adresser mes sincères remerciements à toutes les personnes qui m'ont entouré durant la période de cette thèse, et qui m'ont permis de la mener à bien.

Tout d'abord, je tiens à adresser mes sincères remerciements à mon co-directeur de thèse, Monsieur Bertrand DAVID, Professeur de l'Ecole Centrale de Lyon, directeur du laboratoire ICTT, pour les réflexions, les suggestions et les conseils qui ont rendu ce travail plus complet et plus riche.

J'adresse aussi mes remerciements à mon directeur de thèse, Monsieur Bernard DESCOTES-GENON, Professeur de l'université Joseph Fourier pour sa gentillesse et ses conseils.

Ma profonde gratitude à Monsieur Zdenek BINDER, Ingénieur de Recherche au C.N.R.S. de Grenoble pour les discussions, les conseils et les encouragements qu'il a su me prodiguer tout au long de ce travail, et pour avoir accepté de participer à l'examen de ce mémoire.

Je tiens à remercier Monsieur Pierre LADET, Professeur, Directeur de recherche au C.N.R.S, d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse.

Que Monsieur Patrick GIRARD, Professeur du Laboratoire d'Informatique Scientifique et Industrielle, soit assuré de ma gratitude pour s'être intéressé à ce travail de recherche et pour avoir accepté d'en être rapporteur.

Tous mes remerciements et mes grâces sont adressés à Monsieur Patrick MILLOT, Professeur du Laboratoire Automatique et de Mécanique Industrielles et Humaines pour avoir accepté la charge de rapporter le contenu de ce mémoire et pour ses précieux conseils et suggestions.

Je remercie aussi tous les stagiaires que j'ai pu encadrer ou co-encadrer lors de cette thèse, pour leurs remarques et leur esprit d'équipe.

Merci aux amis et aux collègues de notre équipe de recherche et de notre LAG, ils méritent tous d'être remerciés. Je présente aussi tous mes remerciements aux équipes du personnel administratif et technique, pour leur soutien, leur sympathie et les discussions amicales que nous avons pu avoir.

Je n'oublie pas ici de remercier ma femme, celle qui a pu me supporter, m'aider et m'encourager tout au long de ce travail. Le mot merci est insuffisant pour exprimer ma gratitude envers elle, et je ne trouve pas d'autres mots.

Finalement, je remercie tous ceux et celles qui ont, de près ou de loin, participé à l'élaboration de ce mémoire.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	7
TABLE DES MATIERES .....	8
INTRODUCTION GENERALE.....	13
1. CHAPITRE 1 .....	17
SYSTEMES HOMME-MACHINE DANS DES PROCESSUS INDUSTRIELS COMPLEXES.....	18
1.1. Supervision et contrôle des processus industriels complexes.....	18
1.1.1. Caractéristiques de l'opérateur humain .....	19
1.1.2. L'homme et ses activités dans le système de supervision-conduite des processus .....	22
1.1.3. L'opérateur et les supports d'information dans la salle de contrôle .....	29
1.2. L'analyse ergonomique : l'ergonomie du poste de travail .....	31
1.3. Conception du système homme-machine .....	33
1.3.1. Opérateur ou superviseur : un système homme-machine à deux niveaux.....	33
1.3.2. Méthodologie de conception.....	35
1.4. Conclusion .....	38
2. CHAPITRE 2 .....	39
COOPÉRATION HOMME-MACHINE.....	40
2.1. Interaction et coopération .....	40
2.1.1. Situation d'interaction .....	41
2.1.2. Types d'interaction.....	42
2.1.3. Formes de coopération .....	44
2.1.4. Moyens de coopération.....	45
2.2. Coopération homme-machine dans un système de supervision .....	47
2.2.1. Coopération ou aide : les contours du concept.....	47
2.2.2. Les visions de coopération.....	49
2.2.3. Coopération homme-machine verticale.....	52
2.2.4. Coopération homme-machine horizontale.....	54
2.3. Coopération homme-robot dans un environnement opératoire .....	58
2.4. Conclusion .....	59
3. CHAPITRE 3 .....	60
OUTILS DE MODÉLISATION DU SYSTÈME HOMME-MACHINE .....	61
3.1. Modélisation des systèmes.....	61
3.1.1. Définition et utilisation des modèles .....	62
3.1.2. Principe de modélisation .....	62
3.1.3. Typologie de modèles.....	63
3.2. Analyse et modélisation du système technique .....	63
3.2.1. Les méthodes d'analyse du système en fonctionnement normal .....	64
3.3. Analyse et modélisation des tâches humaines .....	66
3.4. Conclusion .....	69
4. CHAPITRE 4 .....	70
PROBLÉMATIQUE DU DÉSASSEMBLAGE : PRÉSENTATION GÉNÉRALE.....	71
4.1. Le recyclage dans le cycle de vie des produits .....	72
4.1.1. Recyclage noble .....	72
4.1.2. Plate-forme REX.....	73

4.2. Les difficultés liées au processus de démontage.....	74
4.2.1. Le démontage : profit ou perte ?.....	74
4.2.2. Le passé du produit .....	75
4.2.3. L'accès aux informations concernant le produit .....	76
4.2.4. Les séquences de démontage .....	76
4.2.5. La supervision du démontage .....	76
4.3. Analyse de l'existant.....	77
4.3.1. Le terrain d'étude.....	77
4.3.2. Analyse du travail manuel .....	77
4.4. Conclusion .....	78
5. CHAPITRE 5 .....	80
MODÉLISATION DE LA CELLULE DE DÉSASSEMBLAGE .....	81
5.1. Présentation de la cellule .....	81
5.2. La stratégie de désassemblage .....	84
5.2.1. Les scénarios de déroulement du démontage .....	85
5.3. Modélisation de la cellule de désassemblage .....	89
5.3.1. Diagramme "cellule de désassemblage" (A) .....	89
5.3.2. Diagramme "Processus de désassemblage d'un produit " (A1).....	90
5.3.3. Diagramme "supervision et commande du processus" (A11) .....	92
5.3.4. Diagramme "supervision globale" (A111) .....	93
Diagramme "supervision locale" (A112).....	94
5.3.6. Diagramme "exécuter le processus" (A12).....	95
5.3.7. Diagramme "mettre en butée" (A121).....	96
5.3.8. Diagramme "exécuter" (A122) .....	97
5.3.9. Conclusion sur la modélisation de la cellule de désassemblage .....	98
5.4. Les classes des actions.....	98
5.5. Conclusion .....	99
6. CHAPITRE 6 .....	100
SYSTÈME HOMME-MACHINE DANS UNE CELLULE DE DÉSASSEMBLAGE .....	101
6.1. Conception de la cellule de désassemblage : une démarche globale .....	101
Méthodologie de conception .....	103
6.1.2. Spécification ergonomique et technique des actions du système .....	104
6.1.3. Critères considérés .....	108
6.2. Spécification des actions de la cellule de désassemblage.....	113
6.2.1. Modèle humain.....	114
6.2.2. Caractéristique technique de la machine .....	114
6.2.3. Analyse des actions .....	115
6.3. Les activités dans la cellule de désassemblage .....	117
6.3.1. Définition des activités .....	118
6.4. La réalisation coopérative de travail.....	122
6.5. Généralisation .....	123
6.5.1. Partage temps réel .....	127
6.5.2. Partage au démarrage du système .....	129
6.6. Conclusion .....	130
7. CHAPITRE 7 .....	131
ETUDES QUANTITATIVES : APPLICATION DISSOFT, EXPÉRIMENTATIONS	
ERGONOMIQUES .....	132
7.1. La réalisation du système superviseur- calculateur.....	132
7.1.1. L'architecture logicielle .....	133
7.1.2. Principe de coopération superviseur-calculateur .....	136

7.1.3. Réalisation de l'application DISSOFT .....	137
7.2. Conception ergonomique du système robot-opérateur.....	148
7.2.1. Les standards ergonomiques .....	148
7.2.2. Analyse de travail.....	150
7.3. Conclusion .....	159
8. CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	161
9. BIBLIOGRAPHIE.....	164

# iNTRODUCTION GENERALE

i

## INTRODUCTION GENERALE

Dans la société actuelle, l'informatisation a envahi de nombreux secteurs de la vie. Où que vous soyez, vous êtes, d'une manière ou d'une autre, amené à avoir une certaine relation avec une machine de plus en plus intelligente. Ces relations varient entre la respectabilité et la "haine", mais une chose est sûre, on se voit mal vivre sans cette merveille que nous avons inventé.

Au delà de cette "confrontation", l'homme est, d'une certaine manière, contraint de cohabiter avec un partenaire trop discipliné et trop algorithmique. L'homme et la machine sont côte à côte pour gérer et contrôler les systèmes que l'on utilise dans la vie de chaque jour, surtout des systèmes de grande complexité, où l'état d'esprit "homme-machine" est bien clair. Les activités de l'homme, définissant son rôle et sa place, se matérialisent soit par l'accomplissement du travail que le système technique est incapable d'accomplir, soit par la surveillance, la récupération d'aléas venant du système technique. La relation homme-machine devient ainsi plus qu'un partenariat, elle se transforme en couple (homme, machine) indissociable, dont la forme et l'organisation sont les garants du bon déroulement du processus de production. L'automatisation des processus industriels devient alors une sorte de réunion harmonieuse de deux entités pour le bien de tous. Mais par ceci il ne faut pas aller apprendre à la machine (dans le sens informatique du terme) la façon humaine de vivre, ni non plus forcer l'homme à adopter des rites machinaux. Par automatisation harmonieuse, on entend concevoir des systèmes de plus en plus socio-techniques, dans lesquels l'homme a sa vraie place.

Cette nouvelle vision de la conception est affichée comme une préoccupation principale de recherche du projet "RESTER PROPRE" soutenu par la région Rhône-Alpes; et elle constitue l'axe central de notre travail de thèse. Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'étude de la conception et de la mise en œuvre d'un système coopératif hommes-machines d'une cellule de désassemblage. Ce travail se justifie par un certain besoin de connaître davantage et de connaître différemment dans l'esprit de mieux faire.

En effet, l'élaboration du procédé de recyclage ne peut pas se réaliser sans prendre en compte l'Homme, dans la mesure où l'automatisation complète représenterait non seulement un investissement exorbitant mais aussi parce que la fiabilité et le succès d'un procédé entièrement automatisé ne pourraient pas être assurés. La variété et l'usure des produits à traiter, ainsi que les divers paramètres relatifs à l'implication de l'Homme dans un processus de désassemblage, augmentent sa complexité et réduisent la fiabilité des résultats escomptés sur les plans techniques, économiques et psychosociologiques. Ainsi la conception, l'organisation et la conduite de ce système de recyclage doivent apporter une certaine robustesse et flexibilité pour pouvoir accepter la variété des objets, des ressources humaines, et des modes d'exploitation. Cette robustesse garantira la maîtrise et la sûreté du fonctionnement de ce système dans les limites acceptables des indicateurs psycho-socio-économico-techniques.

La nature évolutive de notre objet d'étude et l'absence d'extériorité de recherche par rapport à cet objet nous contraignent à aborder ce travail d'une manière constructiviste que nous estimons répondra au mieux aux attentes pour lesquelles ce travail a été relancé.

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet "RESTER PROPRE", dont les préoccupations principales sont :

- Recyclage : l'analyse et l'étude du secteur du recyclage sous l'angle des disciplines présentes dans notre équipe de recherche.
- Conception du système homme-machine / Coopération homme-système : la réflexion, l'analyse et la mise en pratique d'une coopération Homme-Système aux différents niveaux du système socio-économique du secteur de recyclage, où la présence de l'homme en tant qu'élément actif est fondamentale.
- Organisation et conduite robuste, sûre et coopérative : l'amélioration de la sécurité de fonctionnement des systèmes, grâce à la robustesse de leur gestion et de leur conduite, en exploitant efficacement l'information disponible et en compensant les perturbations des différentes phases des procédés de transformation.

Ce mémoire de thèse est composé de sept chapitres et d'une conclusion auxquels s'ajoutent la bibliographie et les annexes.

Le premier chapitre présente l'état de l'art et le tour d'horizon du système homme machine dans les processus complexes ; il se décompose en trois volets. Le premier volet est consacré à la supervision et au contrôle de processus complexes du point de vue des activités humaines. Le deuxième volet est consacré aux activités physiques de l'homme dans des environnements robotisés et la conception ergonomique du poste de travail. Le dernier volet a pour objectif de présenter les niveaux d'interaction entre l'homme et la machine et de montrer la méthodologie de conception du système homme-machine actuellement utilisé.

Dans le deuxième chapitre on étudie l'interaction homme-machine pour déduire la coopération et sa mise en œuvre. Nous analysons les types et les moyens de coopération pour conclure sur une vision de la coopération pour les systèmes de supervision et pour les environnements opératoires.

Le troisième chapitre est entièrement consacré à l'analyse et à la modélisation du système homme-machine, en se focalisant sur les formalismes et les méthodes proposés pour l'analyse et la modélisation du système technique et des tâches humaines.

Le quatrième chapitre introduit et présente la problématique du désassemblage et les approches de solutions développées par les activités de "Rester Propre".

Dans le cinquième chapitre, nous proposons une structure d'automatisation de la cellule de désassemblage et nous exposons les scénarios de

désassemblage. Aussi, nous discutons de la modélisation de certaines fonctions de cette cellule et de leur mode de communication entre elles et avec le système physique.

Le sixième chapitre traite du problème de la conception du système homme-machine en proposant une méthodologie globale pour la conception. Ce chapitre se décompose en deux volets : le premier présente la méthodologie de conception, la démarche de spécification des actions et les critères techniques et économiques considérés. Le deuxième volet représente l'étude des actions de la cellule de désassemblage et la formulation de l'ensemble des activités de désassemblage.

Finalement, dans le premier volet du septième chapitre, nous présentons la réalisation du système superviseur-calculateur de la cellule de désassemblage, en soulignant l'architecture logicielle de l'application développée. Dans le deuxième volet, nous discutons de la conception ergonomique du système robot-opérateur et son impact sur la performance globale de la cellule de désassemblage.

**L'homme, la machine, l'environnement.**

Chapitre

1

---

## Systèmes homme-machine dans des processus industriels complexes

Ce chapitre initial a pour objectif de présenter l'état de l'art et de faire le tour d'horizon du système homme machine dans les processus complexes ; il se décompose en trois volets. Le premier sera consacré à la supervision et au contrôle de processus complexes du point de vue des activités humaines. Pour cela nous commencerons par un survol des caractéristiques de l'opérateur humain. Ensuite nous associerons les activités humaines de conduite et de supervision avec les modèles comportementaux pour dégager des besoins et arriver à définir la notion d'aide aux opérateurs dans les salles de contrôle.

Le deuxième volet est consacré aux activités physiques de l'homme dans des environnements robotisés et la conception ergonomique du poste de travail. Le dernier volet a pour objectif de présenter les niveaux d'interaction entre l'homme et la machine et de montrer la méthodologie de conception du système homme-machine proposée par Millot [Millot,1996].

### 1.1. Supervision et contrôle des processus industriels complexes

L'homme, malgré la progression de l'automatisation, occupe une position clef dans la salle de supervision et de contrôle des procédés automatisés. La supervision d'un processus complexe est un domaine de croisement de nombreuses disciplines, commençant par l'automatique et l'informatique, passant par l'ergonomie, la psychologie cognitive, et finissant par la sociologie. La supervision, et par conséquent la conduite, sont centrées sur l'homme, celui-ci étant amené à gérer des informations transformées et abstraites, visuelles et/ou sonores. Ainsi une connaissance des caractéristiques de l'homme constitue une étape importante dans l'analyse de ses activités de supervision et de contrôle.

## 1.1.1. Caractéristiques de l'opérateur humain

### 1.1.1.1. Introduction

L'intervention de l'homme sur un système est conditionnée par la mise à sa disposition des outils adaptés à ses caractéristiques. Une connaissance de ces caractéristiques est donc une nécessité, à priori, dans l'étape de conception des outils d'aide à l'opérateur. Cette connaissance est principalement dégagée par différentes approches des sciences humaines (ergonomie, psychologie cognitive, neurologie, sociologie...). En réalité, le point commun de ces approches est le fait que l'homme a une capacité exceptionnelle de perception, interprétation, réflexion et d'action sur son environnement. Les fonctions de perception (les cinq sens) de l'environnement sont : la vue, l'ouïe, le toucher, le goût et l'odorat. Après une interprétation de l'environnement reçu et une réflexion sur ses éléments, le cerveau humain, lieu de toute puissance humaine, passe à l'action sur l'environnement par des gestes, des déplacements et des ordres.

Caractériser l'être humain n'est pas une tâche facile, les secrets de son corps et de son cerveau sont peu dévoilés. Malgré tout, on peut dénombrer ses points de faiblesse pour conclure de quoi il est capable, tout en sachant que cette caractérisation est générale, vue la grande diversité des individus.

### 1.1.1.2. Capacité limitée

Plusieurs auteurs en ergonomie et psychologie [Serandio,1972], [Gopher, 1986] (cités dans Berger [Berger,1992]) ont montré que l'homme ne peut traiter qu'une partie de l'information qui lui est présentée, si la quantité de l'information est surélevée. La limite de la quantité d'information que l'individu est en mesure de traiter, dépend de l'individu et du contexte. la conclusion est que, pour profiter de la capacité de perception et de traitement maximal, il faut présenter l'information dans des limites convenables.

### 1.1.1.3. Vigilance

Si la capacité limitée de l'opérateur incite à ne pas dépasser un seuil de quantité d'information véhiculée vers lui, sa vigilance diminue en minimisant la quantité d'information en dessous d'un seuil donné. Ainsi, dans un environnement émettant peu d'information, l'opérateur aura du mal à soutenir un niveau d'attention constant, surtout pendant une durée prolongée [Lambert, 1999].

La vigilance a été définie par Mackworth cité dans [Berger,1992] comme un état d'attente dans lequel l'opérateur est prêt à détecter et à répondre à certaines petites variations survenant à intervalles de temps indéterminés dans un environnement. Cette définition s'interprète comme suit : le fait que la durée de l'ensemble de détection-réponse d'un stimulus\* tend à être longue, signifie que l'opérateur est en train de passer dans une phase de sous-vigilance.

---

\* Facteur (externe ou interne) susceptible de déclencher la réaction d'un système physiologique ou psychologique.

Enfin, il faut souligner que les tâches monotones (répétitives, peu provocantes) représentent une cause principale de sous-vigilance. Ainsi pour échapper à la sous-vigilance, cela passe tout d'abord par l'éloignement de l'opérateur ce type de tâches.

#### 1.1.1.4. Stress

Le stress est un état dans lequel les processus mentaux (et en conséquence les processus physiques) de l'être humain sont perturbés. La cause principale de cet état est l'information perçue de l'enveloppement (en quantité, en qualité...). [Hachette , 2000] donne la définition suivante du stress : *Ensemble des perturbations physiologiques et métaboliques provoquées dans l'organisme par des agents agresseurs variés (choc traumatique, chirurgical, émotion, froid, etc.).*

La présence de l'homme dans un milieu de travail exige une faculté mentale importante pour accomplir ses tâches. Quelle que soit le genre de tâches (basées sur le réflexe ou sur la connaissance), l'effet perturbateur du stress a été montré par plusieurs auteurs. Citons ici Entin et al. [Entin, 1990] qui ont montré qu'une décision prise en l'absence de stress est plus rationnelle qu'une décision prise en présence de stress.

Une surcharge informationnelle provoque une situation de stress, dans laquelle l'opérateur commence à avoir des difficultés à repérer l'information pertinente pour sa tâche. Ceci entraîne l'opérateur de plus en plus dans des situations d'impasse, provoquant ainsi une diminution de sa performance et en conséquence de la qualité de ses décisions.

En effet, le stress touche et déstabilise les diverses fonctions cognitives de l'homme. Ces fonctions sont utilisées par l'être humain pour boucler le cycle de gestion de connaissances, commençant par la concentration, le raisonnement rationnel et finissant par l'accumulation de la connaissance. Donc, une fois ces fonctions déstabilisées, tout le cycle de connaissance est déstabilisé.

#### 1.1.1.5. Activité, efficacité, erreurs

Entre l'activité et l'efficacité, il y a une certaine distance qui est déterminée par les trois caractéristiques humaines annoncées ci-dessus : capacité limitée, vigilance et stress. Un opérateur actif n'est pas toujours un opérateur efficace. Plusieurs auteurs (Johannsen, Wiener...) parlent de trois zones caractéristiques de la relation activité-efficacité :

- 1) Zone d'activité faible : l'opérateur est peu actif, et donc sa vigilance est réduite (les effets de stress et de capacité sont négligés). Cela entraîne, comme nous l'avons vu précédemment, une mauvaise qualité de travail et donc une mauvaise efficacité.
- 2) Zone d'activité optimale : l'opérateur est actif, sa vigilance est maintenue à un niveau optimal, l'effet de stress est minimal, il n'y a pas de dépassement de sa capacité. Tout ceci favorise une efficacité optimale.

- 3) Zone d'activité surélevée : l'opérateur est suractivé, la vigilance est réduite, il y a dépassement de la capacité qui entraîne les effets de stress ce qui perturbe la vigilance. Ceci aboutit à une dégradation de l'efficacité de l'opérateur.

En effet, entre l'état actif de l'opérateur et son état efficace il y a un passage à faire, et à chaque fois que l'opérateur fait ce passage il commet de nombreuses erreurs. Au sujet des erreurs humaines, il y a beaucoup de travaux ; nous renvoyons le lecteur à [Jambon, 1996] qui traite le problème du point de vue ingénierie de l'interaction homme-machine.

#### 1.1.1.6. Influence du travail et adaptation

L'identification des facteurs influençant la performance de l'opérateur constitue une étape importante dans la conception du système homme-machine et particulièrement pour la conception des outils d'aide aux opérateurs. En effet, la relation entre tâche, opérateur, contexte et performance se manifeste quand il y a un travail à réaliser. Nous ne pouvons pas imaginer, par exemple, un dactylographe même très qualifié en train d'écrire un texte (réaliser un travail) sur une machine se trouvant sur une table oscillante. Donc la performance dépend non seulement de l'opérateur et de sa tâche, mais aussi du contexte de travail.

Les ergonomes ont défini un ensemble global de facteurs qui influencent la qualité du travail humain. Ces facteurs sont répartis en huit classes [Stanton, 1995]:

- 1) Type de tâches : tâches de perception, d'attention, d'action (physique), de mémorisation et de vigilance.
- 2) Caractéristique des tâches : fréquence, répétitivité, criticité, continuité, durée, charge de travail et interactivité avec une autre tâche.
- 3) Caractéristique des interfaces homme machine : localisation, lisibilité, identification, comptabilité, facilité d'utilisation, fiabilité, sens et retour d'informations.
- 4) Facteurs intra-individuels : capacité, entraînement, expérience, habilités, connaissance, personnalité, condition physique, comportement et motivation.
- 5) Facteurs socio-techniques : heure de travail/pauses, disponibilité des ressources, action des autres agents, pression sociale, organisation, structure de l'équipe, communication, autorité, responsabilité et intérêt.
- 6) Cause de stress : pression temporelle, charge de travail, risque, monotonie, fatigue/douleur/inconfort, conflits, isolement, perturbations et vibration/bruit/luminosité/température.
- 7) Instruction et procédures : précision, complétude, clarté, sens, lisibilité, révision, facilité d'utilisation, applicabilité, format, niveau de détails, sélection et localisation.

- 8) Environnement : espace de travail, température, humidité, bruit, vibration et luminosité.

Ces huit classes, par leurs attributs, favorisent ou défavorisent le travail humain. Ainsi, trouver les bonnes valeurs de ces attributs contribue à l'amélioration de la performance du système homme-machine. Bien évidemment, nous n'oublions pas ici de rappeler le fait que, grâce à la capacité d'adaptation de l'être humain, ces valeurs peuvent varier sans pour autant dépasser une certaine limite.

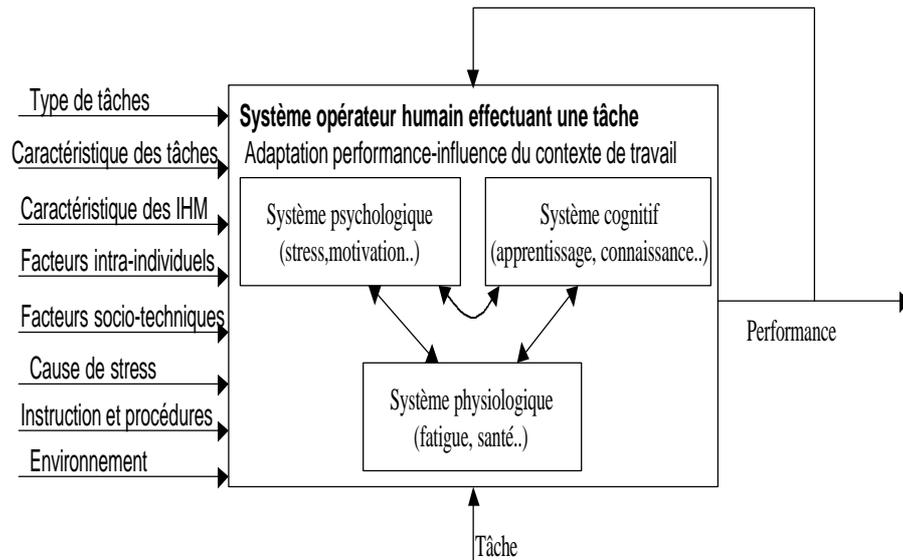


Figure 1.1 : Système opérateur humain effectuant une tâche

En effet, le système "opérateur humain effectuant une tâche" [Millot, 1988] est un système complexe, adaptatif, et il se décompose en trois sous-systèmes : cognitif, psychologique et physiologique. La Figure 1.1 représente le système opérateur humain avec ses sous-systèmes et ses entrées qui sont les huit classes citées ci-dessus.

### 1.1.2. L'homme et ses activités dans le système de supervision-conduite des processus

Eclaircir le titre de ce volet semble nécessaire avant de développer son sujet. En effet, il convient, tout d'abord, de se faire une idée sur chaque mot-clé inclus dans ce titre. Notre intention est donc de donner une version de la définition de chaque mot que nous adaptons, autrement dit notre vision ou conviction.

La définition de l'activité humaine donnée par [Hachette, 1997] nous paraît la plus adaptée et la plus adéquate à notre vision ; nous considérons donc que une activité humaine est "l'ensemble d'actions et d'opérations humaines visant un but déterminé". Concernant le terme *supervision-conduite*, nous adaptons la distinction proposée par Duthoit et al. dans [Duthoit, 1997] annonçant qu'il s'agit d'un ensemble de procédures et outils qui permet à l'homme de prendre les décisions et de les appliquer. Le terme processus est employé pour exprimer le fait que nous avons une relation avec un système technique

(automatisé) de transformation, ou un procédé de transformation par la machine (l'automatisme).

#### 1.1.2.1. Activités de supervision-conduite

En réalité, on ne peut pas parler d'une activité humaine de supervision-conduite d'un système automatisé sans évoquer le contexte (besoin) de cette activité, sinon on parle d'activités courantes et banalisées qui sont les activités de perception, les activités mentales et les motrices.

Sheridan [Sheridan,1988] a distingué trois situations dans lesquelles un système automatisé peut se trouver :

- Situation normale : le système est stable, ses attributs sont nominaux
- Situation de transition : le système est stable mais il passe d'un état de fonctionnement à un autre état.
- Situation dégradée : le système est instable, ses attributs sont très loin de leurs valeurs nominales.

Selon chaque situation Rasmussen (1983) a spécifié trois classes d'activités qui sont respectivement :

- Les activités de surveillance : l'opérateur surveille le processus, son organisme est en alerte permanente par son propre système perceptif. Cette alerte a pour objectif d'une part de détecter un fonctionnement anormal et d'autre part de garder le processus dans son état nominal. La représentation mentale du procédé, chez l'opérateur, est actualisée en permanence, ce qui lui permet de prendre une bonne décision lorsque le système passe dans une situation de fonctionnement dégradé ou lorsqu'il faut faire transiter le système d'un état à un autre. Cette actualisation de l'image mentale est, en effet, le produit d'un ensemble d'activités purement perceptives.
- Les activités de diagnostic : les informations collectées pendant les activités de surveillance permettent à l'opérateur de diagnostiquer l'état du système. Ainsi l'opérateur sait expliquer les causes de la situation actuelle du système, et surtout les conséquences futures. Les moyens employés par l'opérateur pour réaliser ces activités sont principalement mentales, basés sur la connaissance et la logique.
- Les activités de planification : une fois que le diagnostic est fait, son résultat nécessite une intervention correctrice ; l'opérateur débute une planification de ses actions par rapport aux objectifs. C'est à lui de faire le choix entre plusieurs alternatives d'actions, d'évaluer les conséquences de son choix et ensuite d'affiner son plan d'action.

Ce classement d'activités humaines dépend forcément du degré d'automatisation du système. Les activités humaines varient donc ; pour cela il convient d'examiner les conséquences de l'automatisation de la tâche de supervision-conduite, et de prendre en considération le résultat de la

cohabitation de différents niveaux d'automatisation sur les activités humaines de la supervision-conduite.

1.1.2.2. Modèles comportementaux pour la résolution de problèmes

Face à cette variété d'activités humaines dans la salle de contrôle, plusieurs auteurs ont tenté de résumer ces activités par des modèles décrivant les démarches comportementales de résolution de problèmes.

Rasmussen [1983] a distingué trois démarches comportementales face à une situation. Ces démarches ainsi qu'une illustration de leurs interactions sont montrées dans la Figure 1.2

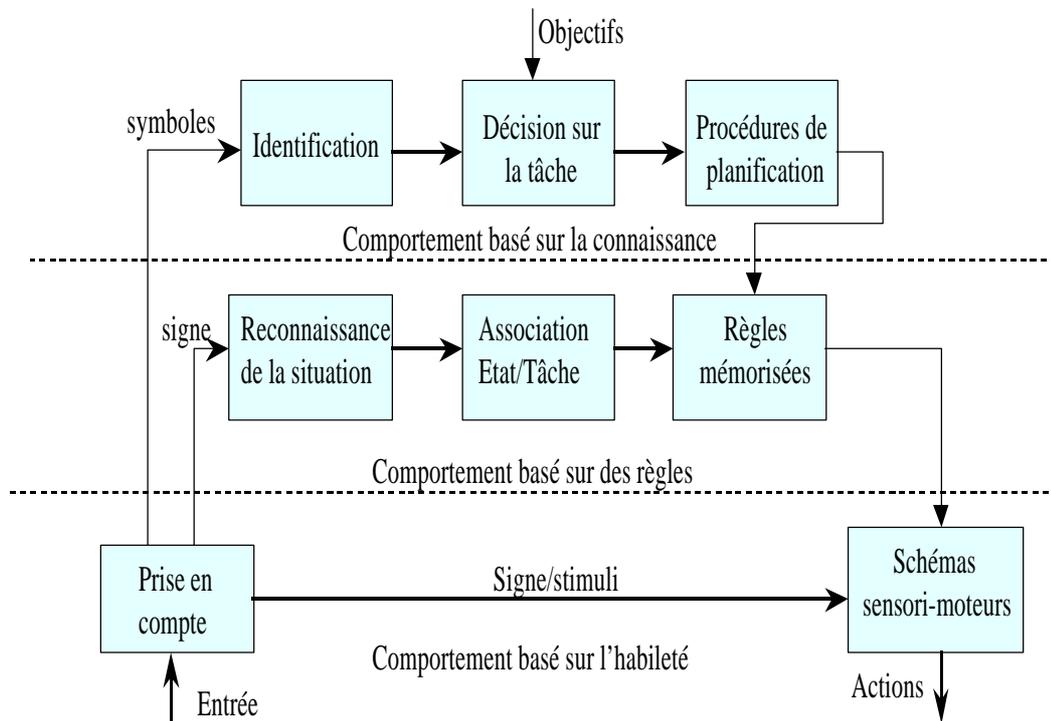


Figure 1.2 : Trois démarches comportementales de l'opérateur [Rasmussen, 1983]

La première démarche adoptée par l'opérateur est le comportement basé sur l'habileté, où il exécute son travail d'une manière routinière en ne se basant que sur le réflexe sans aucune utilisation de patrimoine cognitif.

La deuxième démarche est le comportement basé sur les règles. Ici l'opérateur, face à une situation connue, utilise les règles prédéfinies, dans son patrimoine cognitif, après une association de l'état du système avec les activités nécessaires de résolution.

La dernière démarche est le comportement basé sur la connaissance. L'opérateur est contraint, par le fait qu'il est face à une nouvelle situation, de recourir à ses connaissances pour élaborer une nouvelle stratégie de résolution.

Hoc et Amalberti [Hoc, 1996] ont proposé un modèle incluant le modèle de Rasmussen présenté ci-dessus et l'échelle double de Rasmussen (révisée par Hoc). A notre avis ce modèle est un modèle comportemental global de résolution du problème. Les trois démarches du modèle de Rasmussen sont représentés par trois rectangles à doubles bordures (voir Figure 1.3). La représentation occurrente de la situation, rectangle du milieu, est le centre de ce modèle. C'est elle qui détermine quel module de l'échelle double de Rasmussen (représenté par des ellipses dans la figure) sera mise en œuvre.

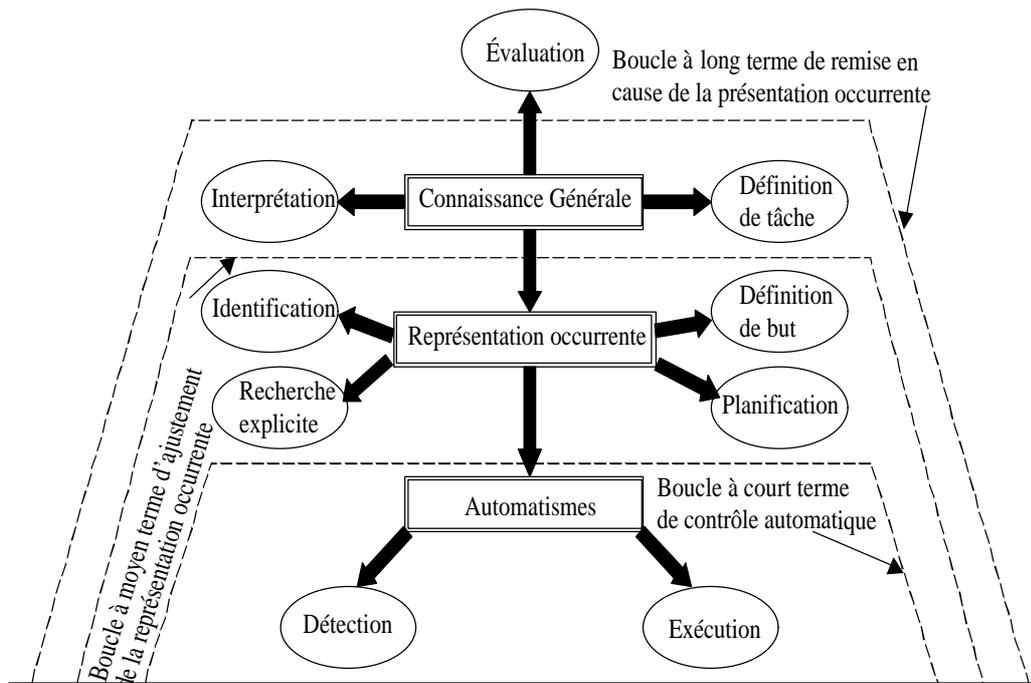


Figure 1.3 : Modèle de résolution du problème [Hoc et Amalberti, 1996]

La représentation occurrente de la situation comprend trois facettes : une représentation du processus et de ses buts, une représentation des actions possibles et une représentation des ressources disponibles.

Les trois boucles de la Figure 1.3 correspondent, d'une certaine façon, aux trois démarches de Rasmussen (Figure 1.2) :

- 1) Une boucle à court terme de contrôle automatique: la réponse de l'opérateur est disponible immédiatement après une perception de stimulus, donc un effet de réflexe. Hoc suppose que *"cette boucle est suffisante quand la représentation occurrente de la situation fournit une prédiction presque parfaite de son évolution"*.
- 2) Une boucle à moyen terme d'ajustement de la représentation occurrente: cette boucle est mise en œuvre quand la représentation occurrente est suffisante pour agir, mais insuffisante pour prendre une décision *"pour assurer une cohérence complète"*. Un ajustement de la représentation occurrente est effectué durant cette boucle.

- 3) Une boucle à long terme de remise en cause de la représentation occurrente : l'opérateur ne se sert pas de la représentation actuelle, il s'appuie sur des connaissances générales pour modifier, ou complètement changer, la représentation occurrente. Puis la première et/ou la deuxième boucle sera mise en œuvre.

Nous nous sommes limités à ne présenter que deux modèles de comportements humains pour la résolution du problème (ou en d'autres termes pour réaliser une activité donnée) sachant que d'autres modèles existent dans la littérature. Nous avons choisi les modèles les plus généraux qui peuvent expliquer les mécanismes décisionnels de l'homme lorsqu'il exécute une activité, et les plus utilisés par les chercheurs.

#### 1.1.2.3. L'impact de l'automatisation sur l'homme et ses activités

Le rôle de l'opérateur humain, dans les systèmes technologiques, dépend du degré de développement technologique de ces systèmes. L'accroissement du niveau d'automatisation modifie la nature des tâches humaines et la manière de les réaliser. Cette automatisation fait apparaître de nouvelles tâches et en même temps en fait disparaître d'autres.

On a l'habitude, quand on parle d'automatisation, d'évoquer deux modes de conduite : soit un mode manuel en sous-entendant que l'automatisme n'existe pas ou du moins qu'il n'est pas dans un état de fonctionnement. Soit un mode automatisé où l'automatisme existe et fonctionne. Ces deux modes sont comparés du point de vue de leur impact sur l'activité humaine :

- Mode manuel : l'opérateur est censé fermer la boucle de commande du processus, il exerce des actions directes sur lui (processus). Grosjean [Grosjean, 1999] a caractérisé le travail humain dans ce mode par *"le maintien d'un suivi constant de l'état du processus lié à son implication directe dans la boucle de régulation"*.
- Mode automatisé : c'est un organe de contrôle automatique qui remplace l'homme, et qui ferme donc la boucle de commande. L'opérateur, dans ce mode, surveille la fonctionnalité de cet organe et ajuste ses paramètres ; l'opérateur se trouve donc hors de la boucle.

Il est vrai que l'opérateur est soulagé lorsqu'on le place hors de la boucle de commande, mais ce passage du manuel à l'automatique lui coûte un élargissement de sa responsabilité d'une part et de la modification de ses habilités cognitives et même physiques d'autre part. Grosjean (1999) a recensé quatre effets de l'automatisation (l'évolution technologique selon lui) :

- 1) Perte d'habilités perceptivo-cognitives : causée par le fait que l'opérateur ne les utilise pas en situation stable du système.
- 2) Perte d'habilités cognitives : ceci est le résultat de l'incapacité de construire et de mettre à jour une représentation occurrente du processus. Cette incapacité vient du fait que l'opérateur n'agit plus en continu sur le processus.

- 3) Perte de l'habilité d'anticiper : le fait que l'opérateur perd l'habilité cognitive et perceptivo-cognitive conduit à une perte d'anticipation. Il lui est difficile d'effectuer des prévisions sur l'évaluation de ces activités et les conséquences d'une action donnée.
- 4) Difficultés de maintien de l'attention : l'automatisation entraîne une chute d'attention chez les opérateurs. En effet, il est difficile de maintenir l'attention d'un être humain sur un processus où il ne se passe rien pendant des durées excessives.

Ces effets, disons négatifs, de l'automatisation nous incitent à la rendre plus appropriée en développant des outils d'aide aux opérateurs. Ces outils ont pour objectif de maintenir l'opérateur dans un état productif.

#### 1.1.2.4. Les besoins humains en supervision et en conduite

Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'automatisation pose des problèmes au niveau de l'homme et de ses activités. Ainsi, on peut naturellement supposer que les besoins humains sont liés aux solutions de ces problèmes. L'opérateur a donc besoin d'outils qui favorisent ses fonctions cognitives; cela exige des outils améliorant la perception de l'homme ainsi que le maintien de son attention. En plus, l'opérateur a besoin d'outils qui l'aident à construire sa représentation mentale du processus et à exploiter ses capacités d'anticipation.

Sheridan [Sheridan,1988] a distingué, dans son modèle d'activité, douze fonctions prises en charge par le superviseur. Il a associé à chacune de ces fonctions un outil d'assistance<sup>1</sup> répondant à ses besoins. Le Tableau 1-1, montre les activités principales d'un superviseur, selon le modèle de Sheridan, avec leurs douze fonctions et l'assistance correspondante pour chaque fonction.

Les besoins humains sont donc des assistances aidant à réaliser leurs tâches. Mais pourquoi cette aide ? Les réponses peuvent être très diverses :

- soit la réalisation de la tâche par l'homme est impossible,
- soit la performance de la réalisation n'est pas satisfaisante,
- soit la tâche est trop risquée pour qu'elle soit réalisée par l'homme.

Quoi qu'il en soit, de ces besoins est né la notion d'aide (ou d'assistance) aux opérateurs, et cette aide consiste à participer à la réalisation de la tâche.

#### 1.1.2.5. Jusqu'où automatiser

De tout ce qui a été exposé dans les paragraphes précédents, une question légitime se pose : jusqu'où automatiser ? Pour répondre à cette question il faut

---

<sup>1</sup> La notion d'assistance est utilisée, par certains auteurs, pour exprimer le fait qu'un système aide (de manière discrète ou continue) un autre pour réaliser une tâche, d'autres auteurs utilisent la notion d'aide. Dans ce manuscrit, nous utilisons aussi ces deux notions de manière identique.

en poser une autre : pourquoi veut-on automatiser ? En continuation du paragraphe précédent, on peut souhaiter que l'automatisation cible à :

- débarrasser l'homme de tâches qui constituent un risque pour lui, ou tout simplement, qui ne sont pas réalisables par l'homme pour une raison ou une autre ;
- optimiser la performance du système, où l'homme est censé travailler avec la machine.

<b>Activité</b>	<b>Fonction</b>	<b>Assistance</b>
<b>Planification</b>	Comprendre le procédé contrôlé	Simulateur d'entraînement
	Satisfaire les objectifs	Aide aux choix des objectifs
	Définir une stratégie générale	Procédures d'entraînement et d'aide à la construction de stratégies optimales
<b>Transmission des commandes</b>	Sélectionner les procédures	Bibliothèques de procédures
	Transmettre les commandes	Aide à l'édition des commandes
<b>Supervision</b>	Acquérir les informations	Aide à l'évaluation et à l'agrégation des mesures
	Estimer l'état du procédé en fonction de son état présent et des actions de contrôle passées	Aide à l'évaluation de l'état du procédé
	Détecter et diagnostiquer les dysfonctionnements	Aide à la détection et au diagnostic des pannes
<b>Intervention</b>	En cas de panne, exécuter les procédures d'abandon (appel à la maintenance)	Aider à l'exécution des procédures d'abandon
	En cas d'erreur sans gravité, rectifier	Aider à la rectification des erreurs
	En cas de situation normale, continuer la procédure	Aider au suivi de la procédure
<b>Apprentissage</b>	Enregistrer les événements	Enregistrements automatiques
	Analyser les situations	Aide à l'analyse

**Tableau 1-1 : Outils d'assistance et d'aide aux activités de supervision [Sheridan,1988]**

On pourrait répondre à la question initiale avec une certitude maximale que, dans le premier cas, il est indispensable d'introduire l'automatisation dite intégrale [Berger,1992]. Dans le deuxième cas, une automatisation élargie autant que possible (ce que le progrès permettra) en respectant les points suivants :

- 1) Les caractéristiques humaines citées au début de ce chapitre (paragraphe 1.1.1), sinon l'opérateur échoue dans sa tâche et en conséquence l'automatisation manque ses objectifs.
- 2) Le soutien, en permanence, de la représentation occurrente du processus, sans quoi l'opérateur sera incapable de faire fonctionner son modèle comportemental de résolution du problème (paragraphe 1.1.2.2). Ceci aboutit aux mêmes conséquences que le premier point.

- 3) La variation (non stabilité) de l'homme en fonction du temps et de l'individu. Ceci nécessite que la machine intègre un modèle (au moins approximatif) de l'être humain.

Ainsi, dans un seul système (procédé, processus) les deux types d'automatisation intégrale et élargie peuvent exister. Donc, même en parlant du système homme-machine, rien n'empêche qu'une automatisation intégrale existe. En conséquence, faire cohabiter les deux types est une nécessité et élargir le deuxième type vers une intégration parfaite du composant humain (dans le système entier) est aussi une deuxième nécessité.

### 1.1.3. L'opérateur et les supports d'information dans la salle de contrôle

Les activités humaines de supervision-conduite se passent dans les salles de contrôle. Ces salles constituent le cœur du processus (usine). Elles contiennent un ensemble considérable d'informations mises à la disposition de l'opérateur : des informations sur l'état actuel du processus, son historique, ses objectifs planifiés et programmés pour l'avenir proche et lointain, et les modifications de son régime de fonctionnement.

Dans cette partie du chapitre, nous voulons concrétiser la compréhension de la place et du rôle de l'opérateur humain dans le système homme-machine. Tout d'abord nous essayons de faire la correspondance entre les tâches humaines dans la salle de contrôle et les modèles de comportement humain exposés auparavant dans ce chapitre. Ensuite, nous montrons l'historique de l'évolution des supports d'information dans les salles en essayant de se projeter dans l'avenir pour voir comment seront ces supports. Enfin, une brève conclusion sur les effets de ces supports sera donnée.

#### 1.1.3.1. Tâches humaines dans la salle de contrôle

Dans les salles de contrôle, on distingue deux types d'interactions : homme-processus via les supports d'informations et homme-homme. Il est donc naturel de parler des tâches humaines envers le processus et des tâches humaines envers l'équipe de travail. Par exemple, une tâche de correction d'un paramètre décalé du processus par un opérateur est précédée d'une négociation entre les membres de l'équipe dans la salle.

Les activités de l'opérateur envers les autres membres de l'équipe sont essentiellement des activités de communication verbale (rarement par signes). Kolski [Kolski, 1997] a recensé les thèmes qui sont les sujets de communication. Dans le Tableau 1-2 sont montrés ces thèmes avec leurs instances. Ces différents thèmes de communication servent, selon Kolski, de support d'information et en qualité de mémoire collective. Cette mémoire est rafraîchit par l'opérateur et constitue une source de d'information mise à la disposition de l'opérateur à tout moment.

La deuxième catégorie de tâches dans la salle de contrôle est, comme nous l'avons cité ci-dessus, les tâches de l'opérateur envers le processus. Selon l'état du processus, ces tâches sont regroupées en quatre classes [Rouse, 1983] :

- les tâches de transition,
- les tâches de contrôle et de suivi de l'installation,
- les tâches de défaut et de diagnostic,
- les tâches de compensation et de correction.

<b>Thème</b>	<b>Instance</b>
Des faits	Annonce d'incidents, Anomalies, Début et fin d'opération, Man œuvre critique.
Des données chiffrées	Caractéristique de production, Analyse, Délais d'intervention, Durées d'opération
Des tendances	Dérive d'un paramètre, Extrapolation d'une évolution
Des estimations	Présentation d'une situation par rapport à un planning, Renseignement sur la durée probable d'une action
Des appréciations	Jugement, perception de phénomènes pertinents
Des références au passé	Circonstance de la production et de l'entretien des installations, Expliquer un problème, Similitude des situations
Des plaisanteries	Jeux de mots, Blagues
Des réactions	Critique, adhésion, recherche d'un compromis, Négociation

**Tableau 1-2 : les thèmes de la communication et leurs instances [Kolski, 1997]**

Pour chaque tâche, l'opérateur fait fonctionner son modèle de comportement, expliqué dans 1.1.2.2 (modèle de Rasmussen et son extension de Hoc et Amalberti), et selon le cas, il applique une démarche parmi les trois de ce modèle. La représentation occurrente du processus doit être toujours soutenue, et c'est là que les activités de communication dans l'équipe et le support d'information jouent un rôle capital. Dans le paragraphe suivant, un aperçu de ce support d'information est exposé.

#### 1.1.3.2. L'évolution des supports d'information dans les salles

L'évolution des supports d'information se résume en quatre étapes reflétant l'évolution de la technologie de l'information. Ci-après, nous parcourons brièvement ces quatre étapes qui sont citées et détaillées dans [Kolski, 1997] :

- 1) Le parcours des installations : l'opérateur est obligé de faire le parcours de l'installation et au passage de faire le contrôle. L'interaction opérateur-installation est directe, le support est primitif (des appareils de mesure).
- 2) Les panneaux synoptiques muraux : c'est le début de la centralisation de l'information sur l'installation. Les appareils de mesures sont resté sur l'installation, et leurs données ont été ramenées dans les salles de contrôle constituant ainsi un flux d'information sur les paramètres de l'installation. Ceci a permis à l'opérateur de détecter les variations de ces paramètres et de contrôler le processus.
- 3) Les écrans de visualisation : dans le souci d'alléger la charge mentale de l'opérateur (qui résulte d'énormes quantités d'informations), des écrans de visualisation avec des progiciels dédiés à la supervision ont été introduits à côté des panneaux synoptiques. Ainsi l'installation est contrôlée par deux

éléments : l'opérateur humain et l'outil informatique. Ceci a introduit une nouvelle tâche pour l'opérateur qui est la surveillance du surveillant.

- 4) La vidéo projection des informations : cette étape est le résultat naturel de l'évolution de l'outil informatique, s'appuyant sur le multimédia. L'opérateur a donc un support temps réel reçu pour un plus grand nombre d'états, et une animation de l'image (schéma) du processus enrichissant la compréhension de l'opérateur. Ce mode de support est de plus en plus utilisé dans les salles de contrôle.



**Figure 1.4 : Salle de contrôle actuelle**

Les supports d'information dans les salles de contrôle progressent de plus en plus vers les moyens modernes de l'informatique. Ceci est censé faciliter le travail coopératif entre les membres de l'équipe d'une part (entre eux) et la machine d'autre part. La Figure 1.4 montre une salle actuelle de contrôle.

#### 1.1.3.3. L'homme face aux supports d'information

La modernisation des supports d'information apporte non seulement l'aide aux opérateurs mais aussi de nouveaux problèmes. Elle exige, en premier lieu, un niveau de qualification assez élevé, ce qui demande un apprentissage de durée importante. Deuxièmement, la complexité de cette nouvelle technologie d'information met l'opérateur face à des problèmes psychologiques qui peuvent amener à trois types de réactions [Kolski,1997]: une adaptation de cette technologie, un rejet, ou une demande de certaines modifications de ses configurations. Suite à ces réactions, apparaît une nécessité de réadaptation de l'homme à la technologie ou inversement, ce qui demande une re-formation et /ou re-conception.

## 1.2. L'analyse ergonomique : l'ergonomie du poste de travail

Quand on parle d'automatisation d'un système industriel, on sous-entend que le rôle de l'homme sera placé dans la boucle de conduite et de la surveillance de ce système. Il est donc considéré que l'homme n'existe plus dans la boucle opérante du système. Ce fait n'est pas toujours valable, l'homme fait toujours partie de la boucle opérante, il réalise des tâches manuelles (non

automatisables pour des raisons fortes variées) dans son espace ou dans un espace partagé avec une machine. Cette présence nous contraint, dans l'étape de conception du système, de prendre en compte des éléments ergonomiques. Donc, une analyse ergonomique est nécessaire.

L'analyse ergonomique est fondée sur l'analyse de l'activité (physique) de travail, ce qui permet d'identifier les tâches à réaliser et les contraintes de nature humaine, matérielles ou organisationnelles pesant sur la réalisation. Ceci permet d'assurer d'une part une conception ergonomique adéquate du poste de travail et d'autre part une meilleure prise en compte des caractéristiques du fonctionnement de l'homme au travail [Alauzet, 1998].

La simulation ergonomique constitue l'outil de l'analyse ergonomique. La simulation se focalisant sur l'interaction qui existe, au cours d'une activité de travail, entre une personne et une machine en prenant en compte l'environnement. L'objectif direct de la simulation ergonomique est de connaître : les contraintes de travail posées sur les individus, les marges de manœuvre pouvant être envisagées pendant l'exécution des tâches, et les moyens qui peuvent faciliter le travail de ces individus. Cet objectif conduit à ce qui peut être appelé "objectif indirect" qui est l'aide à la conception de postes (ou de situation) de travail, par la modélisation, la prédiction et la simulation. Ceci est basé principalement sur une analyse ergonomique des mouvements et des postures des individus [Aptel, 1995], [Robcad/Man, 1998].

Pour réaliser cette simulation, un outil informatique est nécessaire. Cet outil repose sur la définition de trois modèles : un modèle de l'opérateur, un modèle de l'espace de travail, un modèle de l'activité de l'opérateur intégrant les aspects dynamiques d'interaction opérateur-machine. Les deux derniers modèles (le modèle de l'espace de travail et le modèle de l'activité de l'opérateur) constituent la proposition d'un scénario et sa mise en scène. Le modèle de l'opérateur humain est là pour simuler son comportement moteur. Il est donc nécessaire de représenter le corps humain d'une manière géométrique, ce qui donne lieu à un nouveau modèle appelé modèle géométrique : c'est un modèle fonctionnel d'homme servant à étudier les actions physiques de l'homme et l'aménagement du poste de travail du point de vue du confort humain. Ce modèle s'appuie sur la notion de mouvement définie comme une opération permettant de passer d'une posture à une autre.

Dans le contexte de notre recherche concernant la conception du système de désassemblage, la simulation ergonomique constitue une étape préalable amenant à mieux définir la structure du système homme-machine au niveau opératoire, et en conséquence à mieux concevoir le système. Nous montrons les résultats de cette simulation avec les commentaires au chapitre 7 de cette thèse.

Développer un état d'art complet sur l'analyse et la simulation ergonomique sort du cadre de notre thèse. Nous nous limitons donc aux notions utilisées dans l'environnement Robcad/Man (chapitre 7, && 7.2.1).

## 1.3. Conception du système homme-machine

### 1.3.1. Opérateur ou superviseur : un système homme-machine à deux niveaux

Les mots opérateur et superviseur désignent normalement une personne qui a en charge de superviser et de contrôler un procédé. Les deux mots sont donc utilisés souvent dans un sens synonyme. Dans ce paragraphe, une distinction de signification entre ces deux mots sera évoquée, pour pouvoir exprimer le fait que, dans un système socio-technique, l'homme peut être un contrôleur et une partie opérante. Les définitions adoptées pour notifier la distinction entre ces deux mots sont :

- **Superviseur** : personne chargée de la surveillance d'une installation socio-technologique et de la prise de décision. Elle est la seule responsable de cette décision\*.
- **Opérateur** : personne chargée de l'exécution des tâches opératoires, dans son espace ou dans un espace partagé avec une machine (robot)\*.

Ces deux personnes (génériques) partagent un travail, au sein du système socio-technique, avec une machine. Cette machine prend diverses apparences qui peuvent être regroupées sous deux appellations génériques (comme les hommes) : calculateur et robot. Les définitions que l'on adopte de ces deux appellations sont :

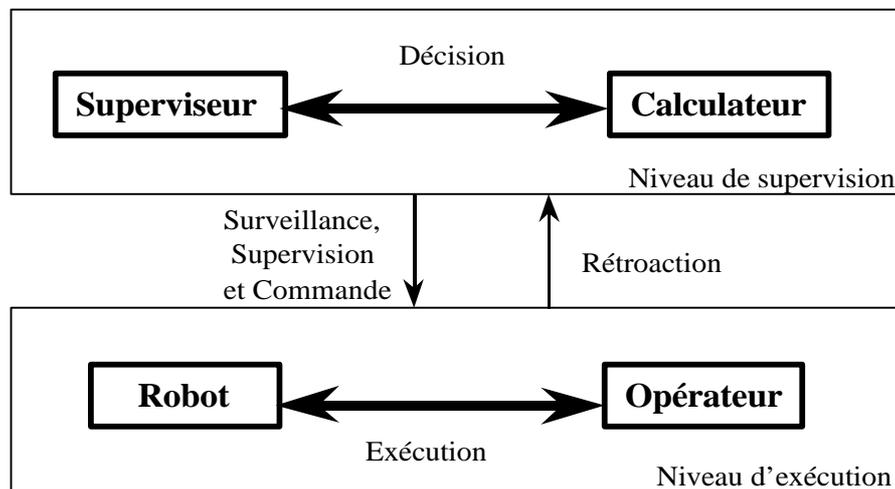


Figure 1.5 : Niveaux d'interactions dans le système socio-technique

- **Calculateur\*\*** : est une machine capable d'effectuer automatiquement des opérations arithmétiques et logiques à partir de programmes définissant la séquence de ces opérations, agissant ainsi dans l'environnement d'une autre machine ou dans l'environnement de

\* La définition est inspirée du dictionnaire de la langue française HACHETTE

\*\* Dans ce manuscrit nous considérons que l'appellation "ordinateur" représente une sous-classe de "calculateur". On entend par ordinateur une unité centrale équipée d'un OS et reliée à un écran et un clavier.

l'homme\*.

- Robot : est une machine automatique dotée d'une mémoire et d'un programme, capable de se substituer à l'homme pour effectuer certains travaux\*.

Ainsi un système socio-technique (plus tard un système de désassemblage) se décompose en deux niveaux : système de contrôle et système contrôlé. Le premier système reflète l'interaction entre le superviseur et le calculateur. Le deuxième reflète l'interaction entre l'opérateur et le robot. Ces deux niveaux d'interactions sont montrés dans la Figure 1.5, et seront expliqués dans les deux paragraphes suivants.

#### 1.3.1.1. Niveau supervision : interaction superviseur-calculateur

Ce genre d'interaction se trouve pratiquement dans tous les systèmes ayant un certain degré d'automatisation. Le superviseur et le calculateur ont une responsabilité stratégique sur le processus, c'est à eux deux de prendre la décision adéquate ou optimale.

Une décision optimale est une décision faite à deux (ou plus), donc une prise de décision optimale exige deux participants (ou plus) et une interface entre eux [Skaf,1999]. Les participants dans la prise de décision doivent être capables de traiter un problème de manière logique basé sur des règles et des connaissances. L'interface doit assurer un mode de communication satisfaisant les deux côtés (les participants). Ainsi le calculateur fait appel à l'homme dans les situations qu'il ne peut pas résoudre, en lui proposant des alternatives. L'homme, quant à lui, fait appel aussi au calculateur pour résoudre un problème. De cette façon, les deux décideurs peuvent arriver, à chaque prise de décision, à enrichir leurs connaissances et leurs stratégies. L'homme "superviseur" n'a donc, à ce niveau, que des activités mentales favorisant soit le comportement basé sur l'habilité, soit le comportement basé sur les règles ou encore le comportement basée sur la connaissance. Des activités physiques ne sont pas constatées, sauf de simples actions motrices.

#### 1.3.1.2. Niveau exécution : interaction opérateur-robot

Ce niveau est distingué pour refléter le fait que des activités physiques existent dans le système socio-technique. En réalité la partie opératoire d'un système de production peut contenir non seulement des robots (dans le sens cité ci-dessus), mais aussi des opérateurs humains qui ont en charge des activités purement physiques. L'origine de ces activités est l'automatisation incomplète de la partie opératoire (raisons technologiques ou économiques). Les tâches non automatisées sont réalisées par l'opérateur, qui est ainsi contraint à partager l'espace de travail avec un robot.

Dans ce contexte, l'interaction entre l'opérateur et le robot est limitée aux exécutions des tâches prédéfinies, sans qu'elle soit un environnement de coopération entre les deux participants. En effet, dans le cadre de notre thèse, nous considérons et étudions ce niveau du point de vue de l'aménagement ergonomique du poste de travail. Cet aménagement aide à travailler ensemble

et à améliorer la performance du système opérant. En ce qui concerne le travail en coopération entre l'opérateur et le robot, nous renvoyons le lecteur aux deux publications qui traitent ce problème (élaboration d'une loi de commande adaptative aux actions humaines et coordinatrice des actions humaines et robotiques) [Ning,1998] et [Kab,1998].

### 1.3.2. Méthodologie de conception

Que ce soit un système de contrôle ou un système contrôlé, la présence de l'homme dans le système impose de tenir compte de cette présence dès la conception du système. Ainsi, le souci d'arriver à concevoir un système réellement centré sur l'homme, a montré la nécessité d'une méthodologie qui vise à préciser les différentes étapes pour aboutir à ce système.

C'est au L.A.I.H. qu'une méthodologie globale a été proposée et présentée entre autres par P. Millot. Elle se compose de deux étapes séquentielles [Millot,1996] :

- Une étape descendante : elle considère les caractéristiques techniques et les objectifs du procédé pour arriver à la réalisation d'un prototype du système homme-machine. Cette étape sert donc à concevoir le système.
- Une étape ascendante : elle vise à aboutir à une meilleure définition des tâches à affecter à l'homme partant des critères de performance du procédé et des critères purement humains.

Ces deux étapes sont exposées brièvement dans les deux paragraphes suivants. Elles seront également reprises après adaptation dans notre problématique.

#### 1.3.2.1. Etape descendante de conception

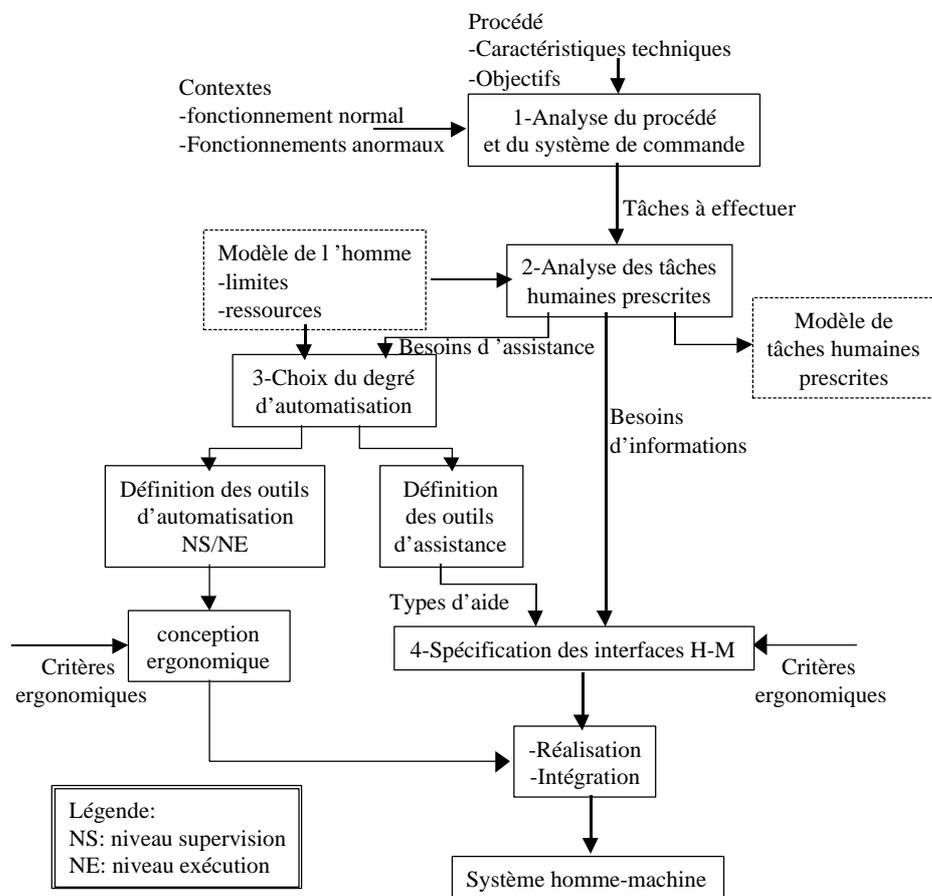
Cette étape vise à trouver la meilleure adéquation entre la capacité humaine et les tâches à réaliser. Pour cela, une analyse du processus et de son système de commande devrait amener à déduire les modes de fonctionnement et de dysfonctionnement, ce qui conduit à la définition des tâches humaines. La capacité humaine pour les réaliser est évaluée à partir d'un modèle donné de l'homme. Cette évaluation est basée sur des contraintes techniques et ergonomiques à satisfaire, ce qui amène à la définition des besoins humains et en conséquence à la proposition soit des outils adéquats d'aide et/ou des outils d'automatisation. La Figure 1.6, inspirée de Millot, Lebars et Lambert, montre cette démarche de conception.

Cette figure illustre les quatre phases de la démarche de conception détaillées ci-après :

- 1) Analyse du procédé et du système de commande : il s'agit de déterminer les tâches à effectuer, en analysant les deux contextes de fonctionnement, normal et anormal. Dans le chapitre 3, nous étudions les outils et les méthodes permettant d'effectuer cette analyse. Cette phase devient plus

compliquée si le système n'existe pas, car l'analyse serait impossible. Ainsi, une étude des contraintes du système sera indispensable pour définir les tâches à accomplir en fonction du but visé.

- 2) Analyse des tâches humaines : il s'agit de définir les tâches réalisables par l'homme pour déduire les besoins d'assistance de celles-ci ; et pour construire un modèle de ces tâches. L'analyse est principalement basée sur les caractéristiques de l'homme et ses limites.
- 3) Choix du degré d'automatisation : il s'agit de définir les outils d'assistance nécessaire pour l'accomplissement des tâches humaines, et les formes d'automatisation. Pour le premier cas, ce sont les aides aux hommes dites logiciel (software), pour le deuxième cas, ce sont les matériels (hardware)



ou l'automatisme qui aide à réaliser les tâches (physiques ou mentales).

Figure 1.6 : Étape descendante de conception du système Homme-Machine [Millot,1996]

- 4) La spécification et la réalisation : il s'agit, dans cette phase, de mettre en œuvre les outils d'aide. Donc, il est question de spécification de l'interface homme-machine et de conception ergonomique du poste de travail. Les critères ergonomiques sont considérés pour le niveau de supervision NS (interface et poste de travail) et aussi pour le niveau d'exécution NE (poste de travail). Ceci débouche sur une réalisation du système homme-machine.

1.3.2.2. Etape ascendante de conception

Cette étape vise à évaluer l'adéquation trouvée dans l'étape précédente, entre la capacité humaine et les tâches à réaliser. Autrement dit, à évaluer le système homme-machine conçu et réalisé précédemment. Cette évaluation est principalement basée sur la valorisation de la performance du système homme-machine. Les critères considérés pour la valorisation peuvent prendre des formes différentes comme, par exemple, des critères économiques ou ergonomiques ....etc.

La Figure 1.7 montre les phases principales de cette étape :

- 1) Définition des protocoles expérimentaux : il s'agit de définir le plan de l'expérimentation et ses scénarios, ainsi que les données à récupérer. A cet effet, la non observabilité directe des paramètres significatifs humains complique cette récupération et en conséquence l'évaluation. Ainsi, il faut construire des observateurs permettant de mesurer les paramètres humains les plus significatifs (mentaux ou physiques) comme, par exemple, la charge de travail et le mouvement oculaire.

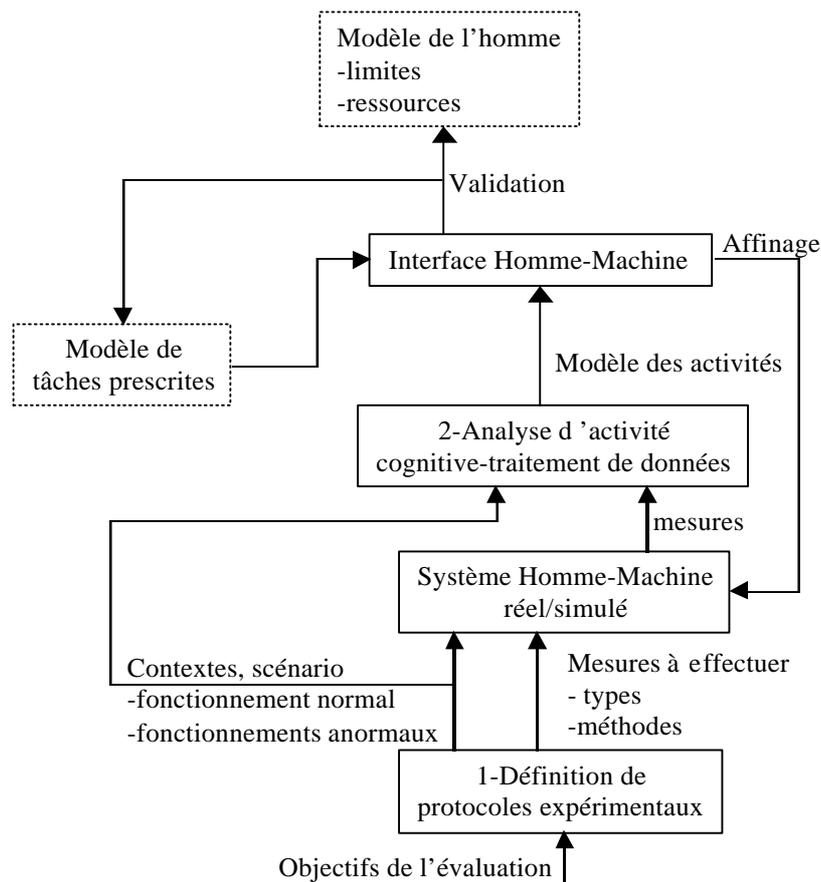


Figure 1.7 : Étape ascendante d'évaluation du système Homme-Machine [Millot, 1996]

- 2) Analyse d'activité : cette phase vise à traiter les données recueillies de différents contextes expérimentaux (y compris plusieurs opérateurs différents) pour déduire un modèle générique de l'activité humaine. Ce modèle sert ultérieurement à affiner le modèle de l'homme utilisé dans

l'étape descendante et aussi à améliorer le modèle des tâches humaines prescrites. Bien entendu, le modèle d'activité avec l'affinage du modèle humain sert à vérifier l'adéquation (le "comment", le "quoi" et le "quand") de l'interface homme-machine conçu et réalisé dans l'étape descendante.

#### 1.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les trois axes qui représentent le domaine de l'étude des systèmes homme-machine : la supervision, l'analyse ergonomique et la conception. A travers ces trois axes, nous avons présenté la revue bibliographique du domaine et en même temps nous avons introduit les notions de base de notre travail de thèse. Entre autres, nous avons défini le système socio-technique en tant que système à deux niveaux : système de contrôle et système contrôlé. Le premier système reflète l'interaction entre le superviseur et le calculateur. Le deuxième reflète l'interaction entre l'opérateur et le robot.

Dans le prochain chapitre nous allons étudier la notion de coopération en soulignant la différence entre coopération et interaction. Ensuite, nous ferons la distinction entre la coopération dans le système de contrôle et la coopération dans le système contrôlé, tout en exposant les différentes visions de la coopération proposées par différents auteurs.

Chapitre

2

---

## Coopération homme-machine

**D**ans le chapitre précédent, nous avons examiné le système homme-machine selon trois axes :

- la supervision et le contrôle des processus industriels en soulignant les caractéristiques et les activités humaines et le support d'information ;
- l'analyse ergonomique, où nous avons insisté sur l'ergonomie du poste de travail ;
- la conception des systèmes homme-machine où nous avons introduit la vision du système homme-machine à deux niveaux.

Ensuite nous avons exposé une méthodologie de conception qui sera prochainement adoptée et complétée. Dans ce chapitre, nous allons orienter notre étude vers ce qui est appelé coopération homme-machine. Dans ce cadre, nous étudions l'interaction homme-machine pour en déduire les différents modes de coopération. Ensuite, nous analysons les types et les moyens de coopération pour définir une vision de la coopération pour les systèmes de supervision et pour les environnements opératoires.

### 2.1. Interaction et coopération

Ferber [Ferber, 1997] a défini l'interaction dans le contexte des systèmes multi-agents. En considérant que l'être humain est un agent cognitif, la définition donnée par Ferber peut tout à fait s'appliquer sur des situations d'interaction entre l'homme et la machine. Ainsi, "*une interaction est une mise en relation dynamique de deux ou plusieurs agents par le biais d'un ensemble d'actions réciproques*". Un exemple de situation d'interaction est le cas d'un opérateur et d'un robot réalisant une tâche ou encore un superviseur humain qui fournit des données à un calculateur.

La coopération est une forme d'interaction entre agents qui aboutit à une amplification des capacités et des performances de ces agents. Si le but de l'interaction peut ne pas être clairement défini, le but de la coopération est probablement plus clair : c'est l'exploitation de la complémentarité des capacités des agents (la machine d'un côté, l'homme de l'autre).

Dans ce volet, nous allons tout d'abord analyser les situations d'interaction en adoptant trois indices suivant lesquels seront classées les situations d'interaction. Ensuite, les formes de coopération seront dégagées pour définir enfin les méthodes proposées pour la coopération.

### 2.1.1. Situation d'interaction

D'une façon générale, l'interaction suppose la présence d'interlocuteurs capables d'agir et/ou de communiquer dans un environnement favorisant les rencontres. Les comportements de ces interlocuteurs dépendent du type d'interaction. On peut rencontrer des comportements contradictoires ou des comportements concordants.

Pour pouvoir classer les situations d'interaction, des indices de classement sont nécessaires. Ferber dans [Ferber, 1997] propose trois principaux indices : les objectifs ou l'intention des agents (la compatibilité ou l'incompatibilité des buts), les relations des agents par rapport à leurs ressources, et les moyens ou la capacité de parvenir à leurs objectifs :

#### 1) Buts compatibles et incompatibles

La compatibilité ou l'incompatibilité des objectifs des agents sont à la base d'une classification des situations d'interaction. On dira que des agents sont dans une situation d'interaction coopérative si leurs objectifs sont concordants, sinon on dit qu'ils sont dans une situation d'antagonisme.

#### 2) Relation aux ressources

Les agents ont besoin de ressources pour réaliser leurs tâches. La situation de leur interaction est fortement caractérisée par le partage des ressources entre les agents. Les ressources comprennent tous les moyens utiles à la réalisation d'une action donnée. La quantité de ressources (ressource énergétique, espace, temps, outils...) est forcément limitée, ce qui engendre des situations de conflit au moment où les agents ont besoin des mêmes ressources en même temps et au même endroit. La résolution des situations conflictuelles fait appel aux diverses méthodes de résolution comme la négociation, le mécanisme de coordination d'actions et d'autres méthodes.

#### 3) Capacités par rapport aux tâches

La question de capacité est posée pour répondre à la question suivante : est-ce qu'un agent peut réaliser seul une tâche ou a-t-il besoin d'une aide pour achever son objectif? Selon la réponse, la situation peut prendre une nouvelle dimension dite bénéfique, où les actions des uns viennent aider celles des autres.

Selon ces indices, une situation d'interaction peut être classée dans une catégorie ou dans une autre, comme nous allons le voir dans le paragraphe qui suit.

### 2.1.2. Types d'interaction

En se basant sur les trois indices cités ci dessus, on peut bâtir le tableau suivant (Tableau 2-1), où huit types d'interaction sont distingués. Ces huit types sont ensuite regroupés dans trois catégories :

Buts	Ressources	Compétences	Types de situation	Catégorie
Compatibles	Suffisantes	Suffisantes	Indépendance	Indifférence
Compatibles	Suffisantes	Insuffisantes	Collaboration simple	Coopération
Compatibles	Insuffisantes	Suffisantes	Encombrement	
Compatibles	Insuffisantes	Insuffisantes	Collaboration coordonnée	
Incompatibles	Suffisantes	Suffisantes	Compétition individuelle pure	Antagonisme
Incompatibles	Suffisantes	Insuffisantes	Compétition collective pure	
Incompatibles	Insuffisantes	Suffisantes	Conflits individuels pour les ressources	
Incompatibles	Insuffisantes	Insuffisantes	Conflits collectifs pour les ressources	

**Tableau 2-1 : Classification des situations d'interactions<sup>2</sup>**

#### 2.1.2.1. Indépendance

Pour un système multi-agents avec des agents artificiels, cette situation d'interaction ne pose aucun problème. Les agents ont des buts compatibles, des ressources suffisantes et leurs compétences sont suffisantes pour réaliser leurs buts. Par exemple, deux logiciels (dans une seule machine avec des ressources suffisantes) qui impriment deux chapitres (chacun un chapitre) d'un livre sur deux imprimantes. Ces logiciels sont dans une situation d'indépendance totale. Pour un système Homme-Machine, où il y a un agent artificiel et l'homme, cette situation est valable pour des durées de temps limitées. En effet, on ne peut pas supposer la constance de la suffisance des capacités humaines. Par exemple, un homme qui recherche un fichier sur un disque dur de grande capacité a besoin, au bout d'un certain temps, d'un agent de recherche automatique. Ainsi un système homme-machine se trouve rarement dans la situation d'indépendance de ses acteurs.

#### 2.1.2.2. Collaboration simple

Cette situation exprime la simple addition des capacités (compétences) pour parvenir au but fixé. Comme les ressources sont suffisantes, il n'y a pas besoin d'action supplémentaire de coordination entre les agents. La collaboration simple met en œuvre la complémentarité des agents. Ceci est le cas général des systèmes communicants, et en particulier, le cas des systèmes homme-machine. Un homme qui utilise un traitement de texte (agent artificiel) pour taper son texte est un exemple de cette situation.

<sup>2</sup> Ce tableau et les paragraphes qui suivent sont issus principalement de [Ferber,1997] avec une adaptation aux systèmes Homme-Machine

#### 2.1.2.3. Encombrement

Dans cette situation le manque de ressources engendre une situation conflictuelle. Les agents se gênent mutuellement en accédant aux ressources sans avoir besoin l'un de l'autre. Par exemple, un utilisateur qui tape son texte dans un traitement de texte (agent artificiel) en faisant beaucoup de fautes d'orthographe ; l'utilisateur est en manque de connaissance linguistique et l'agent informatique est en manque de ressource mémoire pour afficher tout le texte.

#### 2.1.2.4. Collaboration coordonnée

Dans le cas où la capacité des agents et leurs ressources sont insuffisantes, les agents doivent coordonner leurs actions pour parvenir à leurs buts. Dans ce cas, il ne faut pas seulement allouer les tâches entre les agents (vu la capacité limitée de chacun), mais il faut également coordonner leurs actions (vu leurs ressources insuffisantes). Cette situation résume bien l'interaction entre l'homme et la machine dans un système homme-machine. On construit ce genre de systèmes pour atteindre un but bien défini et commun. On y associe l'agent artificiel avec l'homme vu leur complémentarité, dans un contexte où on ne peut pas avoir des ressources illimités. Les exemples de ce cas sont partout, là où il y a un homme (utilisateur, superviseur, opérateur) et une machine (ordinateur ou plus généralement une entité informatique, robot) : il y a une collaboration coordonnée.

#### 2.1.2.5. Compétition

Ce type d'interaction est caractérisé par l'incomptabilité des buts des agents. Si les ressources et les compétences sont suffisantes, on a affaire à une situation de compétition individuelle pure où chaque agent essaie de parvenir à son but. Si, par contre, les compétences sont insuffisantes, le regroupement des agents est nécessaire pour réaliser leurs buts : la situation s'appelle, dans ce cas, une compétition collective pure.

#### 2.1.2.6. Conflit

Si les ressources sont insuffisantes, dans la situation d'incomptabilité de buts, avec une suffisance de la capacité des agents, ceci amène à une situation de conflit, dite conflit individuel pour des ressources. Dans ce cas, chaque agent lutte pour les acquérir pour lui seul. Dans le cas où les capacités des agents sont insuffisantes, les agents se trouvent obligés de s'intégrer dans une situation de compétition collective tout en adoptant le comportement de la situation conflit individuel pour les ressources.

Les situations de compétition et de conflit sont peu présentes au sein des systèmes homme-machine, car l'idée de base de ces systèmes est d'atteindre un objectif commun pour les deux agents : l'homme et la machine. Ceci n'empêche pas de trouver des cas de compétitions et/ou de conflits pour les sous-buts amenant au but commun. Malgré cela, nous supposons, dans le cadre de cette thèse, que tous les systèmes homme-machine sujets d'analyse contiennent des agents (hommes, machines) qui ont des objectifs (buts)

compatibles à tous les niveaux. On ne traitera donc pas le cas des buts totalement incompatibles.

Dans le paragraphe qui suit, nous allons examiner les formes de coopération issues de trois types d'interactions citées ci-dessus : collaboration simple, encombrement et collaboration coordonnée (voir Tableau 2-1).

### 2.1.3. Formes de coopération

La typologie de coopération, proposée dans ce volet, est considérée essentiellement à partir de deux points de vue : le point de vue de l'intérieur (les agents), l'autre de l'extérieur (l'observateur).

#### 2.1.3.1. La coopération du point de vue des agents

Ferber a appelé ce type de coopération "une coopération intentionnelle ", car les agents ont l'intention de travailler ensemble pour réaliser leur but commun. Cette aptitude d'avoir l'intention suppose que les agents soient cognitifs ou au moins aient des aspects cognitifs qui leur permettent de prendre tel comportement. Dans ce cas, un agent coopère s'il s'engage dans une action commune après avoir identifié et adopté les facteurs suivants : l'environnement, les autres participants et leur but commun. Leroux [Leroux,1995] associe la notion de planification et la notion d'intentionnalité : *"deux agents ne peuvent pas coopérer intentionnellement s'ils n'ont pas la capacité de planifier leurs actions"*.

Il apparaît difficile de juger d'une façon absolue si l'intentionnalité de coopérer suffit pour créer une vraie situation de coopération. Pour cette raison, il est préférable de qualifier la coopération d'un ensemble d'agents (y compris les agents hommes) par un observateur extérieur qui ne prend pas en compte les états intérieurs des agents. Ceci sera exposé dans le paragraphe qui suit.

#### 2.1.3.2. La coopération du point de vue de l'observateur

Comme il s'agit d'observer pour juger, la nécessité des indices de jugement est inévitable. T. Bouron a proposé six indices (cités dans [Ferber,1997]) selon lesquels on peut juger si une situation d'interaction entre agents est une situation de coopération :

- 1) La coordination d'actions : juge le niveau d'ajustement des actions des agents dans le temps et l'espace.
- 2) Le degré de parallélisation : porte le jugement sur la répartition des actions et de leur réalisation concurrente.
- 3) La non-redondance des actions : témoigne d'un faible taux d'activités redondantes.
- 4) La robustesse : concerne l'aptitude du système à suppléer la défaillance d'un agent.

- 5) Le partage des ressources : suit l'utilisation des ressources et des compétences.
- 6) La non-persistance des conflits : témoigne d'un faible nombre de situations bloquantes.

Bien évidemment l'utilisation de ces indices repose sur le fait qu'ils soient observables et quantifiables. On peut constater généralement que ceci n'est pas le cas. Par contre, l'effet de ces indices est à notre avis mesurable. Par exemple : la bonne coordination d'actions mène à un accroissement de la performance du système. On peut dire la même chose concernant le degré de parallélisation, la non-redondance des actions, et la robustesse. Les deux derniers indices peuvent être mesurés par un recensement des situations bloquantes. En effet, un bon partage des ressources et un fort taux de non-persistance des conflits mènent à un faible taux de situations bloquantes. Ceci est résumé dans la définition de la coopération donnée par Ferber : "*on dira que plusieurs agents coopèrent, ou encore qu'il sont dans une situation de coopération, si l'une des deux conditions est vérifiée :*

1. *L'ajout d'un nouvel agent permet d'accroître les performances du groupe,*
2. *L'action des agents sert à éviter ou à résoudre des conflits potentiels ou actuels."*

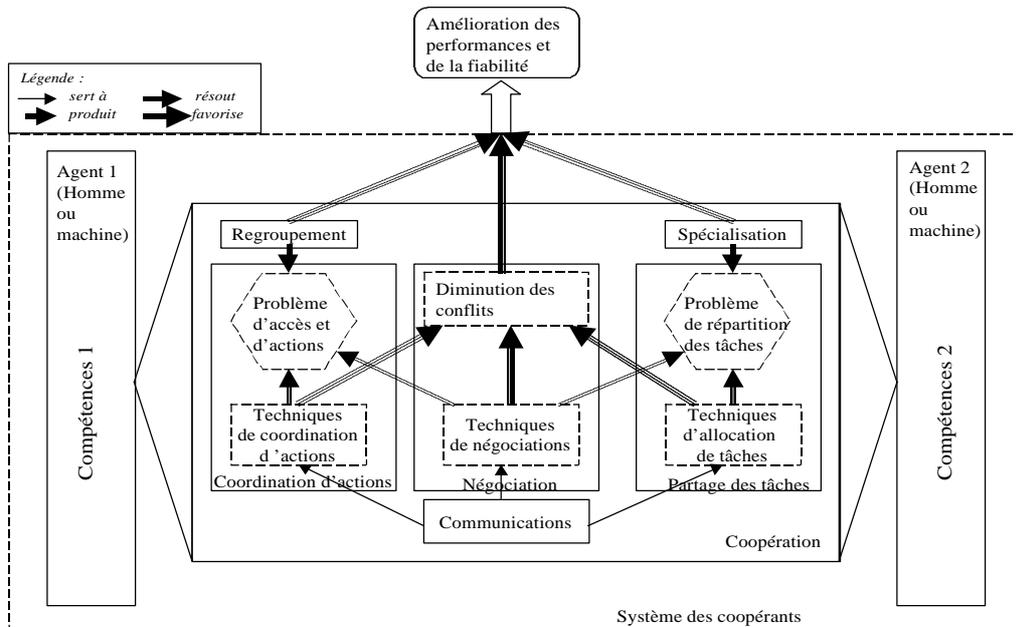
On peut ajouter, toujours dans le contexte du point de vue de l'observateur, un autre indice qui peut être utilisé pour la quantification de la coopération. Cet indice appelé "caractérisation de la survie" reflète la capacité de l'ensemble des participants à maintenir leur unité fonctionnelle face à des forces tendant à la détruire.

#### 2.1.4. Moyens de coopération

La notion de coopération, comme nous l'avons vu, impose la participation de deux agents ou plus dans le travail. Cette forme plurielle de participation au travail impose de mettre en œuvre des moyens pour combler le fossé créé par la pluridisciplinarité.

Pour identifier ces moyens, revenons à l'objectif principal de toute coopération. Il est évident (au moins dans notre contexte qui est un système homme-machine de production) que l'on cherche à concevoir un système coopératif pour améliorer sa performance. Donc, l'ensemble des coopérants investissent leurs compétences pour atteindre un but commun. Ainsi, il est clair que le regroupement des compétences des participants peut conduire à une amélioration de la performance, et aussi la spécialisation des participants (un agent spécialiste dans ses tâches arrive à les réaliser mieux qu'un agent généraliste). Du point de vue de l'objectivité des moyens, les deux moyens (regroupement et spécialisation) proposés suffisent pour améliorer la performance (faire la coopération). Mais, du point de vue de leur mise en œuvre, ces deux moyens ne sont pas suffisants pour réaliser la coopération, car leur mise en œuvre conduira à des problèmes dont la résolution exige

d'autres moyens. En effet, un regroupement engendre le problème de coordination d'actions dont la solution fait appel aux techniques de coordination et de négociation. De même pour la spécialisation, qui engendre le problème de partage des tâches selon les compétences des agents dont la résolution fait appel aux techniques d'allocation des tâches. A leur tour, les techniques distinguées nécessitent un moyen de communication permettant aux agents de se relier pour pouvoir résoudre les problèmes de coordination des actions et d'allocation des tâches.



**Figure 2.1 : Les moyens de mise en œuvre de la coopération**

Sur la Figure 2.1 nous présentons un système des coopérants, où le raisonnement présenté précédemment est schématisé symboliquement. L'accent est mis sur la structuration des moyens de "comment faire la coopération" et la corrélation entre ces moyens :

- Le regroupement, la spécialisation et la situation non conflictuelle favorisent l'amélioration de la performance.
- La communication sert aux techniques de résolution des problèmes de conflit, de répartition et de coordination d'actions.
- Les techniques d'allocation des tâches et de négociation résolvent le problème de répartition et favorisent la diminution des conflits.
- Les techniques de coordination d'actions et de négociation résolvent le problème d'accès et de coordination d'actions et favorisent aussi la diminution des conflits.

Nous pouvons donc conclure que la réalisation de la coopération dépend : du regroupement, de la spécialisation, de la communication, de la coordination d'actions, du partage des tâches, de la négociation. Dans les paragraphes qui suivent, nous donnerons une courte présentation de chacun de ces moyens.

#### 2.1.4.1. Le regroupement

Un regroupement est un rapprochement non seulement physique, mais aussi communicatif permettant aux agents de se sentir proche les uns des autres. Ce moyen est sans doute le moyen de base de toute coopération.

#### 2.1.4.2. La spécialisation

Comme nous l'avons évoqué précédemment, un agent spécialiste dans un domaine est plus adapté à ses tâches qu'un agent généraliste. Ainsi le rendement d'un agent spécialiste est plus important quantitativement et qualitativement. Pour cette raison, la spécialisation est un moyen efficace de la coopération.

#### 2.1.4.3. La communication

On ne peut pas imaginer une société d'agents réalisant un travail collectif sans échanger le moindre message entre eux. La communication est un moyen de rapprochement et est donc un moyen de travail collectif : en conséquence, elle est un moyen de coopération.

#### 2.1.4.4. La coordination d'actions

Le travail collectif (le regroupement) suppose la réalisation d'un ensemble d'actions par les participants au travail. Vu les contraintes de temps, une certaine planification est nécessaire pour permettre à chaque agent de savoir quand il peut faire ces actions? Dans le cas contraire, tout le travail collectif sera remis en cause.

#### 2.1.4.5. Le partage de tâches

Si la coordination répond à la question "quand faire l'action", le partage de tâches doit répondre à la question "qui fait quoi". Chaque participant, au travail collectif, a la responsabilité de certaines tâches dont la réalisation mène au but commun.

#### 2.1.4.6. La négociation

La négociation est le moyen de résolution de problèmes de coordination et de partage du travail et des ressources. Elle est donc un moyen de coopération.

## 2.2. Coopération homme-machine dans un système de supervision

Le premier volet de ce chapitre était consacré aux notions d'interaction et de coopération. Ce volet sera consacré à traiter la coopération dans un système homme-machine.

### 2.2.1. Coopération ou aide : les contours du concept

Souvent dans la littérature, on rencontre la notion "aide aux opérateurs" ou encore "aide à la supervision" côte à côte avec la notion de coopération. Y a-t-

il une signification différente entre ces deux termes? Pour répondre à cette question, nous allons analyser ces deux notions et voir ce qui se cache derrière chacune.

La notion de coopération, comme nous l'avons vu, signifie la mise en commun des diverses compétences (humaines et/ou artificielles) pour atteindre un objectif commun. Ceci est réalisé par une répartition des tâches et des responsabilités et par une coordination des actions. Il se peut, dans le contexte du travail collectif, qu'un participant ait à lui seul la charge de partage et de coordination du travail. Recourir à la coopération a pour objectif l'amélioration de la performance.

Dans la littérature, la notion d'aide est utilisée principalement pour parler du système homme-machine : la présence d'un élément humain est indispensable pour parler d'aide. D'une manière générale, pour pouvoir parler de l'aide, il faut réunir trois conditions : l'existence de ce qui aide, l'existence de ce qui est aidé et l'existence du sujet sur lequel l'aide est portée. Par exemple, dans le cas d'aide au superviseur, ce qui aide est une entité informatique (un logiciel), celui qui est aidé est le superviseur et le sujet d'aide est la tâche de conduite du processus.

Grosjean [Grosjean,1999] a dénombré trois raisons pour faire appel à un système d'aide au sein d'un système homme-machine, elles sont :

- 1) La réalisation de la tâche par l'être humain est impossible ;
- 2) La réalisation de la tâche porte un risque pour l'être humain ;
- 3) La performance du système homme-machine n'est pas satisfaisante.

Le recours au système d'aide pour une raison d'amélioration de la performance rejoint la définition de la coopération proposée dans le premier volet (rappelons que la coopération sert à améliorer la performance). Donc la notion d'aide et la notion de coopération sont, dans ce cas, très proches voire même équivalentes. Par contre, si le recours au système d'aide était justifié pour l'une ou les deux premières raisons (citées ci-dessus), la notion d'aide et de coopération n'auraient plus la même signification. Donc la distinction entre coopération et aide porte sur la finalité du système conçu. Dans ce contexte, et par le souci de faire le lien entre les notions de coopération, d'aide et d'assistance, nous rappelons que les notions d'aide et d'assistance ont été considérés de manière analogue. Donc pour le troisième cas, on peut aussi parler d'équivalence entre coopération et assistance.

Malgré cette délimitation théorique de la finalité du système, la distinction entre la notion d'aide (d'assistance) et la notion de coopération est pratiquement très difficile (au moins pour la plupart des systèmes homme-machine). En effet, les systèmes homme-machine sont conçus généralement (ou doivent être conçus) pour l'ensemble des trois raisons citées auparavant (l'impuissance de l'homme et le risque pour l'homme face à certaines tâches, l'amélioration de la performance). Pour cette raison, nous assimilons ces deux notions, comme l'ont fait plusieurs auteurs dans la littérature.

## 2.2.2. Les visions de coopération

### 2.2.2.1. La coopération chez Johannsen : une vision centrée sur la structure décisionnelle

Johannsen propose une vision de la coopération à travers une structure décisionnelle du système homme-machine [Johannsen,1986]. Selon lui, la prise de décision peut intervenir à trois niveaux :

- Le niveau organisationnel : correspond aux décisions prises par le management. Ce sont des décisions stratégiques qui concernent l'ensemble industriel (l'usine).
- Le niveau macro-décisions : ce sont des décisions globales relatives à la supervision de processus.
- Le niveau micro-décisions : ce sont des décisions opérationnelles de conduite (dans la couche opératoire du système).

Pour chaque niveau, toujours selon Johannsen, la prise de décision passe par trois phases :

- Evaluation de la situation : la machine assiste l'homme pour examiner et évaluer les informations venant du procédé. Cette phase se termine par l'annonce d'une hypothèse expliquant la situation.
- Planification et choix d'option : le couple homme-machine choisit parmi les alternatives le plan d'action qui sera mis en œuvre.
- Exécution et suivi : le plan décidé dans la phase précédente est réalisé, une observation et une évaluation des résultats sont engagés. Si il y a un écart entre le résultat attendu et le résultat observé, une révision du plan est mise en route.

En considérant cette structure, on peut constater que la vision de Johannsen de la coopération homme-machine insiste sur l'importance de la communication entre les acteurs de ce système. Par ailleurs, il ne considère pas les spécificités des participants au travail (homme et machine). Pour lui la machine peut théoriquement coopérer pour réaliser le travail collectif sous n'importe quelle forme d'organisation valable pour une équipe humaine. Il ne fait donc pas de distinction entre une machine et un opérateur humain.

### 2.2.2.2. La coopération chez De Keyser : une vision psycho-fonctionnelle

La vision de De Keyser [De Keyser, 1988] est que la machine est à la disposition de l'homme pour :

- Structurer le champ informationnel de l'opérateur : la machine structure les activités de l'opérateur par la modalité et le support (interface) de présentation d'information.
- Filtrer les informations : c'est à partir d'un modèle des besoins

informationnels de l'opérateur que la machine filtre et présente les informations à l'opérateur.

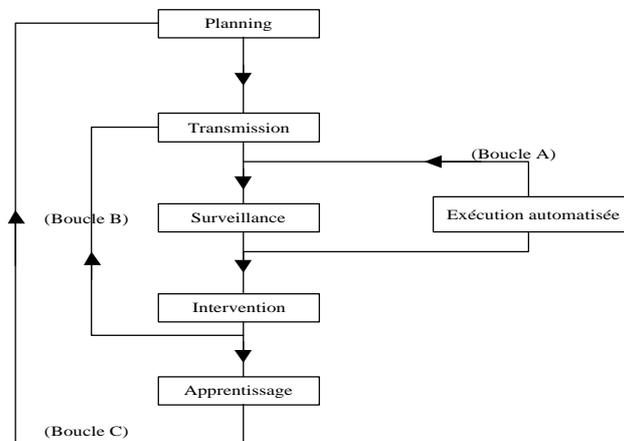
- Traiter les informations : la machine prend en charge le traitement complexe de l'information et présente le résultat de ce traitement à l'opérateur.

De Keyser, à travers sa vision, suppose que la machine, mise au service de l'homme, est dotée d'une intelligence artificielle dans la phase de conception (éventuellement l'entité informatique). Sa vision de la coopération se situe plus du côté cognitive que technique : ce fait est constaté par sa tentative de respecter la capacité cognitive de l'homme (informations dosées et sur mesures), et aussi par l'intégration d'un modèle (même simpliste) de l'homme dans la machine. Cette vision serait peut être réaliste si tout allait comme prévu pendant la phase de conception.

### 2.2.2.3. La coopération chez Sheridan : une vision technico-fonctionnelle

Sheridan a élaboré un modèle d'activités de supervision (ce modèle a été présenté dans le chapitre I paragraphe 1.1.2.4.) au travers duquel il essaie d'englober toutes les situations où un superviseur (homme) réalise une tâche avec une machine (ordinateur). Pour Sheridan, la coopération entre un homme et une machine ne peut être réalisée que dans le haut niveau de supervision, car il suppose que la machine a seule en charge le contrôle continu de l'environnement. D'après lui il ne reste qu'à résoudre le problème de répartition des tâches de supervision de haut niveau. Pour cela, Sheridan distingue douze fonctions regroupées en cinq catégories et propose une série d'aides pour l'ensemble de ces fonctions (voir tableau 1.1, chapitre I).

Comme De Keyser, la coopération chez Sheridan se résume par un rôle d'assistance permanente attribué à la machine en faveur de l'homme. Mais sa vision se distingue par l'exhaustivité de son modèle. Cette vision, qui a été développée selon deux directions, l'une cognitive et l'autre technique, est exprimée par l'articulation des cinq rôles du superviseur dans trois boucles. La Figure 2.2 montre ces trois boucles (voir l'ensemble des douze fonctions et leurs cinq catégories (tableau 1.1)) :



**Figure 2.2 : Les trois boucles caractérisant le rôle du superviseur**

- Boucle A : correspond à une situation de fonctionnement normal et consiste à surveiller les automatismes.
- Boucle B : correspond à une situation de fonctionnement anormal et consiste à diagnostiquer la situation.
- Boucle C : correspond à une situation d'apprentissage (hors fonctionnement). Elle consiste à améliorer la connaissance et l'expertise de l'homme pour l'injecter dans la planification.

On voit donc le découpage fonctionnel que Sheridan utilise pour élaborer une notion de coopération assez large et réaliste.

#### 2.2.2.4. La coopération en TCAO : une vision d'application coopérative

B. David [David, 2001] définit le Travail Coopératif Assisté par Ordinateur (TCAO) comme une activité humaine faisant intervenir plusieurs personnes, simultanément ou non, en se servant d'une application destinée au support de ce travail.

Partant de l'idée de l'application du travail coopératif, B. David introduit la coopération en se servant de trois approches :

- 1) Communication : pour définir un système de communication adéquat à une situation donnée, il faut prendre en compte trois facteurs : le lieu, le temps et le nombre de participants.
- 2) Collaboration : elle permet d'éliminer les contraintes spatiales et temporelles par la mise en œuvre d'un partage d'informations.
- 3) Coordination : elle représente les règles de travail appliquées au sein d'un groupe pour atteindre un objectif défini à l'aide du processus de travail basé sur un ensemble de tâches structurées, à effectuer dans un ordre précis et dans des délais impartis. La coordination est réalisée par la mise en œuvre d'un type de système workflow.

Cette vision reflète bien le souci de concevoir des applications en qualité d'outils TCAO, qui peuvent, avec le groupe de personnes, constituer un système ultra organisé. On constate que les approches proposées de la coopération rejoignent la définition des moyens pour la mise en place de la coopération (voir Figure 2.1).

#### 2.2.2.5. La coopération chez Millot : une vision globale pour les systèmes fortement automatisés

P. Millot développe sa vision de coopération, comme Sheridan, pour un système de supervision et de surveillance. Il considère que le rôle principal de l'être humain (dans un système fortement automatisé) est dans les salles de contrôle où toutes les informations sur le procédé sont concentrées. Le calculateur assure la conduite de ces systèmes en régime permanent et en fonctionnement normal. L'intervention de l'homme est limitée au changement

de régime et en situation de dysfonctionnement, "pour assurer les tâches que l'on ne sait pas, ou pas complètement automatiser".

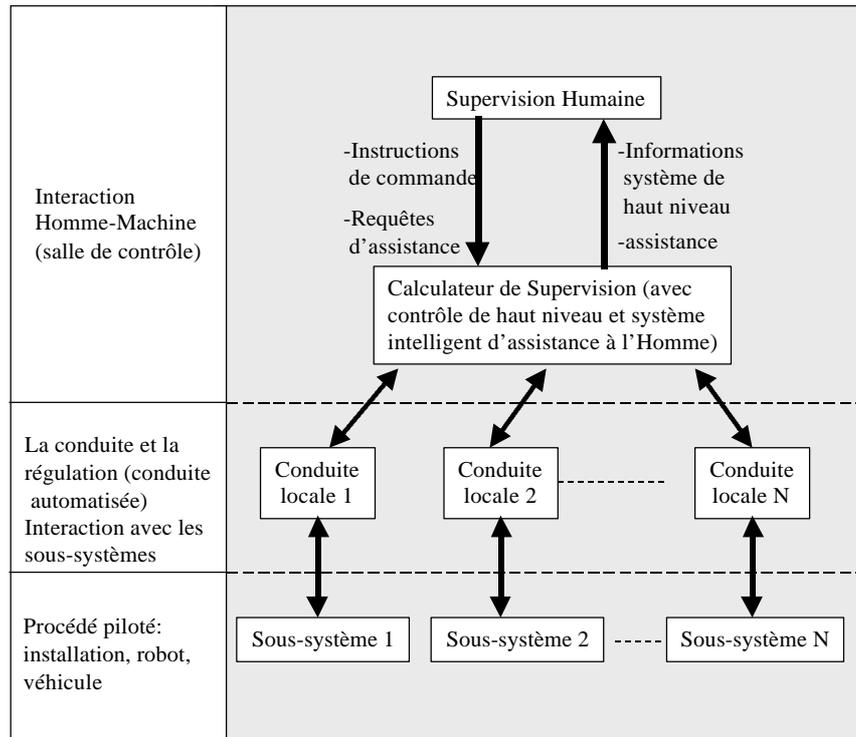


Figure 2.3 : Système de supervision, adopté par Millot [Millot, 1988]

A travers ces deux types de coopération, que nous examinerons en détail dans les prochains paragraphes, Millot donne une vision globalisée de la coopération. Il joint l'idée des autres auteurs en proposant la coopération verticale (coopération unidirectionnelle ou assistance). Mais il va au-delà en proposant une répartition dynamique des tâches de supervision et de surveillance entre l'homme et la machine (coopération horizontale). Cette vision (à double facette) se justifie pour n'importe quel système à fort degré d'automatisation, en particulier dans les phases de fonctionnement perturbées où se concentrent les principales difficultés des tâches de supervision.

Les deux visions de la coopération (verticale et horizontale) synthétisent, à nos yeux, toutes les écoles travaillant sur la problématique de coopération homme-machine. C'est la raison pour laquelle nous prêtons un soin particulier à détailler la structure de ces deux visions.

### 2.2.3. Coopération homme-machine verticale

Elle est appelée verticale pour notifier la subordination hiérarchique de la responsabilité de la machine (l'outil d'assistance) qui est inférieure au superviseur. La coopération verticale est une sorte d'interaction homme-machine de type "collaboration simple" (voir 2.1.2.2.). Elle met en œuvre la complémentarité de l'homme et de l'outil d'assistance (machine) tout en laissant la responsabilité de toutes les variables du procédé à la charge de l'homme.

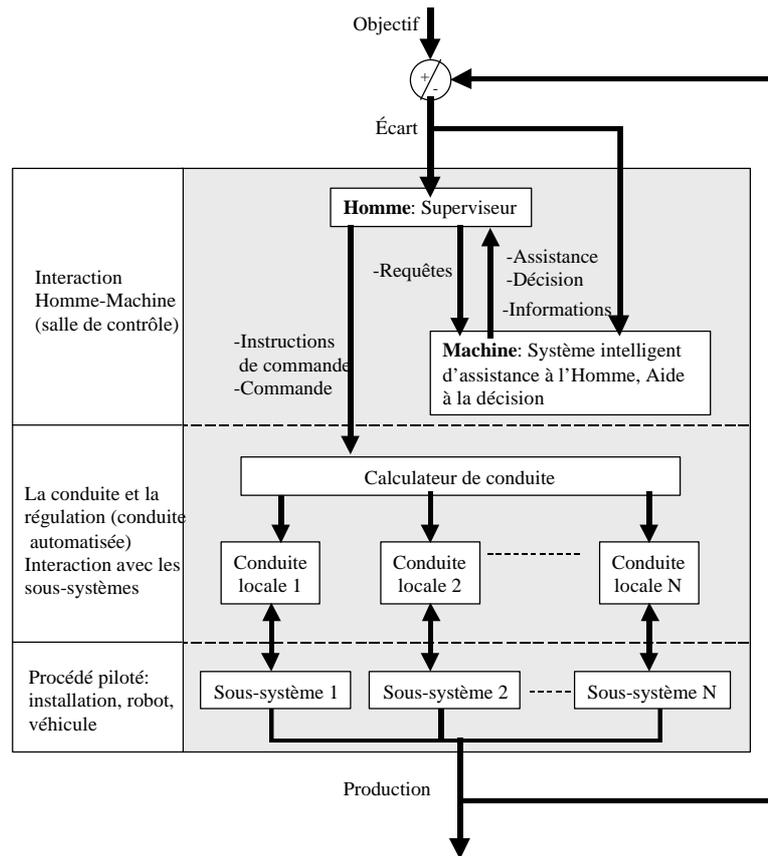


Figure 2.4 : Coopération homme-machine verticale

Ce mode de coopération est schématisé sur la Figure 2.4. On constate, en comparant avec la Figure 2.3, que le niveau d'interaction homme-machine est structuré autrement. En fait, suite à la hiérarchisation de la responsabilité où l'homme est le seul décideur, la machine n'a aucun accès à la conduite (niveau conduite et régulation). Le superviseur seul a en charge de passer l'instruction de commande ou la commande même qui sera interprétée par le calculateur de conduite placé au deuxième étage dans la structure du système de production. Le superviseur réagissant aux écarts (entre les objectifs fixés et la production ou la sortie du système), il prend une décision (en se basant sur ses connaissances intérieures) et ensuite il passe la commande au niveau conduite. Si ses connaissances ne lui permettent pas d'agir ainsi, il s'adresse à la machine, qui est informée elle aussi de cet écart, pour demander soit une assistance et des informations supplémentaires, soit une décision prédéfinie, si elle en possède une.

P. Millot dans [Millot, 1996] distingue deux types de coopération :

- La première situation vise un objectif d'apprentissage : le superviseur est guidé dans sa démarche de résolution de problème. Pour cela, il est supposé que la machine est armée d'une grande capacité d'adaptation pour assurer une cohérence entre le raisonnement artificiel et humain.
- La deuxième situation vise à faire face aux cas urgents : la machine fournit au superviseur une solution toute faite à appliquer (au cas où

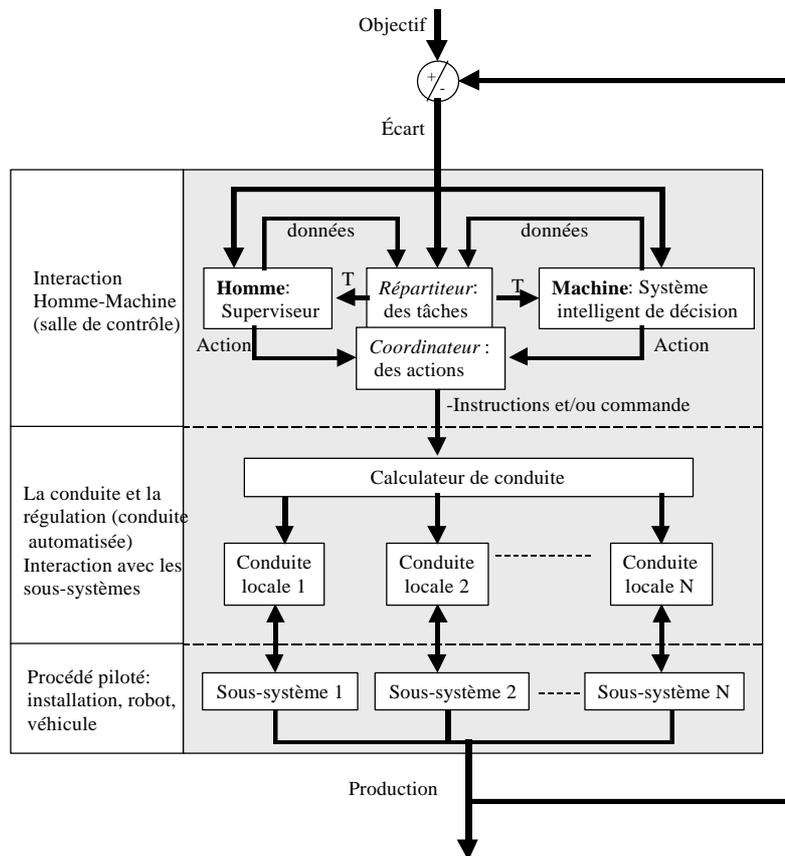
l'homme perd ses capacités de raisonnement objectif). Pour cela, il est supposé que la machine est en mesure de fournir une solution et de la justifier.

Dans le cadre de nos travaux, la coopération verticale est adoptée dans sa première forme, donc pour un objectif d'apprentissage.

#### 2.2.4. Coopération homme-machine horizontale

Cette coopération est appelée horizontale pour souligner le fait que l'homme et la machine se trouvent au même niveau hiérarchique et que leurs responsabilités sur le procédé sont égales. Ainsi l'ensemble de tâches de supervision est réparti dynamiquement entre eux. La coopération horizontale est une sorte d'interaction homme-machine de type "collaboration coordonnée" (voir 2.1.2.4.).

Contrairement à la coopération verticale, dont la mise en œuvre ne nécessite que les deux participants homme et machine, la mise en œuvre de la coopération horizontale est conditionnée par la nécessité d'un moyen spécial qui prend en charge la répartition des tâches entre l'homme et la machine et qui coordonne leurs actions. Ce moyen est appelé par Millot "un répartiteur". Nous élargissons cette appellation à "un répartiteur-coordonateur" pour rester cohérent avec nos explications.



**Figure 2.5 : Coopération homme-machine horizontale**

Le mode de coopération horizontale est schématisé sur la Figure 2.5. On constate le changement de la structure de l'étage "Interaction homme-machine" ( voir le paragraphe 2.3.4.1. et la Figure 2.3). L'homme et la machine contrôlent le procédé d'une manière alternée et égale. Ce contrôle est coordonné par la partie coordinateur de moyen "répartiteur-coordinateur". Le répartiteur attribue les tâches "T" (pour recomposer l'écart entre l'objectif et la production), soit à la machine, soit à l'homme, selon les données en provenance de l'homme (charge de travail, satisfaction) et de la machine (capacité de traitement d'information, capacité de raisonnement décisionnel). L'homme et la machine, en prenant en compte l'écart objectif-production, réalisent leurs tâches et produisent des solutions sous forme d'actions qui seront transmises au calculateur de conduite et de régulation via le coordinateur.

La fonctionnalité "répartiteur-coordinateur" peut être tenue soit par l'homme soit par la machine donnant ainsi deux types de coopération horizontale l'une explicite et l'autre implicite :

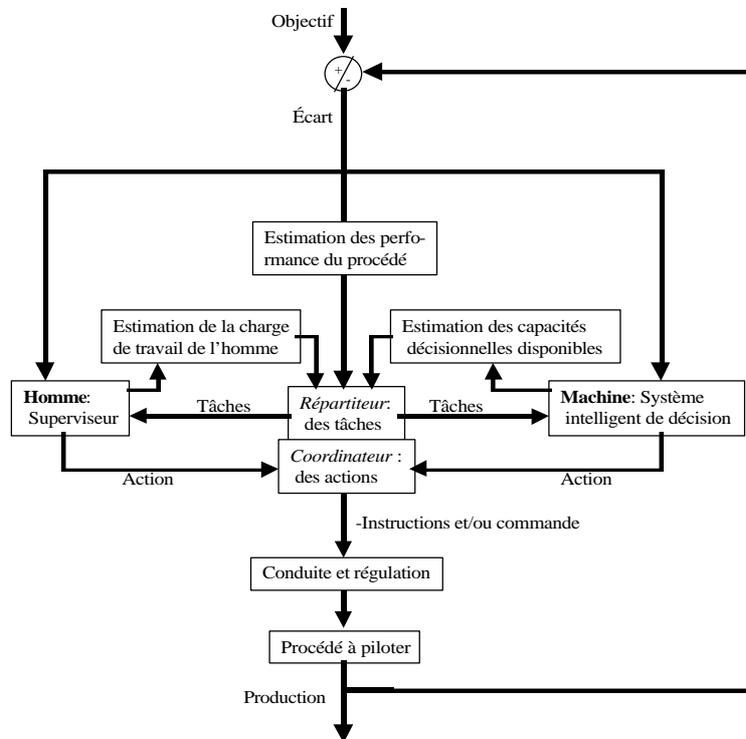
- Coopération horizontale explicite : la fonctionnalité "répartiteur-coordinateur" est assurée par l'homme. Il décide d'affecter certaines tâches à la machine ou il les réalise lui-même. Les critères de cette allocation sont : la charge de travail, la performance du procédé et la capacité de décision de la machine. Donc le superviseur évalue ces critères (en particulier sa charge de travail) et ensuite fait allouer les tâches. Les actions résultantes de la réalisation des tâches allouées sont coordonnées par lui, le superviseur est donc responsable de la cohérence de l'instruction de commande ou de la commande qui sera interprétée par le calculateur de conduite (voir Figure 2.5 en considérant l'homme, le répartiteur et le coordinateur en tant qu'une seule unité). L'atout de ce mode de coopération est la facilité de sa mise en œuvre (il suffit de former le superviseur). Par contre, l'inconvénient est d'encombrer l'homme par des tâches supplémentaires qui feront baisser sa performance pour les tâches essentielles (tâches de supervision et conduite). Cette baisse de performance est le résultat de l'augmentation de la charge de travail imposée par les tâches supplémentaires. Pour limiter l'augmentation de cette charge, plusieurs auteurs proposent d'optimiser les qualités ergonomiques de l'interface homme-machine.
- Coopération horizontale implicite : la fonctionnalité "répartiteur-coordinateur" est assurée par la machine, elle alloue les tâches soit à l'homme soit à elle-même et elle coordonne les actions résultantes (voir Figure 2.5 en considérant la machine, le répartiteur et le coordinateur en tant qu'une seule unité). Les critères considérés sont les mêmes critères que pour la coopération horizontale explicite (la charge de travail, la performance du procédé et la capacité de décision de la machine). L'atout de ce mode de coopération est de débarrasser l'homme de tâches supplémentaires qui freinent sa performance. De l'autre côté, l'estimation dynamique de l'état de l'homme (sa démarche décisionnelle) et de sa charge de travail compliquent la mise en œuvre de ce mode de coopération, ce qui constitue son inconvénient majeur.

Pour balayer cet inconvénient, une tentative, parmi d'autres, a été proposée par Millot [Millot,1988] : elle consiste à estimer la charge de travail en temps réel selon une méthode temporelle.

Dans le prochain paragraphe, nous donnons une courte présentation du "répartiteur-coordonateur" dans le contexte de sa mise en œuvre automatique.

#### 2.2.4.1. Principe de répartition automatique des tâches

Le principe de fonctionnement du "répartiteur-coordonateur" est de répartir les tâches partageables, celles exécutables par les deux acteurs, selon leurs performances en tenant compte des limites de chacun, et de coordonner leurs actions sur le procédé pour éliminer tout genre de conflit (en cas de conflit, les actions prioritaires sont celles qui minimisent l'écart entre l'objectif et la production sur le plan stratégique et tactique).



**Figure 2.6 : Le "répartiteur-coordonateur" : principe de la répartition automatique des tâches d'après [Millot,1996]**

La Figure 2.6 montre schématiquement le fonctionnement du "répartiteur-coordonateur" dans un système homme-machine. Sans se poser de questions sur la dynamique interne de ce "répartiteur-coordonateur", qui pourrait être très complexe, une constatation évidente est qu'il traite les résultats des trois unités d'estimations (qui peuvent être des composants de lui-même). Les résultats de ce traitement sont des tâches allouées et des actions coordonnées (voir Figure 2.6). Cette constatation évoque un ensemble de questions (nous tenterons d'y répondre au chapitre six), parmi lesquelles les suivantes nous paraissent importantes :

- De quelle manière établit-on une liste de tâches partageables pour un

système donné? Quels sont les critères?

- Etablit-on cette liste statiquement (dans l'étape de conception du système) ou dynamiquement (en temps réel)?
- Influence-t-elle la situation dans laquelle le système se trouve la nature des tâches?.
- En supposant que l'estimation de la charge de travail est suffisante pour évaluer l'état cognitif de l'homme, est-ce que la corrélation (charge de travail-capacité décisionnelle disponible-performance) est cohérente dans le sens où elle est suffisante pour décider d'allouer une tâche donnée à un acteur humain ou artificiel.

#### 2.2.4.2. Les différentes méthodes d'évaluation de la charge de travail

La charge de travail d'un individu est une variable caractéristique de son état ; elle est définie par Sperandio (cité dans [Millot, 1988]) comme : "*le niveau d'activité mentale sensorimotrice et psychologique nécessaire pour accomplir une tâche*". Les psychologues, les cognitivistes et les ergonomes soulignent le fait que la performance humaine est maximale pour un certain seuil de la charge de travail. Au dessus et en dessous de ce seuil, l'individu est soit surchargé et ensuite perturbé, soit sous-chargé et ensuite inefficace.

L'estimation de la charge de travail est à la base du fonctionnement du "répartiteur-coordonateur". La mesure automatique et en temps réel de la valeur instantanée de cette charge sans perturber l'individu constitue un problème majeur. Pour résoudre ce problème, une méthode temporelle a été développée au L.A.I.H.. L'idée de départ de cette méthode consistait à définir les exigences temporelles de la réalisation des tâches. Ces exigences se traduisent par une relation de deux termes : l'un est le temps requis pour réaliser la tâche  $T_r$ , l'autre est le temps disponible  $T_d$ . Partant de cette idée et constatant que les exigences ne sont pas seulement temporelles, Millot introduit les exigences fonctionnelles. Ainsi l'exigence totale influençant la réalisation d'une tâche est :

$$\frac{1}{T_{d_s}(t)} = \frac{1}{T_d(t)} G(t)$$

où :  $T_d(t)$  est le temps disponible qui est fonction du temps écoulé,  $G(t)$  une fonction introduite pour exprimer la gravité de la situation.

Ensuite Millot interprète cette exigence totale pour réaliser une tâche par une certaine "*puissance de travail*" qui correspond à la charge de travail investie dans la réalisation. Ainsi il conclut que pour un temps requis  $T_r$  d'une tâche, la charge de travail sera :

$$Wl = \int_{t_c}^{t_c+T_r} \frac{dt}{T_{d_s}(t)} \quad \forall t \rightarrow T_{d_s}(t) \neq 0$$

où :  $t_c$  est l'instant de début de l'exécution de la tâche.

Par la suite, cette méthode a été élargie pour diverses situations ; monotâche discrète, multitâche discrète et tâche continue [Berger,1992]. Malgré l'importance de cet élargissement, nous ne le traitons pas dans le cadre de ce mémoire. Nous nous limitons au principe général de la méthode temporelle, présenté ci-dessus.

### 2.3. Coopération homme-robot dans un environnement opératoire

Dans le volet précédent, nous avons étudié la coopération dans un système de supervision. Nous avons analysé les différentes visions de la coopération en soulignant la coopération verticale et horizontale. Nous avons présenté le partage des tâches et la coordination des actions tout en considérant qu'elles sont des tâches et des actions décisionnelles, qualifiées de mentales pour l'homme, y compris les actions motrices. Ceci nous amène à conclure que la coopération entre l'homme et la machine (par le partage des tâches ou par l'assistance pour réaliser les tâches) dans les systèmes de supervision est une nécessité, non seulement pour faire face à une automatisation de plus en plus poussée sans qu'elle soit parfaite, mais aussi pour améliorer la performance du système tout entier.

Si la place de l'homme ne se situait qu'au niveau de supervision et de surveillance (ce qui est le cas de certaines installations complètement automatisées, par exemple une centrale électrique), on se contenterait d'étudier la coopération dans le sens évoqué plus haut. Mais la place de l'homme dans la plupart des systèmes de production se trouve également au niveau opératoire, là où il réalise ces tâches en parallèle avec un robot (dans le sens général du mot qui enveloppe toutes les machines). Cette situation nous pose une question légitime : existe-t-il une coopération homme-machine dans un environnement opératoire?

En effet, les lignes de production incorporent des opérations manuelles. Ce sont principalement les manipulations de matériaux, les opérations de montage et de démontage et les chargements et déchargements des pièces. Ainsi l'être humain, en tant qu'ouvrier, existe toujours, et le remplacer n'est pas toujours évident pour des raisons économiques, techniques et sociales. De ce fait, l'aménagement ergonomique du poste de travail (y compris les interfaces) est une nécessité à deux niveaux : au niveau sécurité et sauvegarde de l'homme et au niveau performance du système.

L'aménagement ergonomique s'appuie sur :

- L'analyse des tâches : elle comprend l'évaluation des tâches et les actions qui les composent et le travail à réaliser ;
- L'analyse des postures : elle comprend l'évaluation de postures humaines par rapport aux mouvements envisagés ;
- L'analyse de soulèvement : elle comprend l'évaluation de la manipulation de matériaux en vue de formuler les prédictions biomécaniques de positions mal adaptées du dos ;

- L'analyse du poste de travail : elle comprend l'évaluation de l'environnement industriel ou bureautique (au niveau équipements et installations) pour l'adapter économiquement aux individus travaillant dans cet environnement.

L'aménagement ergonomique du poste de travail, dans le cadre de cette thèse, n'est considéré que pour la conception d'une cellule de désassemblage où un opérateur et un robot réalisent les tâches de désassemblage (voir chapitre 4).

## 2.4. Conclusion

Dans ce chapitre, le sens des trois mots clés interaction, coopération et aide a été précisé. Nous avons retenu que la coopération ne représente qu'un élément d'une notion plus large qui est l'interaction. Cette coopération peut prendre trois formes (selon les ressources et les compétences des acteurs) : collaboration simple, encadrement ou encore collaboration coordonnée. Nous avons aussi retenu que l'aide et/ou l'assistance est un cas spécial de la coopération. Nous avons mis en évidence les moyens pour réaliser la coopération en soulignant que l'objectif principal de la coopération est l'amélioration de la performance du système tout entier. Ensuite, on a dénombré et expliqué les différentes visions de la coopération chez plusieurs auteurs. A la fin de ce chapitre nous avons introduit la notion de "coopération par l'aménagement du poste de travail", et nous avons justifié cette notion par le fait qu'un aménagement ergonomique du poste de travail est une nécessité au niveau performance du système et au niveau sécurité et sauvegarde de l'homme.

Le troisième chapitre de ce mémoire sera consacré à l'étude des outils de modélisation des systèmes homme-machine.

Chapitre

3

---

## Outils de modélisation du système homme-machine

**N**ous utilisons tous, sans même en être conscient, de nombreux formalismes pour mener au mieux notre vie quotidienne. Un formalisme nous permet par exemple de dessiner un plan, de rédiger une lettre, ou encore de préparer une tasse de café. Ces formalismes prennent l'apparence d'une norme, ou d'une formalité. L'objectif de ces formalismes est de donner une forme à l'information contenue dans le système (système homme-cafétière), c'est à dire une *'précision et une netteté excluant toute équivoque'* [Robert,1992] citée dans [Jambon, 1996]. Ainsi un formalisme permet de supprimer autant que possible les ambiguïtés et les erreurs d'interprétation. Donc, grâce à l'usage du formalisme, l'information peut se transmettre sans perte entre le créateur et l'utilisateur, et facilite la conception et l'évaluation du système. L'analyse et la modélisation du système sont des étapes essentielles pour la conception et l'évaluation, où les besoins d'outils se manifestent. Un recours aux méthodes d'analyse et de modélisation est donc nécessaire.

Ce chapitre est entièrement consacré à l'analyse et à la modélisation des systèmes homme-machine, en se focalisant sur les formalismes et les méthodes proposés pour l'analyse et la modélisation des systèmes techniques et des tâches humaines.

### 3.1. Modélisation des systèmes

Un modèle du système est une entité porteuse de connaissance sur ce système. Il sert à: explorer le système, construire les architectures fonctionnelles et physiques, vérifier le comportement, prévoir la performance, estimer la sûreté de fonctionnement et partager la connaissance du système. Bien entendu, pour la réalisation de ces objectifs, la modélisation du système peut prendre différentes formes ce qui, probablement, conduit à avoir plusieurs modèles, chacun reflétant un certain niveau d'abstraction. Ainsi on trouve des modèles cognitifs d'environnement, des modèles prescriptifs, prédictifs ou encore des modèles constructifs. Ces différents modèles ont pour objectif de

mieux expliquer le système et de surmonter sa complexité ce qui aide l'homme à le maîtriser. Meinadier J.P. dans [Meinadier,1998] a écrit: *l'esprit humain n'appréhende la complexité qu'en la modélisant, et utilise les modèles ainsi créés dans ses comportements. Comprendre ou concevoir, c'est créer les modèles mentaux. Agir ou réaliser, c'est se confronter aux modèles que l'on a construits.*

### 3.1.1. Définition et utilisation des modèles

Une définition générique, parmi d'autres, du modèle peut être inspirée de la définition donnée par Hachette : *un modèle est un ensemble d'équations et de relations servant à représenter un système complexe et à étudier certaines de ses caractéristiques.* Donc, un modèle met en évidence les caractéristiques du système que l'on veut étudier et qui reflète le comportement de ce système d'un point de vue donné.

Larvet [Larvet,1994] parle de quatre axes de modélisation selon l'utilité des modèles :

- Axe architecturale : aboutit à un modèle montrant l'architecture physique du système.
- Axe structurel-informationnel : le modèle produit par cet axe décrit les propriétés et les caractéristiques statiques du système : données, éléments de structure.
- Axe fonction et traitement : débouche sur un modèle illustrant les fonctionnalités et les missions du système.
- Axe comportemental : vise à produire un modèle décrivant la réactivité dynamique du système et son évolution.

L'intérêt de ces modèles est de comprendre et de réduire la complexité du système, ensuite de constituer un langage commun de communication entre les intéressés et finalement de vérifier, simuler et valider les idées.

### 3.1.2. Principe de modélisation

Trois principes génériques sont cités dans la littérature :

- 1) Abstraction : c'est l'art d'abstraire d'une réalité complexe ce qui est essentiel et pertinent et qui sert pleinement l'objectif de modélisation.
- 2) Formalisation : c'est la technique de traduction du résultat d'abstraction dans un formalisme, c'est-à-dire dans un langage commun qui respecte une "précision et une netteté excluant toute équivoque".
- 3) Validation : c'est la confrontation du modèle, formellement correct, au monde empirique pour déduire si ce modèle représente fidèlement la réalité dans le sens pour lequel il a été créé.

Ces principes constituent un cycle de modélisation qui est également valable pour les systèmes existants. Mais en l'absence de champ empirique, ce cycle se rétrécit à un seul principe qui est la formalisation, et par conséquent la modélisation devient plus difficile.

### 3.1.3. Typologie de modèles

Comme nous l'avons cité précédemment, Larvet [Larvet,1994] a spécifié quatre axes de modélisation qui débouchent sur quatre types de modèles. Walford mentionné dans [Meinadier,1998] donne une typologie générale des modèles, spécifiant pour chacun des exemples d'applications en ingénierie de systèmes :

- 1) Modèles cognitifs : l'objectif est de comprendre et de connaître le système. Dans cette catégorie on trouve des modèles :
  - Systémiques descriptifs ou explicatifs du système ou de l'environnement ;
  - Analytiques d'identification d'un processus à piloter ;
  - De comportement cognitif ou sensori-moteur de l'utilisateur.
- 2) Modèles prévisionnels : l'objectif est de prévoir les sorties ou simuler des comportements non encore observés. Les modèles appartenant à cette catégorie sont :
  - Modèles formels de comportement dynamique ;
  - Modèles analytiques de prévision de performance ;
  - Modèles de fiabilité.
- 3) Modèles normatifs : l'objectif est de réaliser le système. Les modèles sont :
  - Prescriptifs spécifiant les propriétés exigées du système ;
  - Constructifs spécifiant l'architecture et la conception du système.
- 4) Modèles décisionnels : l'objectif est de définir le pilotage du système. On trouve deux modèles principaux appartenant à cette catégorie:
  - Modèles de pilotage et d'optimisation du pilotage du système ;
  - Modèles de décision et d'aide à la décision visant à optimiser le procédé.

## 3.2. Analyse et modélisation du système technique

Il est essentiel, dans la démarche de conception et d'évaluation du système au sens général, et pour le système homme-machine en particulier, de l'analyser d'un point de vue technique. Larvet [Larvet 1994] a recensé sept objectifs

d'analyse, nous en retenons trois parmi eux. Le premier but est de comprendre ce que fait le système, ensuite de maîtriser sa complexité, et finalement de détecter le plus tôt possible les manques et les incohérences. Ces objectifs doivent être englobés dans une forme informationnelle facilitant la transmission de la compréhension aux utilisateurs. Ainsi l'analyse sert à modéliser le système en dégagant les contraintes techniques (en terme de dynamique du système), et en spécifiant les différents modes de fonctionnement. Les moyens disponibles pour réaliser cette analyse (donnant une forme informationnelle aux résultats) sont l'ensemble de méthodes largement utilisées en génie automatique et informatique.

Les méthodes d'analyse fonctionnelle ont généralement pour objectif de décrire et de comprendre le système. Il s'agit des démarches qui mettent l'accent sur ce que fait le système, sur ses fonctions, et ceci le plus abstraitement possible et indépendamment de la manière dont il sera architecturé et implémenté [Larvet 1994]. On distingue deux types de méthodes selon l'état de fonctionnement du système :

- 1) Des méthodes d'analyse du système en fonctionnement normal ;
- 2) Des méthodes d'analyse du système en fonctionnement anormal.

Dans le cadre de ce chapitre, nous faisons un choix restrictif par rapport à l'ensemble des méthodes existantes. Nous nous contenterons donc d'expliquer le principe des méthodes utilisées par la suite.

### 3.2.1. Les méthodes d'analyse du système en fonctionnement normal

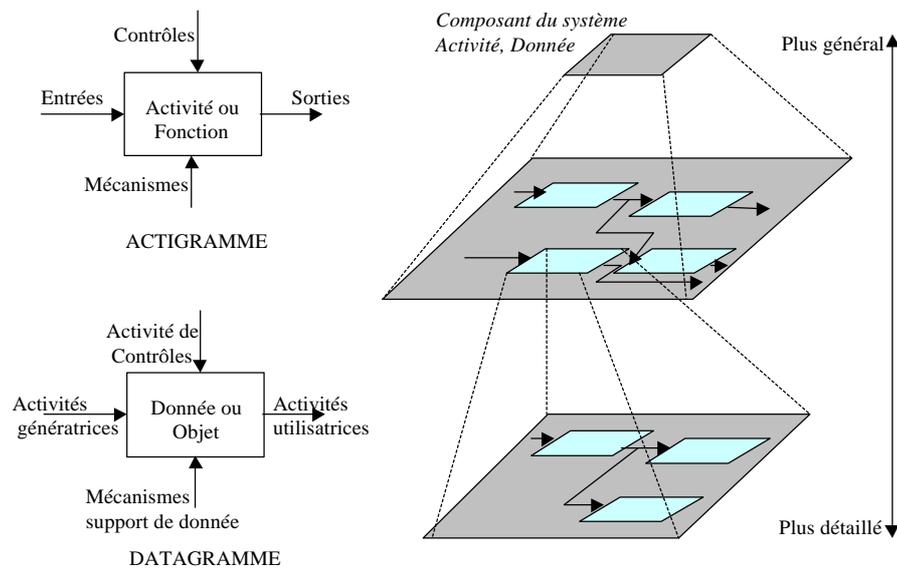
Les méthodes servent à décrire et à comprendre le système du point de vue structurel (la décomposition du système en sous-système, leurs interactions, les entrées / sorties) et fonctionnel. Fadier (cité dans [Kolski, 1997]) a recensé neuf méthodes : les Diagrammes-Blocs, les Graphes de Fluence, SADT, les Arbres Fonctionnels, MERISE, FAST, Direction des Engins, APTE (Application des Techniques d'Entreprise) et ASA (Analyse Structurée pour Automate). Récemment, des méthodes basées sur la technologie Orientée Objet OO, sont utilisées pour analyser et concevoir des systèmes informatiques, la plus connue est UML (unified Modeling language). Nous nous appuyons dans notre travail sur deux méthodes d'analyse, la première est SADT choisie pour la simplicité de sa mise en œuvre et la facilité de lire et de comprendre les modèles produits avec elle. Cette méthode sera utilisée pour l'analyse fonctionnelle de la cellule de désassemblage pour identifier les actions menant à la réalisation de son objectif. La deuxième méthode est UML que nous avons choisi pour modéliser l'application à développer pour la cellule de désassemblage. Ce choix est basé sur les aspects universels de ce langage et surtout sur le dispositif que ce langage met à notre disposition pour représenter les mécanismes permettant de résoudre les problèmes envisagés. Nous décrivons brièvement ces deux méthodes qui nous seront utiles par la suite.

#### 3.2.1.1. Modélisation fonctionnelle : SADT

Cette méthode permet de mettre en évidence les interactions et les activités (au sens SADT) des différentes fonctionnalités du système. L'analyse préconisée par cette méthode est de type descendante, hiérarchique et modulaire. La description du système que l'on désire étudier adopte comme point de départ le contexte global le plus abstrait possible du système. Ensuite le système sera décomposé en sous systèmes (du point de vue fonctionnel) de complexité moindre dans le but d'obtenir, a chaque phase de décomposition, des sous systèmes que l'on est en mesure de maîtriser, Figure 3.1).

Le SADT modélise le système selon deux points de vue :

- L'actigramme : se focalise sur les activités ou les fonctions du système, les boîtes symbolisent les activités et les flèches illustrent les flux de données, voir Figure 3.1.
- Le datagramme : se focalise sur les données ; les boîtes symbolisent les données et les flèches illustrent les activités.



**Figure 3.1 : Eléments de syntaxe de SADT**

Cette méthode couvre bien l'axe fonctionnel par l'actigramme, l'axe de données est couvert par le datagramme. Les modèles produits sont assez simples et faciles à comprendre, mais parfois incomplets. Le défaut principal de cette méthode est le fait que l'axe de la dynamique du système n'est pas entièrement couvert.

### 3.2.1.2. UML

UML est un langage de modélisation ; il définit neuf diagrammes pour représenter les différents points de vue de la modélisation. Ces points de vue

permettent de visualiser et de manipuler les éléments de la modélisation. Les diagrammes définis par UML sont les suivants :

- Les diagrammes d'activité : c'est une représentation du comportement d'une opération en terme d'action.
- Les diagrammes de cas d'utilisation : représentation des fonctions du système du point de vue de l'utilisateur.
- Les diagrammes de classes : représentation de la structure statique en terme de classes et de relations.
- Les diagrammes de collaboration : représentation spatiale des objets, des liens et des interactions.
- Les diagrammes de déploiement : représentation du déploiement des composants sur les dispositifs matériels.
- Les diagrammes d'états-transitions : représentation du comportement d'une classe en terme d'état.
- Les diagrammes d'objets : représentation des objets et de leurs relations ; ils correspondent à un diagramme de collaboration simplifié, sans représentation des envois de message.
- Les diagrammes de séquence : représentation temporelle des objets et de leurs interactions.

Comme le système technique peut se trouver aussi dans des situations de fonctionnement anormal, il existe des méthodes d'analyse en fonctionnement défaillant. Parmi ces méthodes on recense : AMDE (Analyse des Modes de Défaillances et leurs Effets), l'arbre de défaillance, les réseaux de Petri...etc. De plus, et dans le cadre d'analyse et de modélisation des entreprises certains travaux traitent le problème de réunification des méthodes d'analyse et de modélisation dans un langage commun, comme UEML [Vernadat, 2000] et [Harzallah,2000]. Dans le cadre de notre thèse, nous sommes moins intéressés par ces méthodes : donc nous nous contentons de les citer.

### 3.3. Analyse et modélisation des tâches humaines

La conception du système homme-machine ne se base pas seulement sur l'analyse du système technique. L'analyse et la modélisation des tâches humaines ont aussi leur importance dans l'étape de conception. Concrètement, on peut recenser cinq objectifs de cette analyse [Stammers, 1990] :

- 1) Conception et évaluation du système
- 2) Conception et évaluation de formation
- 3) Conception et évaluation d'interface

- 4) Sélection du personnel
- 5) Assurer la fiabilité du système

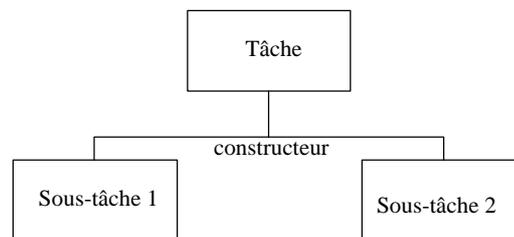
Plusieurs méthodes sont utilisées pour analyser et modéliser les tâches humaines, parmi les plus connues on cite : HTA (Hierarchical Task Analysis), GOMS (Goal, Operator, Method, Selection), MAD, UAN, SADT et Réseau de Petri.

Nous avons choisi d'utiliser les méthodes MAD et UAN dans le cadre de la présente thèse. Ce choix est justifié par le fait que MAD et UAN sont des méthodes simple à utiliser et à mettre en œuvre. De plus, leur complémentarité permet d'aboutir à un niveau d'analyse du système assez fin. En effet, MAD a été conçu par les ergonomes afin de servir de support à l'analyse des tâches et de leurs sous-tâches, dans une hiérarchie bien organisée, pour expirer la fonctionnalité de l'interface (système). Mais MAD ne permet pas l'expression des retours d'information en provenance de l'interface (système). De même, les contraintes temporelles sont difficiles à exprimer ; c'est pourquoi l'usage de UAN est nécessaire. Grâce à son format tabulaire, mettant en vis-à-vis les actions de l'utilisateur et les retours d'information de l'interface, UAN permet de décrire précisément le comportement perceptible de l'interface. Dans les paragraphes qui suivent, nous exposons ces deux méthodes dans leurs grandes lignes.

#### 3.3.1.1. MAD

MAD vise la description de tâches humaines dans le but d'une meilleure prise en compte de l'ergonomie dans la période de conception [Scapin, 1989]. Ceci fait de MAD une méthodologie rigoureuse fondée sur une approche psycho-ergonomique [Sebilotte, 1991].

Comme le montre la Figure 3.2, ce formalisme s'appuie sur une décomposition hiérarchique des tâches à l'aide de quatre constructeurs :



**Figure 3.2 : Décomposition hiérarchique des tâches en MAD**

- SEQ (séquence) : exprime l'enchaînement séquentiel de plusieurs tâches
- ALT (alternative) : traduit la possibilité de choix entre plusieurs tâches
- PAR (parallélisme) : désigne l'exécution entrelacée de plusieurs tâches par un même agent

- SIM (simultanéité) : dénote l'exécution parallèle de plusieurs tâches par des agents distincts

<p><b>Tâche</b> : Gérer la position</p> <p><b>Etat initial</b> : environnement contrôlé</p> <p><b>Etat final</b> : position contrôlable en toute sécurité</p> <p><b>But</b> : en fonction de la charge de travail gérer au mieux les positions de contrôle</p> <p><b>Précondition</b> : -</p> <p><b>Pastcondition</b> : gérer les priorités</p>
---

**Figure 3.3 : Extrait de la description de la tâche "Gérer la position" dans le domaine du contrôle aérien /El Farouki 1991 cité dans [Kolski,1997]**

Dans MAD, la description d'une tâche (comme le montre la Figure 3.3) comprend :

- Une identification de la tâche (numéro, nom de la tâche) ;
- Des éléments structurants (but, état initial, préconditions, corps de la tâche, postconditions, état final) ;
- Des attributs : tâche facultative (FAC), boucle (@), tâche prioritaire (PRIOR) et/ou interruptible (INTER), un niveau de priorité.

### 3.3.1.2. UAN

L'approche UAN (User Action Notation) a été proposée par Hartson [1990]. A l'origine, cette approche a été conçue pour servir de support à l'expression des spécifications des interfaces à manipulation directe. À l'aide de UAN, le concepteur spécifie les actions de l'utilisateur sur les dispositifs physiques, en prenant en compte les réactions du système et ses changements d'état interne pertinents. Le Tableau 3-1 illustre le format tabulaire d'une description de tâches élémentaires en UAN. La notation s'est ensuite enrichie d'opérateurs de composition et de relations temporelles, dans le but de modéliser les tâches complexes qu'un utilisateur peut accomplir avec un système. Parmi ces opérateurs, on relève :

- Séquence (A.B où A est placé au-dessus de B) signifie que les tâches A et B seront exécutées dans l'ordre A puis B.
- Choix (A | B) indique que l'utilisateur peut accomplir la tâche A ou la tâche B.
- Répétition (A\*) dénote l'accomplissement multiple de la tâche A.
- Attente (t>x secondes ou t<y secondes) signifie que l'utilisateur doit attendre x secondes, ou au contraire ne doit pas dépasser y secondes

avant d'exécuter la tâche suivante.

- Entrelacement bidirectionnel (A<->B) exprime que les tâches A et B s'effectuent durant le même intervalle de temps, mais une seule des tâches est active à la fois.
- Entrelacement monodirectionnel (A->B) signifie que la tâche A peut interrompre la tâche B puis s'exécuter jusqu'à sa fin, et non l'inverse.
- Parallélisme (A || B) dénote l'exécution simultanée des tâches A et B.
- Ordre indifférent (A&B) : l'utilisateur peut accomplir A puis B ou B puis A.

Tâche : Fermer Word		
Action utilisateur	Retour d'information de l'interface	État interne
Action 1 : fermer	Retour 1: enregistrer les modifications?	État 1
Action2: accepter	Retour 2: proposer la boîte de dialogique d'enregistrement	État 2
Action 3: entrer le nom de fichier	Retour 3 : sauvegarder et sortir	État 3

Tableau 3-1 : Description des tâches XXXX en UAN

### 3.4. Conclusion

Nous avons exposé, dans ce chapitre, les outils de modélisation du système homme-machine. En particulier, nous nous sommes intéressés aux outils de modélisation de systèmes techniques dans leurs phases de fonctionnement normal, et aux outils de modélisation des tâches humaines. chacun des outils choisis est mieux adapté que les autres à une phase du cycle de conception. C'est pourquoi l'usage de ces outils est complémentaire, ils seront utilisés dans la démarche d'analyse et de conception d'une cellule de désassemblage en tant que système homme-machine.

Le quatrième chapitre sera consacré aux problèmes de recyclage et notamment aux problèmes de démontage. Dans ce cadre, nous présenterons la plate-forme REX (Récupération, Recyclage, Réparation) en tant qu'approche des activités du projet "Rester Propre".

Chapitre

4

---

## Problématique du désassemblage : présentation générale

Le recyclage des produits techniques en fin de vie constitue une préoccupation mondiale dont l'importance grandit avec la densité des consommateurs. Les grandes agglomérations des pays industrialisés sont au premier rang dans la bataille du recyclage des déchets. La prise de conscience générale de ce problème a orienté les pouvoirs publics et les chercheurs sur ce terrain pour l'étude et la mise en place des procédés de recyclage des produits usagés. En particulier, l'étude du recyclage dit "noble", dont le démontage (ou désassemblage) représente son aspect fondamental, constitue une préoccupation grandissante.

Différents laboratoires travaillent sur la faisabilité du démontage. Certaines équipes travaillent sur le recyclage des circuits imprimés pour récupérer des matériaux par démontage ou démantèlement. D'autres équipes se penchent sur le recyclage d'appareils techniques complexes. A Berlin, par exemple, ils étudient et développent des procédés et des outils spécialisés pour le démontage, et la planification du désassemblage. A l'université technique de Karlsruhe, le laboratoire Wbk (Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik), développe des procédés de désassemblage et de démantèlement. Ils expérimentent des outils partiellement destructifs, voire totalement destructifs, comme la découpe au jet d'eau, ou au jet d'eau abrasive, ainsi que des outils non destructifs tels que l'outil multi-fonctionnel disposant d'un outil tournant (tournevis), d'une pince, d'un préhenseur pneumatique et d'une caméra embarquée. En Italie, une équipe du laboratoire ARTS de Pise étudie des méthodes de reconnaissance d'image, afin de fournir au programme de contrôle d'un robot, disposant d'outils dédiés au désassemblage, des informations sur l'environnement de ce robot. Il s'agit d'identifier des objets, leur position et leur orientation dans l'espace, parmi un ensemble d'autres objets. Suite à cette identification, l'objet ciblé est extrait de cet ensemble. Ces travaux pourraient faciliter les opérations de reconnaissance de composants et d'extraction de ces derniers. En France, à l'initiative de notre équipe et avec le soutien de la région Rhône-Alpes, le projet régional "Rester Propre" a démarré il y a 4 ans pour contribuer à la résolution du problème de recyclage.

Le travail mené dans ce projet est par nature pluridisciplinaire, car les dimensions automatique, informatique, ergonomique et plus généralement humaine sont omniprésentes. Le consortium était bien armé pour les traiter. Le projet a impliqué 3 équipes : Laboratoire d'Automatique de Grenoble, équipe Conduite des Système de Production (cellule automatisée, cellule semi-automatique, logistique, robustesse, diagnostic et processus de désassemblage), laboratoire Interaction Coopérative Téléformation Téléactivité (SGDT pour le recyclage, diffusion d'informations - workflow, architecture multi-agents de pilotage) et Laboratoire de Psychologie Sociale l'Equipe de Recherche sur les Interfaces Hommes-Systèmes de Travail (captage et présentation des informations nécessaires à l'homme).

Dans ce chapitre nous présentons brièvement la problématique du désassemblage et les approches de solutions développées dans le cadre des activités de "Rester Propre" [Rester Propre, (1997a), (1997b), (1998), (1999), (2000)]

## 4.1. Le recyclage dans le cycle de vie des produits

### 4.1.1. Recyclage noble

Le recyclage par un procédé propre et sûr, à savoir la récupération, le désassemblage, le recyclage et si possible la réparation, caractérisent ce que nous appelons recyclage noble. L'objectif de ce recyclage est de garder les produits ou les composants à leur niveau et de les remettre en circulation soit comme produits de seconde main, soit comme pièces détachées. Sur la Figure 4.1, le recyclage «noble» est schématisé par les "boucles" du bas (partie ombrée). En France, les principaux acteurs socio-économiques exploitant actuellement ce procédé sont des associations d'insertion de personnes fragilisées par la crise économique qui le font de façon manuelle. La rationalisation des étapes de démontage, de l'automatisation ou au moins de la semi-automatisation de certaines opérations, devient un moyen intéressant pour améliorer les performances tout en facilitant l'insertion professionnelle de ces publics.

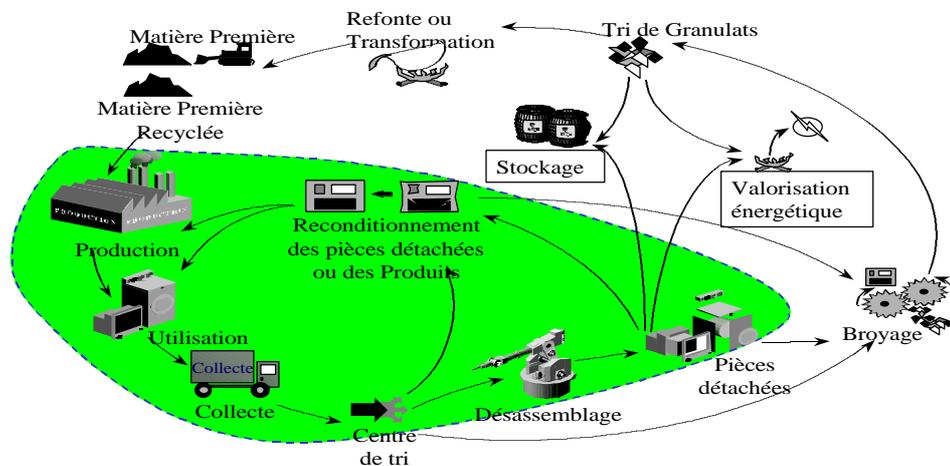


Figure 4.1 : Cycle de vie d'un produit et recyclage noble

#### 4.1.2. Plate-forme REX

Les activités du projet "Rester Propre" ont été principalement organisées autour de la plate-forme REX (Récupération, Recyclage, Réparation) dont la structure est suffisamment générique. La plate-forme est organisée comme indiqué sur la Figure 4.2 :

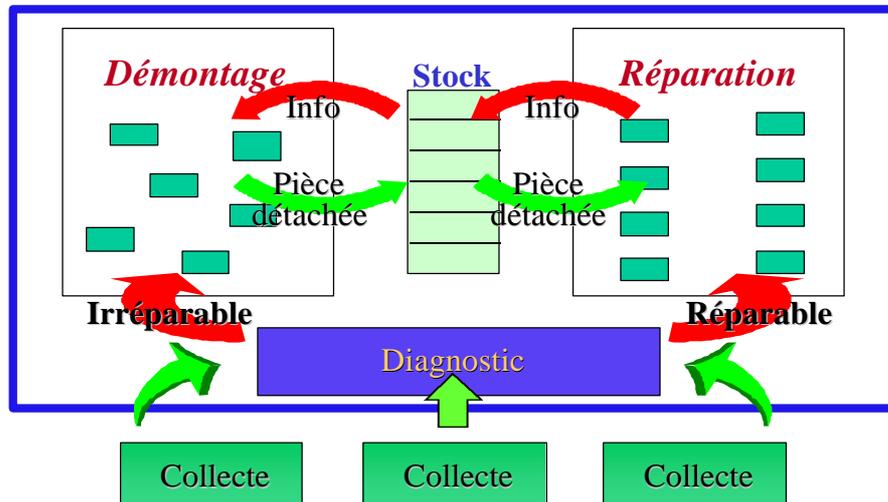


Figure 4.2 : Plate-forme REX

- 1) la cellule est un constituant de la plate-forme, elle est capable de prendre en compte le désassemblage et la réparation,
- 2) la plate-forme correspond à une configuration complète localisée géographiquement et capable d'assurer les activités de diagnostic, tri, désassemblage, recyclage, réparation,
- 3) le réseau de plates-formes est une entité de plus haut niveau, qui intervient dans la logistique et permet aux différentes plates-formes de s'entraider lors de besoin de pièces.

**Logistique et collecte** : Les produits en fin de vie sont récoltés par des centres de collecte. Plusieurs critères sont considérés : le type des produits à collecter, la spécialisation des centres de collecte, la localisation géographique des centres. Les produits collectés sont ensuite acheminés vers les plates-formes correspondant à leur recyclage pour un diagnostic (portant sur leur état) des possibilités de recyclage.

**Diagnostic** : Les produits entrants passent dans un centre de diagnostic dont le rôle principal est de déterminer si le produit peut être réparé ou non. Après ce diagnostic, les produits entrent, soit dans le secteur de réparation, soit dans le secteur de démontage.

Le diagnostic est effectué par un expert qui, en fonction de l'état du produit, de son expérience des produits et des habitudes des utilisateurs, va déterminer

l'orientation du produit. Cette analyse est effectuée selon les aspects externes des produits.

Le diagnostic est une étape importante dans la mesure où elle influence l'activité de démontage. Un mauvais diagnostic peut entraîner une perte de temps considérable, monopoliser inutilement certaines ressources (hommes ou outils), diminuer la production, etc.. Les critères permettant un bon diagnostic restent difficiles à établir et à évaluer dans la mesure où l'intérieur des produits n'est pas facilement accessible. L'expertise d'un spécialiste est nécessaire.

**Démontage et Réparation** : L'atelier de réparation accueille les produits sur lesquels le remplacement des composants défectueux est envisagé. Ces composants sont remplacés par des pièces détachées provenant directement du stock qui est alimenté par l'atelier de démontage. L'atelier de démontage, comportant des cellules qui démontent les produits en fin de vie pour extraire les composants ayant une valeur "pièce détachée" ou pour faciliter la récupération de "matière première". La liste des composants à démonter provient du Diagnostic et il s'agit pour les opérateurs de parvenir rapidement à démonter les pièces sélectionnées sans les détériorer. Ils doivent assimiler rapidement toutes les informations concernant les différents produits à traiter (les familles, les types, les composants, les concepts, les outils indispensables, les pannes fréquentes, ...) et utiliser ces connaissances afin de récupérer les composants avec un minimum de destruction. Le fonctionnement des constituants est vérifié avant ou après leur démontage en fonction des essais à effectuer.

Il est vrai que l'automatisation de certaines étapes peut être réalisée, comme par exemple la découpe au jet d'eau des habillages pour faciliter l'accès aux organes internes du produit blanc. Cependant, l'automatisation complète pour ce type de produits semble compromise dans la mesure où ces derniers ne sont pas conçus pour être démontés ; par ailleurs, la revalorisation de tels produits permet difficilement l'amortissement des coûts d'investissement. D'autres produits tels que les produits bruns se prêtent plus facilement à une automatisation partielle, compte tenu du niveau d'automatisation de leur fabrication et des procédés réversibles d'assemblage utilisés.

**Gestion des stocks** : L'ensemble des stocks (pièces détachées, matières premières et produits) et leur gestion constituent des liaisons dans l'environnement de la plate-forme et entre plusieurs plates-formes appartenant au même réseau.

## 4.2. Les difficultés liées au processus de démontage

### 4.2.1. Le démontage : profit ou perte ?

Les bénéfices du démontage ne s'expriment pas encore systématiquement sous la forme d'un profit financier, même si c'est parfois le cas, mais plutôt au niveau de son impact sur les marchés de l'occasion, de la pièce détachée et de la main d'œuvre. Plusieurs études ont été menées sur les quantités de

déchets produits par notre société, les moyens et les coûts pour les collecter et les recycler selon des techniques déjà acquises telles que le broyage et les tris sélectifs, le démantèlement et/ou le démontage manuel ainsi que la réparation [Girus,1996]. Le démontage figure comme la première étape du recyclage de produits techniques, et se justifie par les nouvelles contraintes légales, les taxes de dépollution, les débouchés des éléments extraits, et les conséquences sanitaires, sociales et économiques.

Les industriels, qui actuellement effectuent cette opération, la réalisent manuellement, dans la mesure où les volumes qu'ils traitent peuvent encore être absorbés de la sorte. Néanmoins, à la vue des futurs volumes qu'ils devront traiter, la rationalisation et l'automatisation du procédé, même partielle, devient une nécessité. En France, le domaine automobile s'est intéressé à la rationalisation des étapes de dépollution des véhicules (batterie, huiles, liquide de frein, ...). Les allemands (industriels et laboratoires), dans leur recherche de nouveaux procédés, ont aussi appliqué leurs études à d'autres produits manufacturés de type téléviseur, téléphone, lave-linge, ... . Il est évident que les coûts de démontage dépendent fortement des produits traités.

De plus, l'automatisation totale des opérations nécessaires n'est pas envisageable, même si la quantité des produits à traiter pourrait équilibrer, voire rentabiliser, le démontage. Les coûts de conception, de réalisation, d'entretien, de maintenance, et de recyclage d'une structure entièrement automatisée sont très élevés face à l'emploi d'opérateurs humains. De plus, la gestion complète et efficace d'une telle structure, où la flexibilité des installations doit répondre à la diversité des produits à traiter, paraît de nos jours illusoire. La difficulté consiste alors à allier les performances des machines à celles des opérateurs, dans un contexte d'automatisation partielle du procédé de démontage.

#### 4.2.2. Le passé du produit

Le démontage se trouve aussi confronté à des produits dont les caractéristiques techniques ne correspondent plus au produit d'origine. En effet, lors de leur utilisation ou de leur collecte, les produits ont pu subir des modifications telles que des améliorations, ajouts, soustractions ou changements de composants (constituants ou éléments de fixation), dommages,... . D'autres altérations telles que la corrosion, les salissures ou les poussières, .... peuvent compliquer l'étape de démontage. Toutes ces dégradations apportent des incertitudes aussi bien au niveau de la validité des connaissances théoriques sur le produit et de l'efficacité des opérations de démontage qu'au niveau de la pertinence du choix d'une gamme de démontage. Les choix effectués en conception peuvent réduire la probabilité d'occurrence de certaines de ces altérations par exemple en changeant des matériaux, ou en condamnant l'accès aux parties internes du produit. Néanmoins, à ce jour, d'autres facteurs tels que le coût de fabrication, priment sur une conception prévenant certaines des altérations ci-dessus.

#### 4.2.3. L'accès aux informations concernant le produit

La grande diversité des catégories de produits, des fabricants et des marques commerciales (Brandt, Thomson, ...), exige d'attribuer à chaque produit un fichier attribué, contenant l'ensemble de ses caractéristiques (géométriques, nomenclature, séquences d'assemblage,...). Bien que les fabricants disposent pour leur part de différentes versions de fichiers de modèles CAO, CFAO et GFAO spécifiques pour chacun de leurs appareils, la classification des appareils possédant les mêmes caractéristiques faciliterait la mise en place d'une base de données regroupant des catégories de produits. Les outils à développer pour automatiser le démontage devraient prendre en compte les différences de chaque produit (par exemple, l'emplacement d'un composant, le type et la position des vis de fixations). De plus, le transfert ou la saisie des données informatiques concernant les appareils à recycler ne sont pas évidents, dans la mesure où les informations nécessaires au démontage sont contenues dans des fichiers CAO de formats différents, agencées de manières différentes d'un constructeur à l'autre, et pas forcément accessibles. Pour saisir les informations dans une base de données de démontage, il faudrait d'abord établir les variables pertinentes ainsi que les valeurs estimées de ces variables. L'appel à des experts du démontage devient alors nécessaire.

#### 4.2.4. Les séquences de démontage

Il est nécessaire de considérer le fait que lors d'un démontage, si le produit n'est pas conforme à ses caractéristiques d'origine, il peut tout de même être traité. Lorsqu'une séquence de démontage est appliquée pour démonter un produit, l'objectif visé est d'extraire les constituants figurant sur une liste prédéfinie, en tenant compte d'un mode de démontage. Dans notre cas, lors de l'exécution d'une séquence de démontage, si une opération ne peut plus être appliquée au produit (ce dernier ne correspond pas aux connaissances a priori ou une opération est en échec), il est nécessaire d'évaluer des alternatives de traitements avant de songer à ne plus démonter le produit. Il s'agit donc de définir et d'évaluer une modification de la séquence par un simple changement d'outil et/ou d'opération (et par conséquent de mode de démontage) ou d'objectif (modification de la liste de constituants à extraire). L'évaluation doit prendre en compte différents critères portant sur les coûts, les conséquences écologiques, le taux de réussite... Nous sommes alors confronté à un problème de séquençage multi-critères auquel s'ajoutent les incertitudes relatives à la connaissance incomplète du produit. La difficulté consiste à choisir parmi un ensemble de séquences opératoires celles qui constituent le meilleur compromis entre les critères pondérés choisis.

#### 4.2.5. La supervision du démontage

Face à cet ensemble de contraintes, il est intéressant de développer la supervision du démontage. Nous entendons par le terme supervision la conduite de l'installation en fonctionnement normal, mais aussi en fonctionnement transitoire lorsqu'il s'agit d'une reprise après incident ou une réorientation suite à une perturbation (changement d'objectifs). Le choix des

actions transitoires pour parvenir à un nouveau régime normal dépend de l'état du système lors du diagnostic, des causes de la défaillance ou de la déviation, et de l'état du système à l'origine du prochain fonctionnement normal. Un outil d'aide à la décision est utile pour assister l'homme et informer ce dernier des différentes alternatives possibles. Il est à noter que l'homme intervient au niveau de la prise de décision dans la conduite de l'installation, mais aussi au niveau d'opérations de démontage sur le produit, en tant que ressource. Dans ce contexte de présence de l'homme au sein du processus de démontage, la prise en compte de ses compétences tant au niveau décisionnel qu'au niveau opérationnel est importante, au même titre que sa sécurité.

### 4.3. Analyse de l'existant

Afin de recenser les différentes actions manuelles de démontage de produits techniques, nous avons étudié (dans le cadre du projet Rester Propre) les opérations de désassemblage et de démantèlement pratiqués dans une société de récupération et de réparation d'appareils électroménagers. Dans la mesure où aucun processus automatisé ou semi-automatisé de démontage n'existe industriellement à ce jour, cette étape constitue une familiarisation avec le domaine du démontage, bien qu'il soit manuel.

#### 4.3.1. Le terrain d'étude

L'association ENVIE<sup>3</sup>, implantée sur Grenoble, nous a offert son site de récupération et de réparation de produits blancs comme support à cette étude. L'activité de Démontage/Récupération est destinée à fournir des composants du produit à démonter, soit au magasin de pièces détachées, soit à un autre type de revalorisation (matière ou énergie). Le choix des composants à extraire est défini suite à une phase de diagnostic en amont de l'activité de démontage.

#### 4.3.2. Analyse du travail manuel

##### 4.3.2.1. Analyse du travail

L'analyse du travail a consisté à identifier, suite à une étude des différents produits, les composants qui sont fréquemment démontés. Ensuite, une technique d'analyse à base de verbalisation et d'observation a permis de dégager un certain nombre de connaissances des employés et des experts. Les entretiens, de type exploratoire, fournissent une vue globale de l'activité de démontage manuel ainsi que des points détaillés tels que des séquences partielles de démontage, la gestuelle de l'action et les outils nécessaires. Cette démarche globale réalisée auprès de personnes de niveau d'expertise différent, était caractérisée par des verbalisations contraintes (Par exemple : "Pouvez-vous me décrire toutes les étapes de démontage d'un produit? A chaque étape nous insistions sur le "Pourquoi" et le "Comment") et par une prise de notes in extenso. Ces entretiens exploratoires ont été très importants. Ils ont permis d'établir une description globale des séquences de

---

<sup>3</sup> Le réseau ENVIE (Entreprise Nouvelle Vers l'Insertion par l'Economie) est constitué de 27 sites dispersés dans toute la France.

désassemblage, ainsi que des aspects plus spécifiques comme l'ordre de démontage, les bons gestes à faire, les outils à utiliser. Cependant, la verbalisation d'une activité experte étant difficile [Leplat,1993], une observation directe de la mise en situation et de démontages réels complète les informations obtenues par la verbalisation.

L'ensemble de ces renseignements contribue à la modélisation des procédures de démontage manuel sous forme de tableaux, faisant apparaître l'objectif général et une décomposition en sous-buts de la procédure. Cependant, l'enchaînement des opérations de démontage n'apparaît pas clairement. Un exemple représentatif de ces procédures se trouve dans l'annexe A.

#### 4.3.2.2. Représentation de la séquence de démontage par un graphe ET/OU

Une description du procédé de démontage spécifique au produit traité permet de visualiser la séquence opératoire de démontage selon un expert. De plus, la décomposition de but en sous-buts simplifie la représentation du procédé manuel de démontage (Figure 4.3).

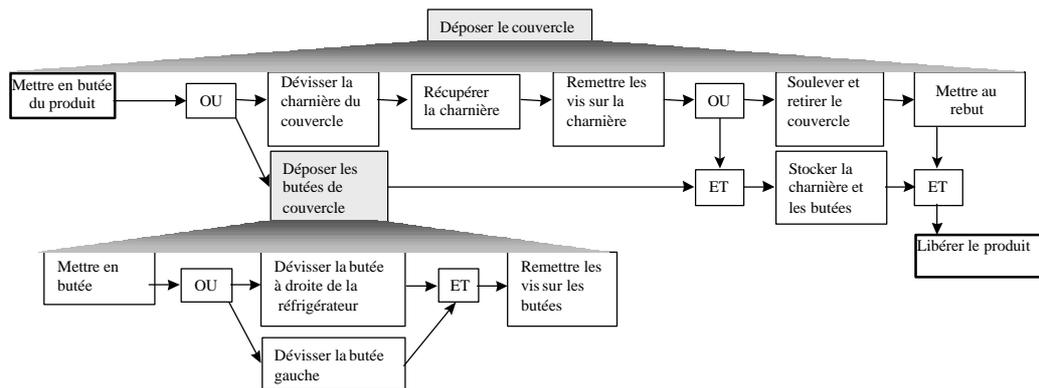


Figure 4.3 : Procédure de démontage manuel d'un couvercle

En étudiant les tableaux de procédures et les séquences manuelles, une réorganisation des opérations de démontage est possible, assurant en cas d'automatisation partielle des possibilités de démontage complètement différentes. En effet, la gestuelle humaine et les outils utilisés ne sont pas comparables au comportement d'un robot et de ses outils spécialisés. De plus, le nombre de ressources automatisées peut faciliter le parallélisme dans le processus de démontage.

## 4.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la problématique du recyclage sous l'angle du projet "Rester Propre". Ainsi, nous avons présenté la plate forme de désassemblage, et les difficultés liées au processus de désassemblage. Ensuite, nous avons complété cette présentation par une analyse de ce qui existe en mettant l'accent sur l'analyse du travail manuel en vue d'une future automatisation.

Le prochain chapitre sera consacré à la modélisation de la cellule de désassemblage en vue d'extraire les principales actions conduisant à la réalisation des stratégies de désassemblage.

Chapitre

5

---

## Modélisation de la cellule de désassemblage

L'analyse approfondie des activités de désassemblage, qui sont menées au sein d'ENVIE, montre les différentes étapes du processus de désassemblage, commençant par le diagnostic du produit destiné à être démonté et finissant par l'extraction des pièces, exécutée d'une manière manuelle. Un opérateur ou un groupe d'opérateurs prennent en charge, à l'aide d'outils manuels et de leurs expériences individuelles, toutes les activités de désassemblage. Dans le souci d'améliorer la productivité de tels systèmes, introduire un certain degré d'automatisation contribue à une solution appropriée à condition de prendre en considération la dimension humaine de ce type de systèmes.

Dans ce chapitre, nous proposons une structure d'automatisation de la cellule de désassemblage. Ensuite, nous traitons des scénarios de désassemblage pour répondre à la question : "Comment se déroule le processus de démontage dans la cellule?" Enfin, nous discutons de la modélisation de certaines fonctions de cette cellule et du mode de communication entre elles et avec le système physique, en soulignant la distinction entre le système de supervision/contrôle de la cellule et le système de réalisation ou d'exécution.

### 5.1. Présentation de la cellule

La cellule de désassemblage/démontage constitue l'un des éléments de base d'un système de désassemblage. Son objectif est la réalisation du démontage d'un produit par des procédés non destructifs ou semi-destructifs.

Une cellule de désassemblage, qui est capable de traiter des produits en fin de vie peut difficilement être automatisée, tellement les aléas sont importants. La souplesse nécessaire, dans beaucoup de cas, ne peut être prise en compte que par l'homme. Une cellule de désassemblage se présente donc comme un système Homme-Machine, dont l'objectif est de réaliser le

désassemblage dans les meilleures conditions possibles. Il s'agit d'utiliser de façon optimale l'homme et la machine, en tenant compte des capacités de chacun. La Figure 5.1 montre les différents acteurs intervenant dans cette cellule. La présence de chacun de ces éléments est justifiée par les besoins de flexibilité et de réactivité du procédé de démontage :

- Le robot offre une grande flexibilité de mouvements associée à une puissance de manipulation des produits, ainsi qu'à des degrés de liberté permettant l'accès à certains composants.
- L'automate de mise en butée, associé au robot, garantit différentes mises en position du produit avant toute action.

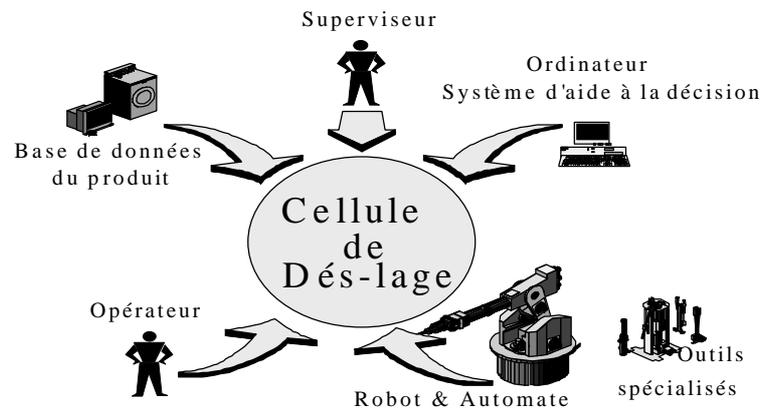


Figure 5.1 : Acteurs de la cellule de désassemblage / démontage

- Les outils spécialisés, développés dans le laboratoire WBK de Karlsruhe [Binder, 1995], sont de deux types :
  - 1) un outil de découpe au jet d'eau ;
  - 2) un outil multifonctionnel, composé d'un outil tournant (tournevis ou foret), d'une pince et d'un préhenseur pneumatique. Cette association de fonctions diminue les temps de changement d'outils entre les opérations de dévissage et l'extraction d'un composant.
- La base de données concerne non seulement les informations sur le produit (sa structure et sa géométrie), mais également les informations se rapportant aux procédés de démontage et à l'utilisation des outils.
- Le SIAD (système interactif d'aide à la décision) représente l'assistant de l'homme. Il supervise la cellule et exécute ou participe aux opérations prévues, automatiques ou nécessitant une coopération homme-machine. En cas de fonctionnement anormal, il devient un outil d'évaluation capable de fournir différentes alternatives.
- L'homme assure des fonctions d'opérateur ou de superviseur. L'opérateur

est un acteur dans le processus de démontage tandis que le superviseur choisit des alternatives proposées par le SIAD.

Cette structure de la cellule de désassemblage correspond au système homme-machine à deux niveaux d'interaction (voir paragraphe 1.3.1 du premier chapitre). On peut donc représenter la cellule sous la forme montrée dans la Figure 5.2, où le terme robot regroupe : les outils spécialisés, l'automate de mise en butée et le robot lui-même. Le système d'aide à la décision (SIAD) regroupe l'ordinateur et la base de données.

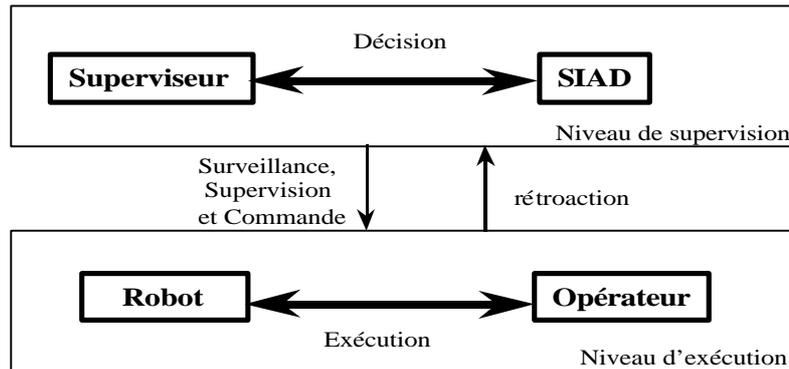


Figure 5.2 : Niveaux d'interaction dans la cellule de désassemblage

Dans le cadre de cette thèse, nous nous limitons à l'étude de ces deux niveaux d'interaction : le niveau de supervision ou le système de contrôle et le niveau d'exécution ou le système contrôlé. Le système de contrôle représente l'interaction entre le superviseur humain et le SIAD. Le système contrôlé représente l'interaction entre l'opérateur humain et le robot. Cependant, ce découpage n'est pas unique au sein de la cellule de désassemblage. En effet, on peut distinguer deux autres formes d'interaction (Figure 5.2) : interaction entre l'opérateur et le SIAD et l'interaction entre le superviseur et le robot.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la présence de l'homme dans le système de désassemblage est importante, non seulement au niveau des procédures de démontage, mais aussi lors des prises de décision. Cependant, l'homme peut être considéré aussi bien comme un élément de fiabilité que comme un élément perturbateur. Il s'agit donc de concevoir un système de désassemblage de telle sorte que l'homme devienne un point fort des fonctions qu'il doit remplir. Dans notre cas, il est considéré à la fois comme une ressource, c'est-à-dire un moyen de production au travers de procédures manuelles, et comme un preneur de décision dans la conduite du système de production, ici représenté par la cellule de démontage. Dans chacun de ces cas, il s'agit de mettre à la disposition de l'homme tous les moyens nécessaires pour qu'il puisse accomplir correctement sa tâche et prendre les décisions qui s'imposent. Par exemple, pour les activités de démontage manuel, l'ergonomie et l'organisation du poste de travail sont des atouts, au même titre que la présence d'un didacticiel, offrant la possibilité d'une aide au démontage du produit. En ce qui concerne les tâches décisionnelles, la décision finale doit être l'aboutissement de stratégies multi-critères, dont l'évaluation relativise l'impact des solutions possibles les unes par rapport aux autres. L'homme apporte son expérience au dispositif.

## 5.2. La stratégie de désassemblage

Ce volet va essayer de répondre à la question suivante : comment se déroule le processus de démontage dans la cellule? La réponse à cette question nous servira plus tard à établir la liste des activités effectives au sein de la cellule. Tout d'abord une architecture de communication sera présentée, ensuite diverses étapes de démontage seront expliquées. Ce volet est en partie adapté de [Chevron, 1999, pp(67-74)].

La présence d'acteurs, de relations et d'échange d'informations entre ces acteurs nécessite l'étude d'une structure du système de production, qui, à partir du comportement de chaque acteur, déterminera les influences et les limites des actions des ressources (ou acteurs) entre elles. Dans le cas de la cellule de désassemblage, nous la décomposons en deux sous-systèmes : sous-système d'exécution physique, et sous-système de supervision et contrôle. Ce dernier se compose de deux sous-systèmes : supervision globale et supervision locale. Les entrées du système de désassemblage sont les informations et le produit à démonter, la sortie est un produit démonté (voir Figure 5.3). Les informations sont : le ou les modèles CAO du produit, le modèle établi après avoir examiné le produit usé, les contraintes législatives, économiques.

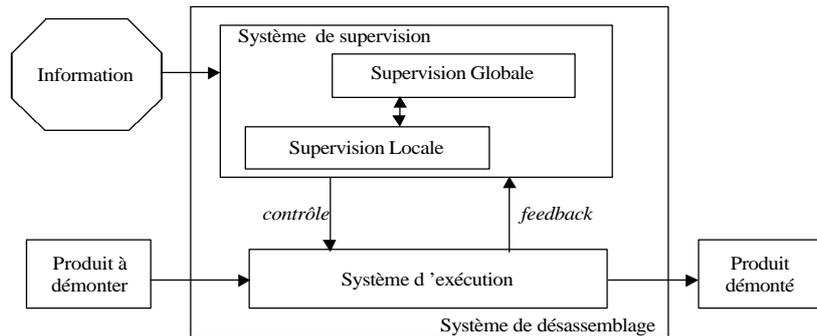


Figure 5.3 : Les sous-systèmes du système de désassemblage

L'architecture globale d'échange d'informations entre les différents sous-systèmes de la cellule de démontage est schématisé dans la Figure 5.4.

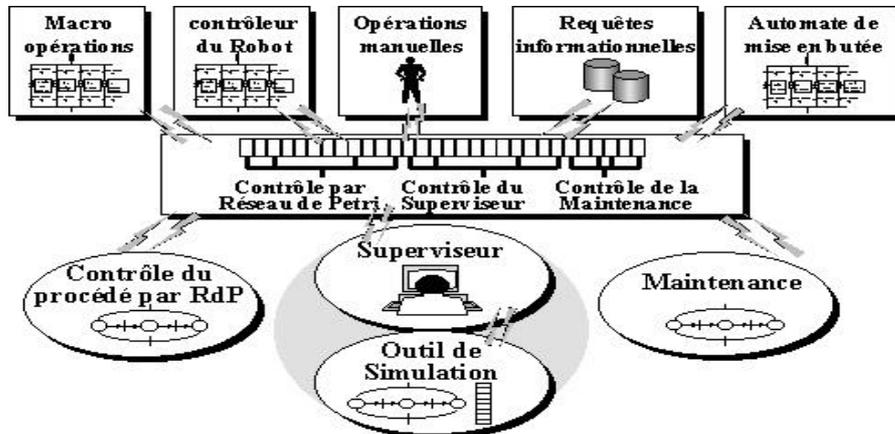


Figure 5.4 : Architecture de communication dans la cellule /adapté de [Chevron,1999]/



L'appel à la supervision globale intervient en cas d'absence du fichier de travail (nous appelons un fichier de travail l'ensemble des données indispensables pour réaliser le démontage d'une séquence choisie, plus d'explications sont données dans le chapitre suivant). Le démontage d'un composant (pièce) fait appel aux procédures de démontage d'une fixation, de découpage et d'extraction. En cas de problèmes, la supervision locale est sollicitée.

5.2.1.2. Démontage d'une fixation

Pendant le démontage d'un composant (pièce), un appel à la procédure de dévissage est effectué pour défaire une fixation. Selon les informations sur le type de fixation, un changement d'outil pourrait intervenir. La supervision locale est sollicitée périodiquement, soit pour initialiser la procédure (y compris proposer une autre solution), soit pour permettre l'intervention de l'opérateur. Le déroulement de cette procédure est montrée sur la Figure 5.6.

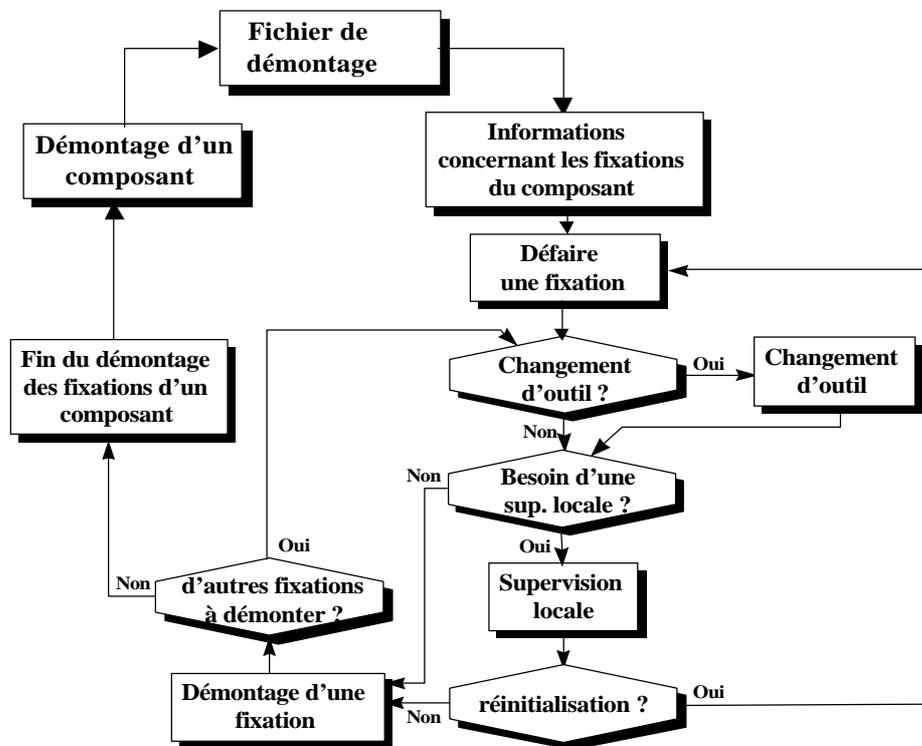


Figure 5.6 : Déroulement du démontage d'une fixation

5.2.1.3. Démontage par découpe

De la même manière que le dévissage, la découpe intervient pendant la procédure de démontage d'un composant.

Le recours à la découpe a pour objectif de défaire une fixation non dévissable ou de faciliter l'accès à un composant (découpage d'une partie de produit ou du produit entier).

La Figure 5.7 montre le déroulement de la procédure de découpage. La supervision locale est appelée, soit pour initialiser la procédure, soit pour

permettre l'intervention de l'opérateur.

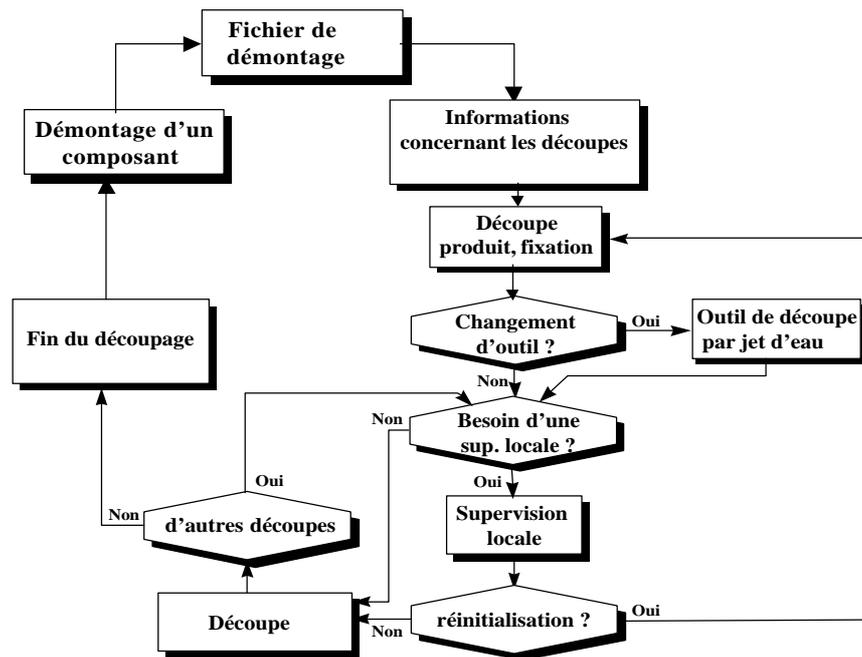


Figure 5.7 : Déroulement de découpage

#### 5.2.1.4. Extraction

La procédure d'extraction se déroule quand le composant est libéré complètement de ses liens avec le produit. Au cas où la libération serait défectueuse, la supervision locale est appelée pour engager à nouveau la procédure de dévissage et/ou de découpage. Le déroulement de cette procédure est montrée dans la Figure 5.8.

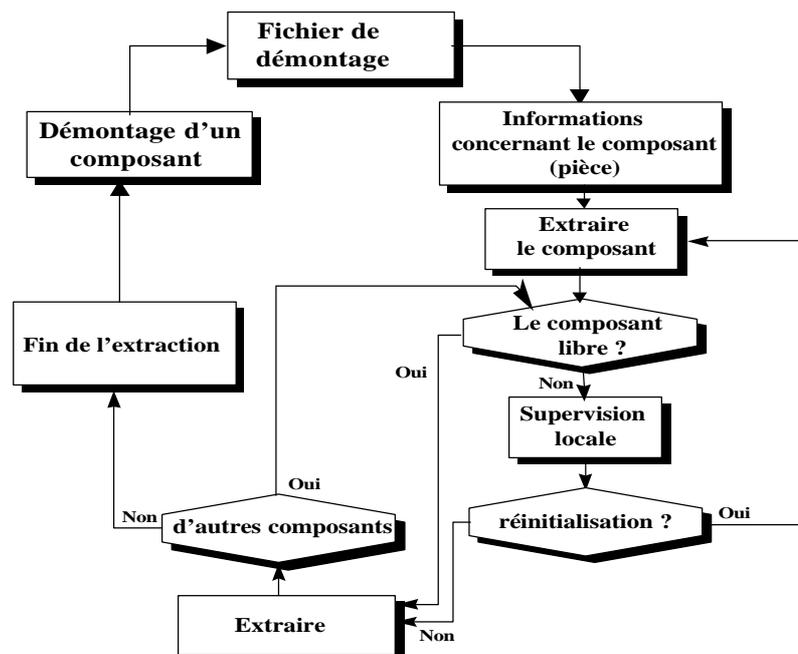


Figure 5.8 : Déroulement de l'extraction

5.2.1.5. La supervision locale

La supervision locale, mis à part qu'elle soit appelée dans les quatre cas ci-dessus, a la responsabilité directe du déroulement du processus de démontage par le système d'exécution. Après avoir reçu le fichier de travail envoyé de la supervision globale, le démontage du premier élément de la séquence est initialisé : si le démontage de cet élément ne demande pas d'analyse supplémentaire, les procédures de dévissage, de découpage et d'extraction sont lancés. Si, par contre, l'analyse est nécessaire (à cause de la non conformité de description du produit), un choix entre l'analyse automatique et manuelle est proposé. Le choix de l'analyse automatique se base sur un déplacement adéquat du robot pour permettre à une caméra embarquée de capturer une image de l'élément à démonter afin de procéder à une analyse par reconnaissance de formes de cette image. L'assistance humaine peut être toujours sollicitée dans ce mode d'analyse. Le choix d'une analyse manuelle se base principalement sur les compétences de l'opérateur humain pour résoudre le problème et sélectionner la procédure à lancer.

Si la procédure lancée échoue ou si la solution trouvée n'est pas satisfaisante, un appel à la supervision globale est propagé. Dans le cas contraire, le démontage de l'élément qui suit dans la séquence est à réaliser. Le déroulement de ce scénario est montré dans la Figure 5.9

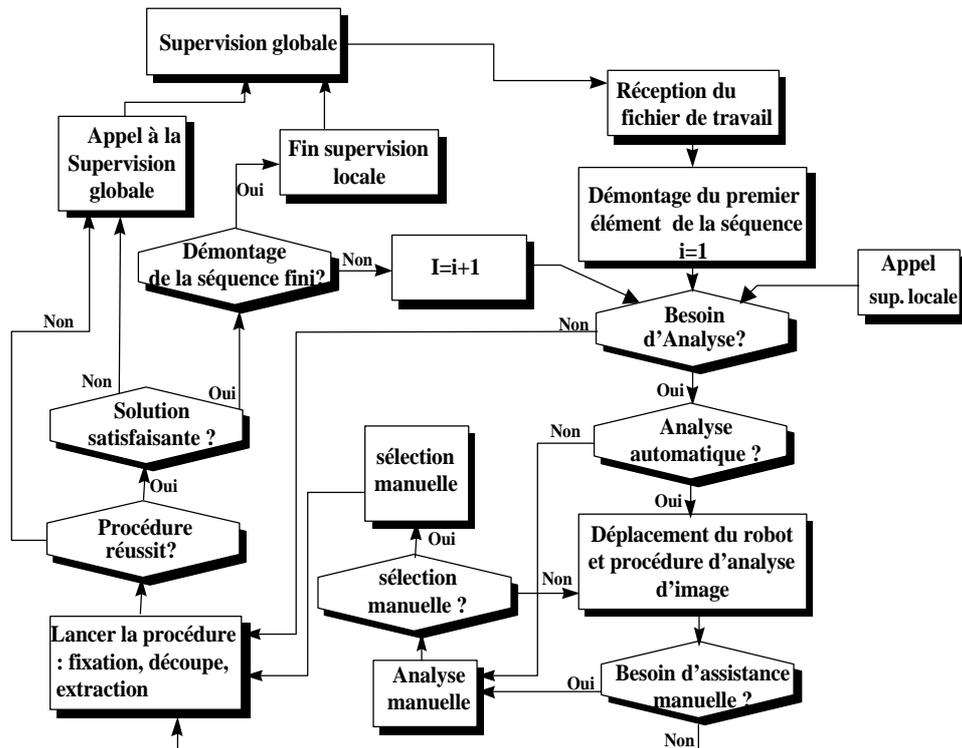


Figure 5.9 : Déroulement de la supervision locale

5.2.1.6. La supervision globale

La supervision globale se charge de préparer le fichier de travail de chaque produit à démonter. Elle émet ce fichier à la supervision locale et elle suit sa réalisation.

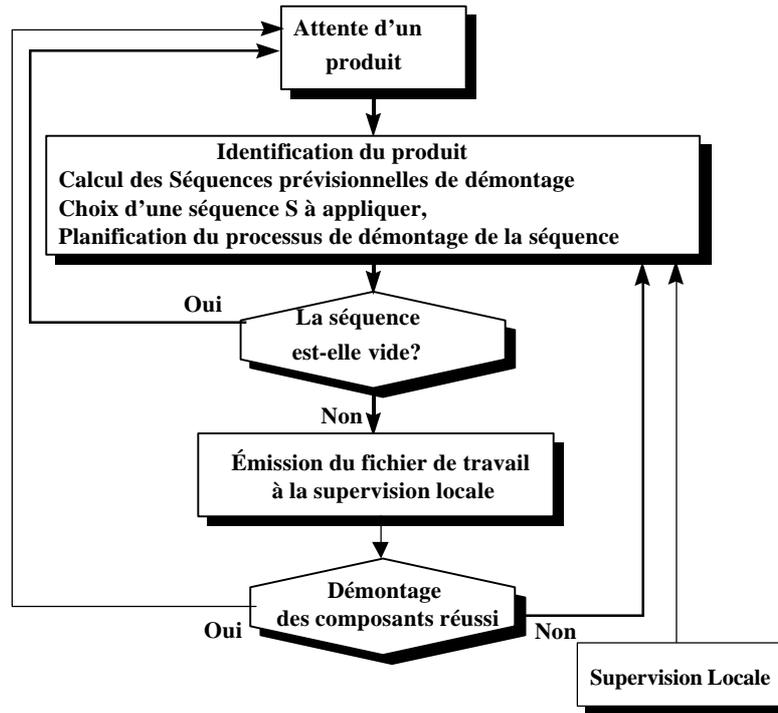


Figure 5.10 : Déroulement de la supervision globale

Durant les procédures de démontage, la supervision globale est appelée lorsque la supervision locale ne parvient pas à obtenir de solution satisfaisante. Elle est donc chargée de remettre en question le fichier de travail initialement prévu par elle-même. Ce fichier est généré à partir d'une identification du produit à démonter, du calcul d'un ensemble de séquences de démontage et la sélection de celle qui sera appliquée. La Figure 5.10 montre le déroulement de la supervision globale.

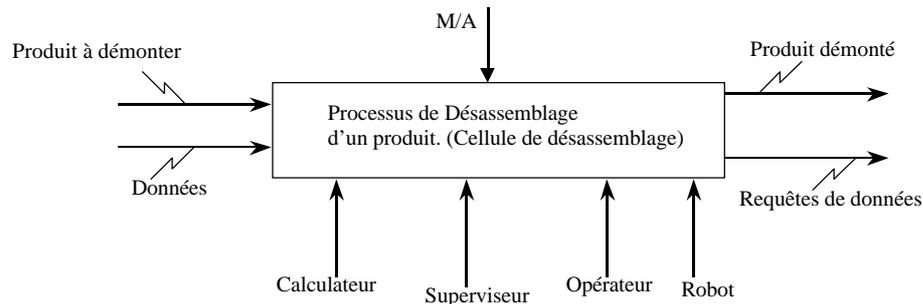
### 5.3. Modélisation de la cellule de désassemblage

Dans l'objectif de définir ce que le système doit faire (et non pas comment il doit le faire), nous allons analyser la fonctionnalité de la cellule de désassemblage (au sens SADT). Cette analyse a pour objectif de déterminer les actions principales réalisées au sein de la cellule. Ces actions seront analysées pour les spécifier du point de vue ergonomique et technique. Ensuite ces actions déterminées serviront plus tard à recenser toutes les activités dans la cellule. Ces activités feront l'objet d'une étude approfondie pour définir d'abord les activités partageables entre l'homme et la machine, et optimiser ensuite, en vue de certains critères, ce partage selon les possibilités respectives et opératoires des hommes et des machines à assurer ces tâches, d'un point de vue technique et aussi ergonomique (pour les humains).

#### 5.3.1. Diagramme "cellule de désassemblage" (A)

La fonctionnalité principale de la cellule de désassemblage, prise dans le contexte cité ci dessus (voir Figure 5.3), est de désassembler un produit. Ceci constitue le niveau le plus haut dans le diagramme de SADT. Nous donnons à

cette fonctionnalité l'appellation suivante : *Processus de désassemblage d'un produit*<sup>4</sup> (Figure 5.11).



**Figure 5.11 : Diagramme "cellule de désassemblage" (A)**

#### 5.3.1.1. Les entrées

**Données** : un modèle CAO du produit, information sur le produit diagnostiqué, information relative à l'environnement du système (écologique, économique).

**Produit à démonter** venant du centre de diagnostic.

#### 5.3.1.2. Les sorties

**Des requêtes de données** concernant les produits traités et l'environnement.

**Sous-produit (composant, pièces)** : c'est le résultat de l'application du processus de désassemblage sur le produit.

#### 5.3.1.3. Données de contrôle

On suppose que la cellule doit être mise en route ; pour cela, on a prévu le flux de contrôle (Marche-Arrêt M/A).

#### 5.3.1.4. Support de la fonctionnalité

L'accomplissement du processus de désassemblage est garanti par deux groupes d'acteurs : groupe humain (superviseur, opérateur), et groupe technique (calculateur, robot), leurs définitions sont données dans le premier chapitre, paragraphe 1.3.1.

### 5.3.2. Diagramme "Processus de désassemblage d'un produit " (A1)

A ce niveau d'abstraction, nous décomposons la fonctionnalité "*Processus de désassemblage d'un produit*" en deux sous-fonctionnalités : l'une est "*supervision et commande du processus*", l'autre est "*exécuter le processus*".

La Figure 5.12 représente le diagramme A1. Les flèches en gras montrent les entrées et les sorties de la fonctionnalité "*Processus de désassemblage d'un produit*" que nous avons présenté précédemment.

<sup>4</sup> Nous utilisons l'Italique pour souligner les fonctionnalités

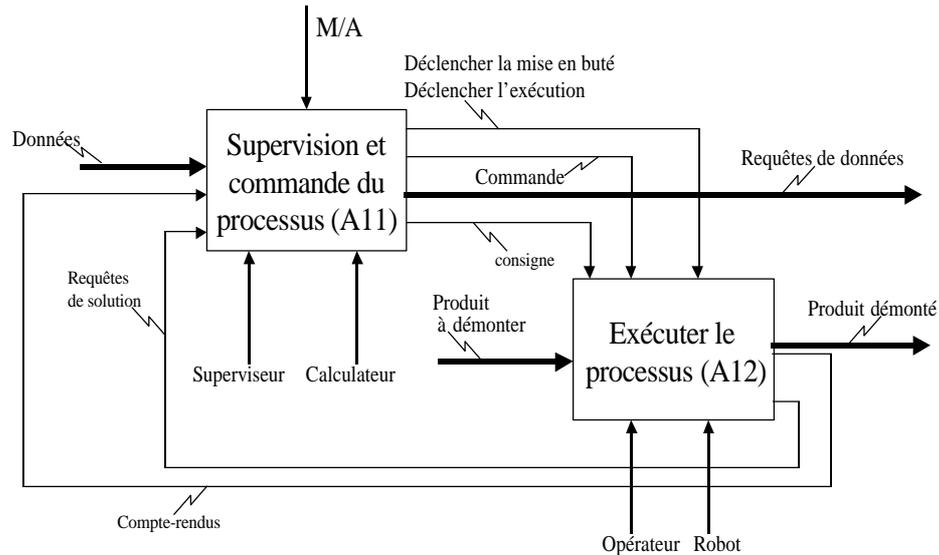


Figure 5.12 : Diagramme "processus de désassemblage d'un produit" (A1)

### 5.3.2.1. Fonctionnalités à réaliser

A11 "*supervision et commande du processus*" : cette fonctionnalité est une abstraction de deux fonctionnalités : l'une est "*supervision globale*", l'autre est "*supervision locale*".

A12 "*exécuter le processus*" : par cette fonctionnalité, on fait l'abstraction de deux fonctionnalités, la première est "*mettre en butée*", la deuxième est "*exécuter*".

Ainsi, on traite dans A11 la supervision et la conduite de la cellule, en vue d'élaborer les séquences de démontage et de commander la partie opérationnelle de la cellule. Dans A12, on ne s'intéresse qu'aux aspects de réalisation des stratégies de démontage.

### 5.3.2.2. Interfaçage entre "supervision et commande du processus" et "exécuter le processus"

L'activation (M/A) de "*supervision et commande du processus*" produira les données suivantes, destinées à "*exécuter le processus*" (voir Figure 5.12) :

- Déclencher la mise en butée : est un signal de contrôle destiné à déclencher l'action "**fixer**"<sup>5</sup>, qui est une action de la fonctionnalité "*mettre en butée*".
- Déclencher l'exécution est un signal de contrôle destiné à déclencher l'action "**dévisser**" et/ou "**découper**", qui sont des actions de la fonctionnalité "*exécuter le processus*". Ce signal sera activé après la confirmation de l'exécution réussie du premier signal (fixation faite).
- Commande (consigne) est un signal de contrôle destiné au robot (opérateur). Les actions visées sont toutes les actions de la fonctionnalité

<sup>5</sup> Pour distinguer les actions, nous les écrivons en gras

"exécuter le processus".

L'activation de la fonctionnalité "exécuter le processus" produira les sorties suivantes :

- Requêtes de solution : Ce sont des requêtes de commande ou d'information destinées à la fonctionnalité "supervision locale" de la fonctionnalité "supervision et commande du processus".
- Comptes-rendus : toutes les actions de la fonctionnalité "exécuter le processus" rendent compte à la fonctionnalité "supervision locale". Ces comptes-rendus sont les résultats d'application de la commande engendré par l'action "**commander**" de la fonctionnalité "supervision locale".

### 5.3.3. Diagramme "supervision et commande du processus" (A11)

La supervision et la commande du processus est une abstraction de deux fonctionnalités : la première est la "supervision globale", l'autre est la "supervision locale" (Figure 5.13). Les flèches en gras montrent les entrées et les sorties de la fonctionnalité "supervision et commande du processus".

#### 5.3.3.1. Fonctionnalités à réaliser

A111 "supervision globale" : cette fonctionnalité est l'abstraction de quatre actions : **préparer**, **diagnostiquer**, **décider** et **suivre**. Nous considérons que, par ces quatre actions, cette fonctionnalité assure : le calcul et la modification du modèle de produit, la génération de toutes les séquences pour démonter un produit, la sélection de la meilleure séquence, la planification du processus de démontage de cette séquence, la génération du fichier de travail et le suivi de sa réalisation.

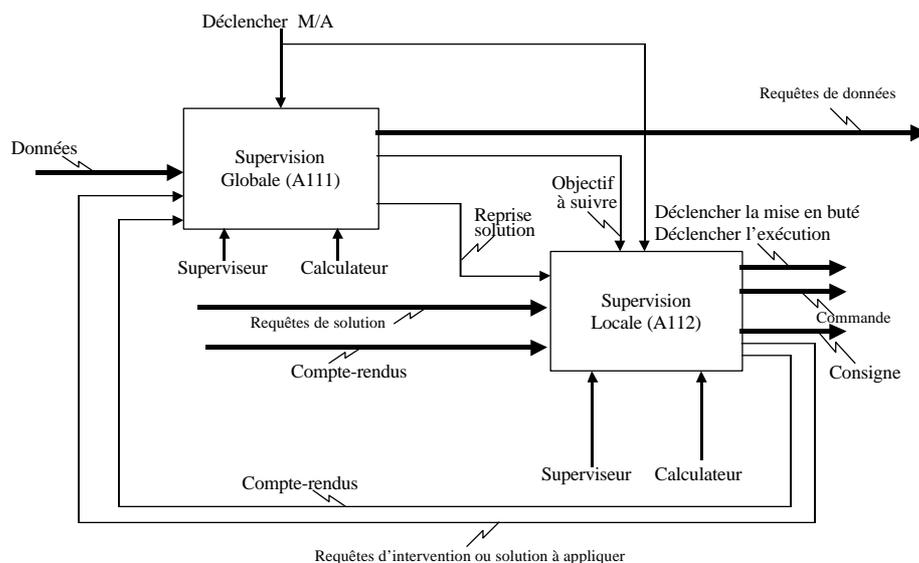


Figure 5.13 : Diagramme "supervision et commande du processus" (A11)

A112 "supervision locale" : la supervision locale est une abstraction de trois actions : **capter**, **commander** et **renseigner**. Cette fonctionnalité assure la réalisation du fichier de travail et le suivi du déroulement de sa réalisation.

5.3.3.2. Interfaçage entre "supervision globale" et "supervision locale"

L'activation de la fonctionnalité "supervision globale" produit les sorties suivantes destinées à la "supervision locale" (Figure 5.13) :

- Données de type contrôle "objectif à suivre" : ces données sont orientées vers les actions : **capter**, **commander** et **renseigner** de la "supervision locale"
- Données type "reprise solution" : destinées aux actions **commander** et **renseigner** de la "supervision locale". Ces données sont la reprise de la commande et la solution en cas d'échec de la fonctionnalité "supervision locale".

Les sorties de la fonctionnalité "supervision locale" destinées à la "supervision globale" sont :

- Données de type "comptes-rendus" : orientées vers les actions **suivre** et **diagnostiquer** de la "supervision globale".
- Données de type "requête d'intervention ou solution à appliquer" : ce sont les données orientées vers la fonction **décider** de la "supervision globale", pour demander une solution urgente d'un cas d'échec à la "supervision locale".

5.3.4. Diagramme "supervision globale" (A111)

Comme nous l'avons souligné, cette fonctionnalité est une abstraction de quatre actions (voir Figure 5.14) : **préparer**, **diagnostiquer**, **décider**, **suivre**.

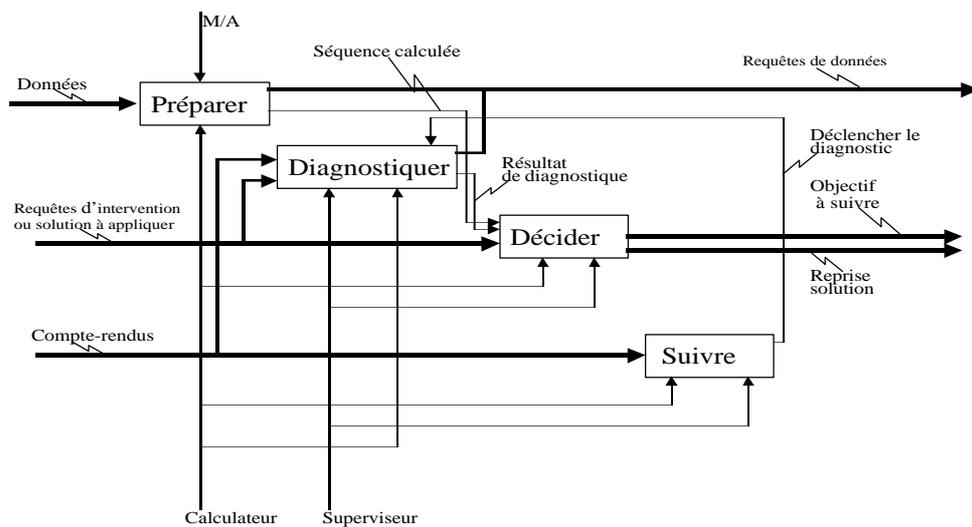


Figure 5.14 : Diagramme "supervision globale" (A111)

5.3.4.1. Interfaçage entre les actions de "supervision globale"

Une activation de l'action **préparer** produit, à partir d'un modèle de produit (produit à démonter) et des critères (économiques, écologiques) des

séquences de désassemblage (en cas de manques de données, une requête est envoyée au centre de diagnostic (plate forme de désassemblage)). Ces séquences seront ensuite envoyées vers l'action **décider** où elles seront traitées en vue de générer un fichier de travail (objectif à suivre). L'action **décider** bénéficie du résultat du diagnostic envoyé par l'action **diagnostiquer** pour traiter les requêtes (intervention et solution à appliquer) et ensuite générer la sortie reprise et solution. Les deux sorties de l'action **décider** sont orientées vers la "supervision locale". L'action **suivre** traite les comptes-rendus venant de la "supervision locale" et déclenche, en cas de nécessité, l'action **diagnostiquer**. Cette dernière a pour rôle de traiter les comptes-rendus et les requêtes (intervention et solution à appliquer) pour générer des résultats exploitables par l'action **décider** (en cas de manque de données, une requête est formulée).

Le scénario complet réalisé par la fonctionnalité "supervision globale", se déroule comme suit : des données (modèle de produit, critères, contraintes) arrivent dans **préparer**. Un signal contrôle (M/A) déclenche cette action. Les résultats de calcul sont des données (séquences de désassemblage, requêtes de données). L'action **décider** se déclenche dès qu'elle reçoit les séquences calculées, et elle les transforme en objectif à suivre (fichier de travail). C'est le cas où il n'y a pas de requêtes d'intervention (l'action **diagnostiquer** est désactivée). En présence des requêtes d'intervention, l'action **décider** produit en plus une sortie (reprise et solution) pour résoudre les problèmes envisagés par "supervision locale". L'action **suivre** joue le rôle d'un observateur, elle s'occupe des comptes-rendus ; une fois qu'elle découvre des anomalies elle lance l'action **diagnostiquer**. Cette action produit, à partir des comptes-rendus et requêtes d'intervention, des données (résultat de diagnostic, requêtes de données) qui seront utilisés par **décider** (voir Figure 5.14).

### 5.3.5. Diagramme "supervision locale" (A112)

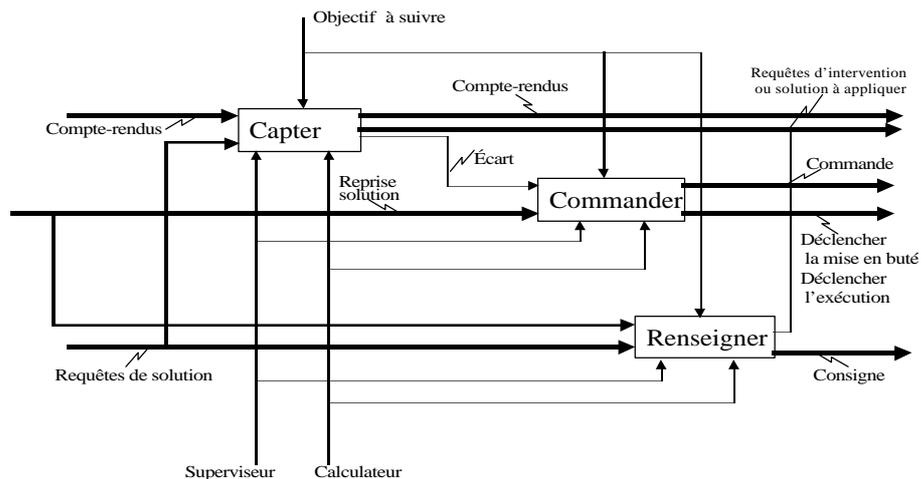


Figure 5.15 : Diagramme "supervision locale supervision locale" (A112)

La supervision locale est une abstraction de trois actions : **capter**, **commander** et **renseigner** (voir Figure 5.15). Nous supposons que la fonctionnalité "supervision locale" est complètement assurée par ces trois actions.

5.3.5.1. Interfaçage entre les actions de "supervision locale"

Le signal de contrôle "objectif à suivre" active l'action **capter**, dont les entrées sont les comptes-rendus et les requêtes de solution venant de la partie opérante. Cette action produit trois sorties : deux destinées au niveau global "comptes-rendus" et "requêtes d'intervention". La troisième concerne des données de type "écart", pour indiquer la direction d'évaluation de la commande produite par l'action **commander**. Nous supposons que l'action **capter** est en mesure, en cas d'échec de déterminer les écarts ou de trouver une solution, d'envoyer des requêtes d'interventions vers la fonctionnalité "supervision globale". L'action **commander** est activée par le signal "objectif à suivre", elle interprète le signal "fichier de travail" et le signal "reprise solution" et les distribue vers les organes opératoires (Figure 5.15). L'action **renseigner** est activée par le signal "objectif à suivre". Comme l'action **commander**, elle interprète le signal "objectif à suivre" et le signal "reprise solution" et elle les distribue sous forme de consignes textuelles et/ou visuelles vers les opérateurs humains dans la partie opératoire de la cellule. Nous supposons que cette action prend en charge les requêtes de solution (l'action **capter**) et en cas d'échec de trouver une solution, produit des requêtes d'intervention.

Le scénario de déroulement de la fonctionnalité "supervision locale" est le suivant : par l'arrivée du signal objectif à suivre "fichier de travail", l'action **commander** déclenche les fonctionnalités "mettre en butée" et "exécuter" et elle envoie la commande pour réaliser le démontage du premier élément de la séquence. En même temps l'action **renseigner** envoie les consignes textuelles (visuelles) à l'opérateur. En cas de problèmes de réalisation, les actions **capter** et **renseigner** essaient de les résoudre ; en conséquence, la commande et les consignes seront modifiées. Si elles n'arrivent pas à les résoudre, elles font appel à la fonctionnalité "supervision globale" (Figure 5.15).

5.3.6. Diagramme "exécuter le processus" (A12)

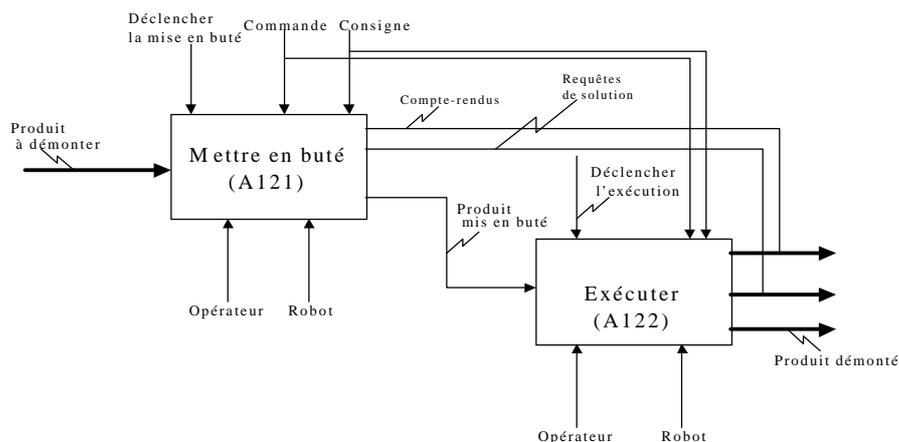


Figure 5.16 : Diagramme "exécuter le processus" (A12)

La fonctionnalité "exécuter le processus" est une abstraction de deux sous-fonctionnalités : la première est "mettre en butée", la deuxième est "exécuter".

La Figure 5.6 montre l'interaction entre ces deux sous-fonctionnalités (les flèches en gras montrent les entrées et les sorties de "exécuter le processus").

#### 5.3.6.1. Fonctionnalités à réaliser

A121 "*mettre en butée*" : cette fonctionnalité est une abstraction de deux actions **fixer** et **retourner**, qui servent à positionner le produit (à démonter) pour le démontage.

A122 "exécuter" : cette fonctionnalité est une abstraction de quatre actions **intervenir**, **dévisser**, **découper** et **extraire**. Par ces quatre actions, la fonctionnalité "exécuter" réalise le démontage du produit.

#### 5.3.6.2. Interfaçage entre "*mettre en butée*" et "exécuter"

Les flux d'informations entre ces deux fonctionnalités sont échangés à travers la supervision locale. La sortie de la première fonctionnalité "produit mis en butée" constitue la seule entrée de la fonctionnalité "exécuter" (voir Figure 5.16)

#### 5.3.7. Diagramme "mettre en butée" (A121)

Comme nous l'avons mentionné, cette fonctionnalité est une abstraction de deux actions **fixer** et **retourner** (Figure 5.17). La distinction, que nous faisons entre **fixer** et **retourner**, a pour objectif de montrer qu'un produit à démonter sera tout d'abord fixé sur une plate-forme mouvante, ensuite sera tourné et retourné pour faciliter l'accès à ses composants.

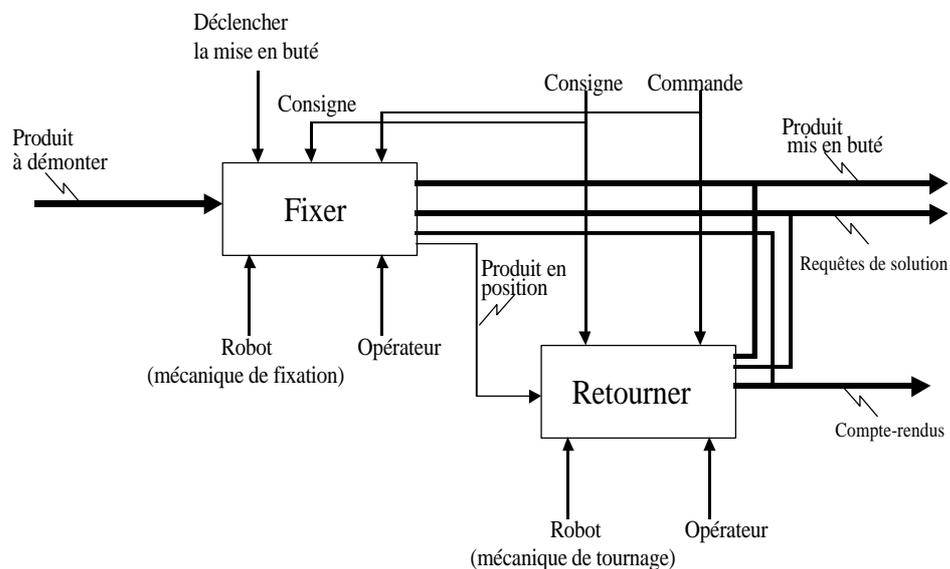


Figure 5.17 : Diagramme "mettre en butée" (A121)

##### 5.3.7.1. Interfaçage entre les actions de "*mettre en butée*"

Quand l'action **fixer** est déclenchée, elle produit la sortie (produit en position) qui est la seule entrée de l'action **retourner**. Donc l'interfaçage entre ces deux actions est limité au signal "produit en position".

Le scénario de déroulement de cette fonctionnalité est le suivant : après avoir déclenché l'action **fixer**, le produit sera maintenu dans une position donnée décidée par les signaux "commande" et "consigne". Si la position est celle qui est recherchée, la fonctionnalité "*mettre en butée*" sera terminée et on trouve à la sortie le produit mis en butée. Si au contraire il faut manipuler le produit, l'action **retourner** sera déclenchée, et le produit, selon les signaux "commande" et "consigne", sera mis en butée. En cas de problème de réalisation de la commande "consigne", les deux actions envoient des requêtes de solution. Dans tous les cas, des comptes-rendus sont envoyés à la supervision locale (voir Figure 5.17) .

### 5.3.8. Diagramme "exécuter" (A122)

Cette fonctionnalité reflète le processus d'extraction des composants du produit. Elle est une abstraction de quatre actions : **intervenir**, **dévisser**, **découper**, **extraire** (Figure 5.18).

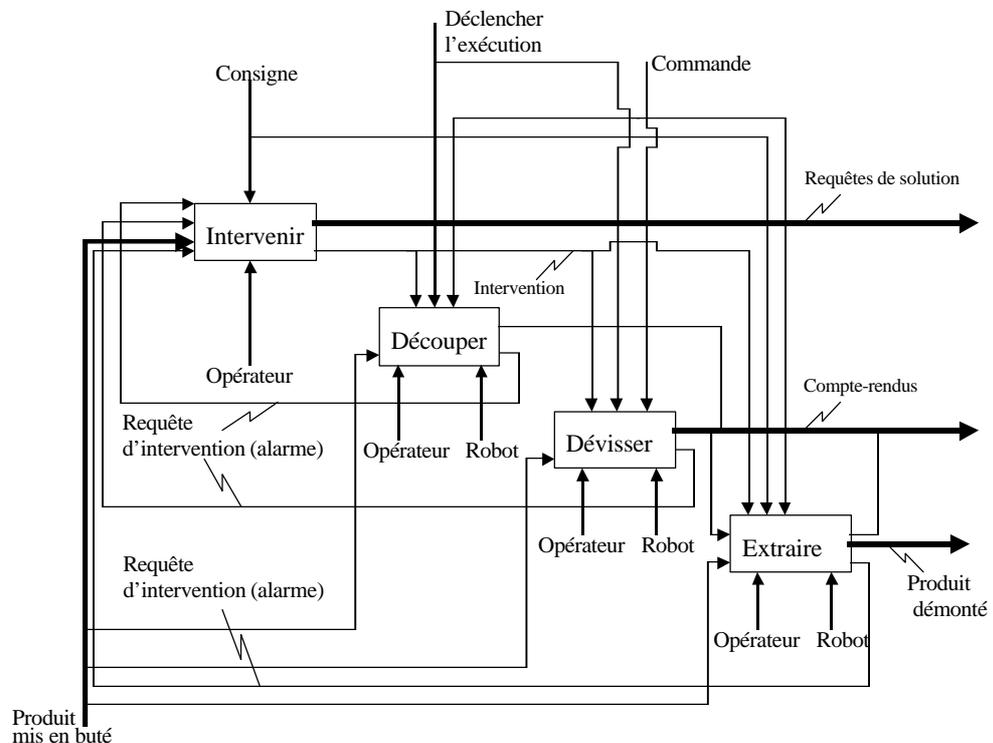


Figure 5.18 : Diagramme "exécuter" (A122)

#### 5.3.8.1. Interfaçage entre les actions de "exécuter"

La fonctionnalité "*exécuter*" est déclenchée, soit par l'action **dévisser**, soit par l'action **découper** par le signal "déclencher l'exécution". Ces deux actions produisent des comptes-rendus qui déclenchent l'action **extraire** et des requêtes d'intervention à destination de l'action **intervenir**. En réponse, l'action **intervenir** envoie le signal intervention (Figure 5.18).

Le scénario du déroulement de la fonctionnalité "*exécuter*" est le suivant : selon la commande (venant de la supervision locale), l'action **dévisser** (ou **découper**) se déclenche. Si le dévissage (ou le découpage) d'une fixation se

passé sans problèmes, la deuxième fixation sera traitée, et ainsi de suite, jusqu'à la libération d'un composant. Une fois le composant libéré, l'action **extraire** est déclenchée selon la commande "consigne" où on trouve à sa sortie le produit démonté. En cas de problèmes de dévissage, de découpage et/ou d'extraction, l'action **intervenir** est appelée. Si cette action résout le problème, le processus continuera, sinon une requête de solution est propagée vers la supervision locale (voir paragraphe 5.3.5).

### 5.3.9. Conclusion sur la modélisation de la cellule de désassemblage

Dans ce volet, la modélisation (volontairement limitée) (au sens SADT) de la cellule de désassemblage, nous a amené à identifier les actions principales servant à réaliser l'objectif de démontage. Ainsi, on a identifié pour le niveau de supervision (globale et locale) sept actions suffisantes pour réaliser toutes les tâches de supervision : **préparer**, **diagnostiquer**, **décider**, **suivre**, **capter**, **commander** et **renseigner**. Les acteurs de ces actions sont le calculateur (SIAD) et le superviseur. Pour le niveau d'exécution nous avons identifié six actions : **fixer**, **tourner**, **intervenir**, **dévisser**, **découper** et **extraire**. Ces actions, exécutables par le robot et/ou l'opérateur, sont censées réaliser toutes les tâches opératoires dans la cellule.

## 5.4. Les classes des actions

Avant de conclure ce chapitre, il est probablement utile d'introduire la notion de classe<sup>6</sup> pour les actions identifiées précédemment. Cette introduction permettra de rendre l'utilisation de ces actions plus commode et plus générale pour d'autres situations équivalentes du contexte de leur identification. Ainsi, on assure la transportabilité et la réutilisation de ces actions.

La Figure 5.19 (partie A) schématise (en utilisant les notions de UML) les cinq actions : **préparer**, **diagnostiquer**, **décider**, **suivre** et **renseigner** avec leurs attributs et leurs traitements. On constate que l'action **préparer** représente une classe de base pour les quatre classes restantes. Effectivement, ces classes peuvent hériter de la classe "Préparer" des attributs qui conviennent à leurs traitements. Pour la même raison, la classe "Décider" est une classe dérivée des deux classes "Préparer" et "Diagnostiquer". De cette manière, on peut par la généralisation, la spécialisation et par le changement des attributs rendre les actions réutilisables pour la modélisation d'un autre système.

La Figure 5.19 (partie B et C) représente les classes des actions restantes : **capter**, **commander**, **fixer**, **tourner**, **intervenir**, **dévisser**, **découper** et **extraire**. Ces classes sont reliées par un lien de type association pour les classes "Capter" et "Commander", et par un lien de type héritage pour le reste. On constate que la classe "Intervenir" hérite de 4 classes, ce qui rend les actions générées à la base de cette classe très diversifiées.

<sup>6</sup> Une classe est un modèle d'une chose ou une entité de la vie réelle (appelée objet), elle est définie par des données membres et des fonctions (traitements) membres.

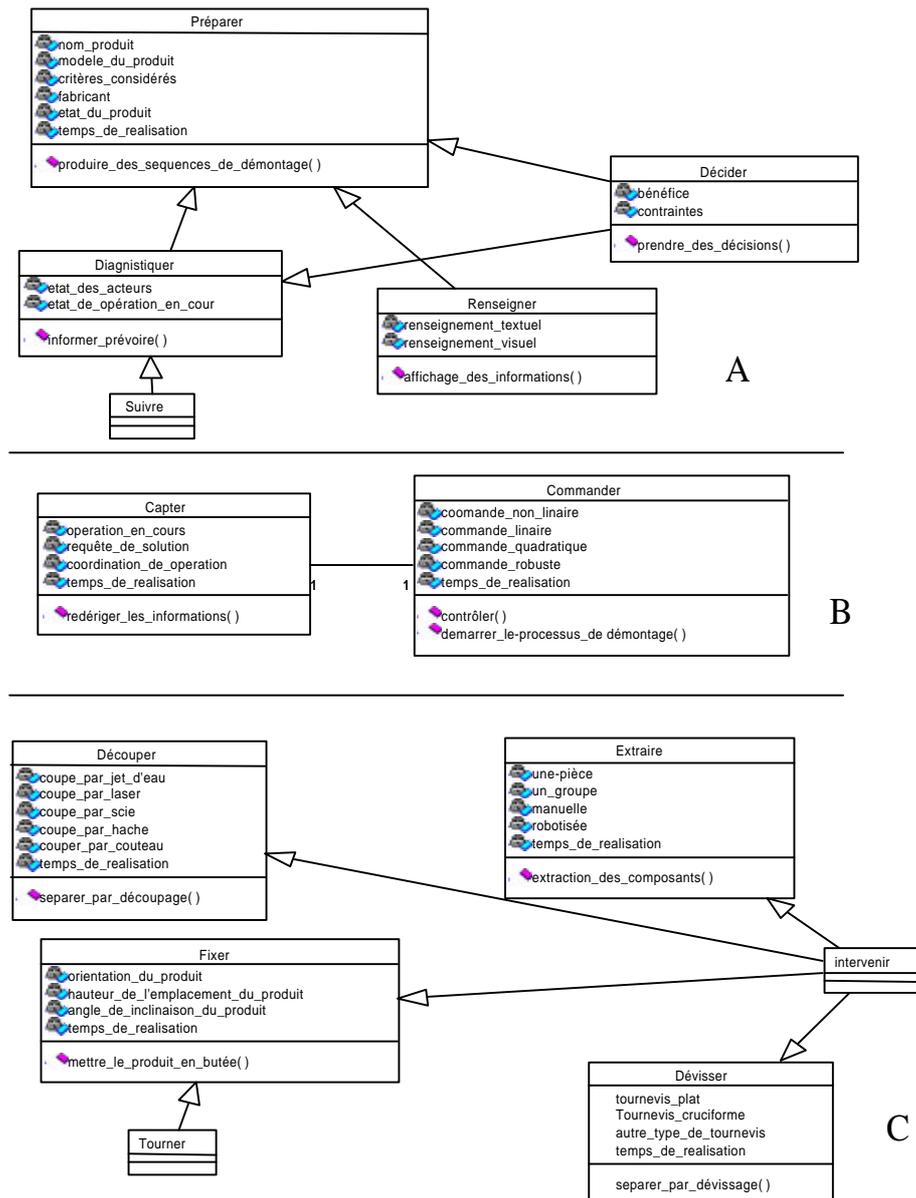


Figure 5.19 : Les classes des actions

## 5.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modulé la cellule de désassemblage en partant d'une structure dite semi-automatique et en considérant des scénarios préétablis. Cette cellule a été décomposée en deux sous-systèmes : sous-système d'exécution physique, et sous-système de supervision et contrôle. Ce dernier a aussi été décomposé en deux sous-systèmes : supervision globale et supervision locale. Cette décomposition a facilité la démarche de modélisation pour aboutir à identifier les actions d'acteurs de la cellule.

L'identification des actions constitue le premier pas vers une démarche globale de conception du système homme-machine. Le prochain chapitre est consacré à l'étude de cette démarche en prenant en compte les treize actions identifiées dans ce chapitre.

Chapitre

6

---

## Système homme-machine dans une cellule de désassemblage

La conception des systèmes homme-machine représente une préoccupation de premier ordre pour les informaticiens, les automaticiens et les ergonomes. La conception adéquate d'un tel système signifie l'optimisation de ses performances, car la prise en compte de l'acteur humain dès l'étape de la conception renforce la stabilité et l'optimalité de toutes les fonctions du système. Le présent chapitre traite du problème de la conception du système homme-machine en proposant une méthodologie globale pour sa conception. Cette méthodologie est basée principalement sur ce que nous appelons "spécification des actions". Nous appliquerons cette méthodologie pour l'analyse et la spécification des actions qui ont été identifiées au chapitre cinq.

Ce chapitre se décompose en deux volets : le premier présente la méthodologie de conception, la démarche de spécification des actions et les critères techniques et économiques considérés. Le deuxième volet représente l'étude des actions de la cellule de désassemblage et la formalisation de l'ensemble des activités de désassemblage.

### 6.1. Conception de la cellule de désassemblage : une démarche globale

Dans le chapitre I (paragraphe 1.3.2), nous avons présenté la méthodologie de conception d'un système socio-technique proposée par P. Millot. Cette méthodologie s'appuie sur deux démarches :

- Démarche descendante qui considère les caractéristiques techniques et les objectifs du procédé pour arriver à une réalisation d'un prototype du système homme-machine. Cette étape sert donc à concevoir le système.
- Démarche ascendante qui vise à déboucher sur une meilleure

définition des tâches à attribuer à l'homme partant des critères de performance du procédé et des critères purement humains.

L'association de ces deux démarches constitue notre vision de la méthodologie pour la conception d'un système socio-technique (en particulier pour la conception d'une cellule de désassemblage centrée sur l'homme).

Avant de présenter en détail cette méthodologie, nous tenons à éclaircir quelques définitions de termes qui seront utilisés au cours de cette présentation :

- Action : représente les efforts consentis pour atteindre un objectif dit transitoire. Une action est exécutée, soit par une machine, soit par un homme. Une ou plusieurs actions constituent une activité.
- Activité : représente un ensemble d'actions visant à atteindre un sous-objectif, une ou plusieurs activités constituent une tâche.
- Tâche : représente un ensemble d'activités visant à atteindre un objectif. Une ou plusieurs tâches constituent une mission.
- Mission : représente l'ensemble des tâches visant à réaliser l'objectif global du système.

Pour illustrer ces définitions, et pour faciliter la perception de nos idées, un exemple de taxiphone est considéré (cet exemple nous accompagnera au cours de nos explications). Nous appelons une mission le fait d'utiliser le taxiphone pour passer une communication "téléphoner". La Figure 6.1 montre la décomposition de cette mission en tâches, ensuite en activités et finalement en actions. Pour pouvoir téléphoner cinq tâches sont nécessaires. La tâche "communiquer" se décompose en deux activités : l'une "converser" et l'autre "changer la carte". Les actions "parler", "écouter" et "afficher les unités restantes" sont les composantes de l'activité "converser".

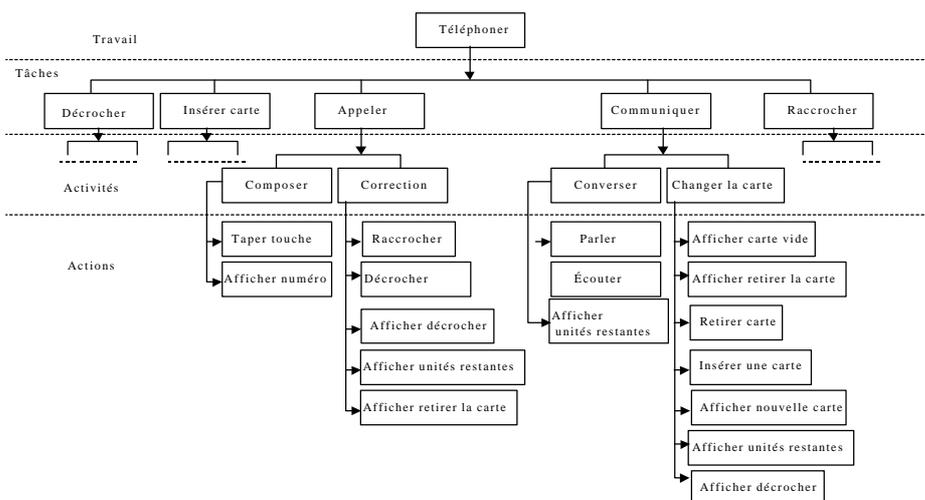


Figure 6.1 : Description d'une mission "téléphoner" en utilisant le taxiphone

Nous soulignons que la décomposition de la fonctionnalité d'un système en actions, activités, tâches et missions n'est pas un objectif en soi, mais un

moyen pour comprendre comment l'objectif du système est atteint et qui participe (ou devrait participer) à sa réalisation. Donc la décomposition dépend de l'objectif annoncé du système. Ceci signifie la non-rigidité des limitations entre les termes définis ci-dessus et leur dépendance au contexte donné. Par exemple "parler", dans le cas du taxiphone, peut être une mission si l'objectif était "passer un message vocal", et "articuler" peut être classé comme une action pour connaître les muscles de la bouche qui participent à la prononciation des lettres séparées.

### 6.1.1. Méthodologie de conception

La méthodologie proposée comprend les parties suivantes (Figure 6.2) :

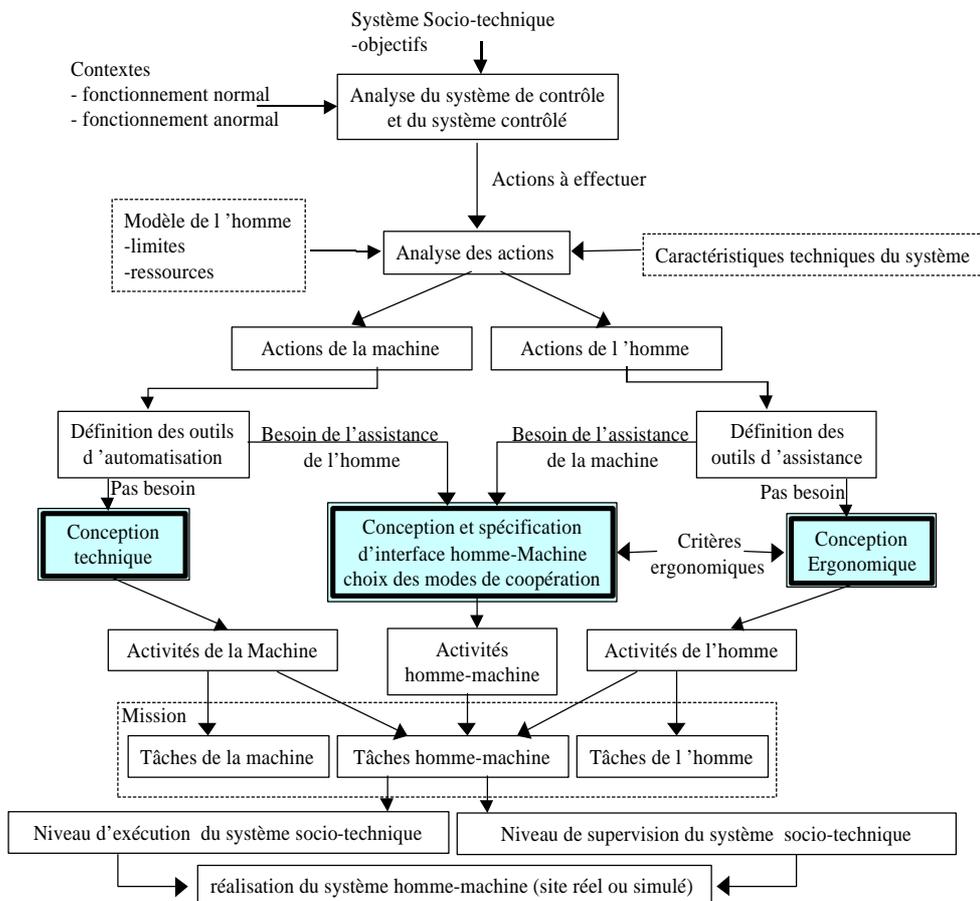


Figure 6.2 : La démarche globale de conception du système socio-technique

- Analyse du système de contrôle et du système contrôlé : il s'agit de déterminer les actions à effectuer, en analysant les deux contextes de fonctionnement : normal et anormal. Cette phase devient plus compliquée si le système n'existe pas, car l'analyse est plus abstraite. En effet, c'est le cas de la cellule de désassemblage, dont la non existence nous a privé de l'analyse réelle du contexte de travail. Ceci a influencé négativement la crédibilité de cette analyse.
- Analyse des actions : il s'agit de définir les actions réalisables par l'homme et par la machine pour déduire les besoins d'assistance de l'homme

(éventuellement les besoins d'assistance de la machine). L'analyse est principalement basée sur les caractéristiques de l'homme et ses limites et sur les caractéristiques techniques de la machine (au sens général du terme comprenant l'entité informatique et la machine physique).

- Définition des outils d'assistance ou des outils d'automatisation : il s'agit de vérifier si la réalisation d'une action nécessite une assistance, et de déterminer l'outil adéquat de cette assistance pour chaque action. Ceci fait appel à trois types de conceptions : la conception ergonomique du poste de travail, la conception technique et la conception de l'interface homme-machine (le choix des modes de coopération). Si les actions humaines avaient des caractères montrant la non nécessité d'assistance pour leurs réalisations, la conception serait purement ergonomique. C'est le cas, par exemple, pour l'action "taper touche" de la mission "téléphoner" en utilisant le taxiphone. Sa réalisation exige une conception adéquate (considérant la morphologie des doigts, et en particulier l'indicateur) des touches du clavier du taxiphone. Si par contre la réalisation de ces actions nécessite une assistance de la part de la machine, la conception peut être orientée vers une spécification de l'interaction et de l'interface homme-machine (c'est aussi le cas des actions de la machine nécessitant l'assistance de l'homme). Si les actions de la machine ne nécessitent pas d'assistance, la conception devient purement technique. Chaque type de conception mène à un type d'activité, ainsi nous avons : les activités de l'homme, les activités de la machine et les activités homme-machine.
- Ces activités forment la tâche homme-machine dans un contexte de travail bien défini (on peut aussi y trouver des tâches purement humaines ou machinales). Les tâches constituent soit le niveau d'exécution, soit le niveau de supervision. Ces niveaux seront implantés sur un site réel ou simulé constituant ainsi le système homme-machine.

Dans les paragraphes qui suivent, nous appliquons cette démarche pour la conception d'une cellule de désassemblage centrée sur l'homme.

### 6.1.2. Spécification ergonomique et technique des actions du système

Comme nous l'avons vu, la démarche globale de conception s'appuie tout d'abord sur une identification des actions au sein du système socio-technique, ensuite sur une analyse (du point de vue de l'ergonomie et de la technologie) de ces actions en vue de les répartir en deux groupes : actions humaines et actions de la machine. Malgré la simplicité de cette idée, une difficulté majeure réside dans la méthode d'analyse à employer. La question est donc comment créer un modèle de référence (contenant les aspects ergonomiques et techniques) à partir desquels on pourrait porter un jugement sur l'appartenance d'une action à tel ou tel groupe? Nous allons proposer dans les paragraphes qui suivent une méthode approximative de spécification ergonomique et technique des actions.

Nous supposons l'existence d'une multitude d'actions du système homme-machine (obtenues après une analyse fonctionnelle du système, chapitre 5). Pour pouvoir situer une action par rapport aux acteurs (homme, machine),

nous allons considérer que toutes les actions peuvent être représentées par une fonction de deux fonctions : "**Action**( $x=f(u), y=f(v)$ )". Cette fonction est définie sur l'intervalle [0,1] et elle prend ses valeurs dans le même intervalle.

Nous désignons par la fonction  $x=f(u) \in [0,1]$  le degré d'adéquation de la réalisation d'une action par rapport à un modèle humain donné. De même la fonction  $y=f(v) \in [0,1]$  représente le degré d'adéquation de la réalisation de l'action par rapport à un ensemble de données technologiques représentant une machine (censée réaliser cette action).

Selon la paire de valeurs  $x$  et  $y$ , l'action peut se trouver dans l'un des cinq secteurs suivants (voir Figure 6.3) :

- Secteur I : représente toutes les actions réalisables par l'homme. Quand les valeurs de  $y$  se trouvent dans l'intervalle  $[0, 0.5[$ , les valeurs de  $x \in [0.5, 1]$  signifient que l'action est parfaitement adaptée à l'homme. Donc, il vaut mieux qu'elle soit réalisée par un homme.
- Secteur II : représente toutes les actions réalisables par la machine. Quand les valeurs de  $x$  se trouvent dans l'intervalle  $[0, 0.5[$ , les valeurs de  $y \in [0.5, 1]$  signifient que l'action est inadaptée à l'homme, et en conséquence elle ne sera pas facilement réalisée par l'homme, il faut donc l'attribuer à un agent artificiel.
- Secteur III : représente toutes les actions pouvant être attribuées à une machine, mais leur réalisation exige une assistance humaine. Pour les valeurs de  $y \in [0.5, 1]$ , les valeurs de  $x \in [0.5, 1]$  (en considérant que  $y \geq x$ ) représentent le degré d'assistance que l'homme peut apporter à la réalisation de cette action :  $x=0.5$  montre que l'assistance est peu demandée (l'action est presque automatisable, secteur II),  $x=1$  montre le besoin d'une assistance très importante pour la réalisation (voir même le partage de sa réalisation).
- Secteur IV : représente toutes les actions pouvant être réalisées par un homme, mais la réussite de leurs réalisations exige une assistance de la machine. Pour les valeurs de  $x \in [0.5, 1]$ , les valeurs de  $y \in [0.5, 1]$  (en considérant que  $x \geq y$ ) représentent le degré d'assistance que la machine peut apporter à la réalisation de cette action :  $y=0.5$  montre que la participation de la machine est peu demandée (l'action est presque manuelle, secteur I),  $y=1$  montre le besoin d'une assistance de la part de la machine très importante pour la réalisation (voir même pour le partage).
- Secteur V (le carré barré) : représente toutes les actions dont les valeurs de  $y \in [0, 0.5]$  pour tout  $x \in [0, 0.5]$  et inversement. En effet, nous désignons par ce carré un sous-ensemble de l'ensemble de toutes les actions du système que l'on ne peut pas juger sur leur appartenance (homme, machine), soit à cause de l'insuffisance de critères considérés (écologique par exemple), soit à cause de la nature de ces actions. Nous supposons, dès à présent, que toutes les actions qui seront étudiées n'appartiennent pas à ce carré. Autrement dit: nous analysons toutes les actions dont  $x$  et

$y$  n'appartiennent pas, en même temps, à l'intervalle  $[0,0.5]$ .

La question qui se pose naturellement est comment définir les valeurs des fonctions  $x$  et  $y$  ? Avant de répondre à cette question deux remarques doivent être prises en considération :

- 1) L'objectif de la spécification d'une action est de pouvoir juger sur des aspects de sa réalisation (comment ? quels efforts ? par quel moyen ? à quel prix ?) pour prévoir l'acteur qui serait capable de la réaliser et déterminer la forme d'assistance en cas de nécessité. Ceci laisse deviner que le contexte du système analysé (environnement, évolution, moyens) joue un rôle important dans le processus du jugement, ce qui rend le jugement approximatif.

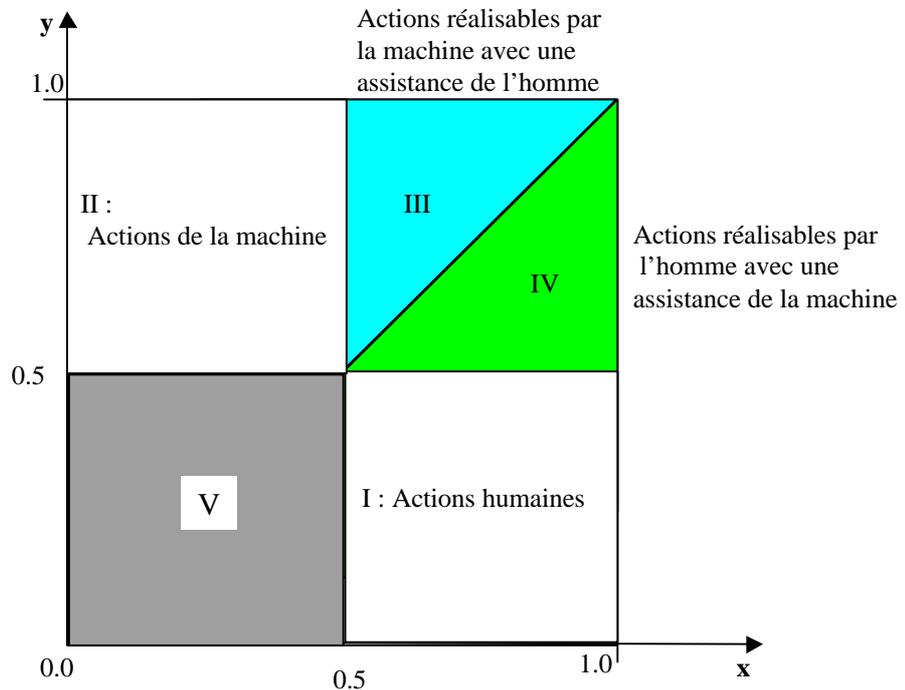


Figure 6.3 : La représentation graphique de l'emplacement des actions par rapport à  $x$  (homme) et  $y$  (machine)

- 2) L'utilisation de chiffres précis pour exprimer un jugement approximatif paraît peu logique. En fait, nous utilisons les chiffres pour faciliter le raisonnement. On aurait pu utilisé d'autres façons pour exprimer le jugement comme par exemple des lettres (A,B,C....) ou des lettres et des chiffres (a0, a10, b0,b10....).

Pour définir l'expression de la fonction  $x=f(u)$  nous supposons que la valeur de  $x$  est initialement égale à  $x_0 = 1$ , ce qui signifie que l'action est parfaitement adaptée à l'homme. De plus, supposons qu'un ensemble de critères ergonomiques (A, B, C,.....N) pondèrent à  $\Omega$  la valeur  $x$  par rapport à sa valeur initiale en la diminuant. Donc la valeur de  $x$  devient :

$$x = x_0(1-\Omega) \tag{1}$$

où  $\Omega$  est inférieur ou égal à un.

En supposant que chaque critère ( $A, B, C, \dots, N$ ) pondère indépendamment la valeur de  $\mathbf{x}$ , l'expression de  $\Omega$  sera :

$$\Omega = \sum_{i=A}^{i=N} g_i \quad (2)$$

où  $\gamma_i \in [0, 1]$  est la pondération du critère  $i \in (A, B, C, \dots, N)$  qui fait diminuer la valeur de  $\mathbf{x}$  à :

$$t_i = g_i x_0 \quad (3)$$

Pour que la valeur de  $\Omega$  reste dans l'intervalle  $[0,1]$ , toute en gardant le pourcentage de l'influence de chaque critère par rapport aux autres, nous introduisons le coefficient  $\alpha$  en forme de fonction minimum :

$$a = \min \left( 1, \frac{1}{\sum_{i=A}^{i=N} g_i} \right)$$

En prenant en compte cette remarque l'expression (1) devient :

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0(1-\alpha.\Omega) \quad (4)$$

En remplaçant dans (4) l'expression de  $\alpha$  et  $\Omega$ , l'expression de  $\mathbf{x}$  devient :

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 \left( 1 - \min \left( 1, \frac{1}{\sum_{i=A}^{i=N} g_i} \right) \sum_{i=A}^{i=N} g_i \right) \quad (5)$$

Les  $\gamma_i$  sont des coefficients qui traduisent l'influence de chaque critère sur la valeur de  $\mathbf{x}$  en la diminuant à  $\gamma_i$  pour cent de sa valeur initiale. Donc pour trouver le  $\mathbf{x}$  d'une action (dans un contexte donné, et pour un modèle humain donné), il suffit de trouver ces coefficients.

Pour déterminer les valeurs d'influence des critères, des données référentielles (modèle de référence) doivent être considérées pour chaque type de critère. Nous établissons, ci-dessous, des modèles de référence pour trois types de critères ergonomiques considérés : la charge de travail, la sécurité et la fiabilité.

En ce qui concerne la fonction  $\mathbf{y}=\mathbf{f}(\mathbf{v})$  la même démarche est suivie pour la fonction  $\mathbf{x}=\mathbf{f}(\mathbf{u})$  et amène à conclure que la valeur de  $\mathbf{y}$  sera :

$$\mathbf{y} = \mathbf{y}_0(1-\Psi) \quad (6)$$

où  $y_0=1$  est la valeur initiale supposée de  $y$ ,  $\Psi$  est la pondération d'un ensemble de critères techniques  $(a, b, c, \dots, n)$ .

En supposant que chaque critère  $(a, b, c, \dots, n)$  pondère indépendamment la valeur de  $y$ , l'expression de  $\Psi$  sera :

$$\Psi = \sum_{i=a}^{i=n} z_i \quad (7)$$

où  $\zeta_i \in [0, 1]$  est la pondération du critère  $i \in (a, b, c, \dots, n)$  qui fait diminuer la valeur de  $y$  à :

$$s_i = z_i y_0 \quad (8)$$

Pour que la valeur de  $\Psi$  reste dans l'intervalle  $[0,1]$ , tout en gardant le pourcentage de l'influence de chaque critère par rapport aux autres, nous introduisons le coefficient  $\beta$  en forme de fonction minimum:

$$b = \min \left( 1, \frac{1}{\sum_{i=a}^{i=n} z_i} \right)$$

En prenant en compte cette remarque l'expression (6) devient :

$$y = y_0(1-\beta.\Psi) \quad (9)$$

En remplaçant dans (4), l'expression de  $\alpha$  et  $\Omega$ , l'expression de  $y$  devient :

$$y = y_0 \left( 1 - \min \left( 1, \frac{1}{\sum_{i=a}^{i=n} z_i} \right) \sum_{i=a}^{i=n} z_i \right) \quad (10)$$

Les  $\zeta_i$  sont des coefficients qui traduisent l'influence de chaque critère sur la valeur de  $y$  en la diminuant à  $\zeta_i$  pour cent de sa valeur initiale. Donc pour trouver le  $y$  d'une action (dans un contexte donné, et pour une machine (entité informatique ou robot) donnée) il suffit de définir  $\zeta_i$  pour chaque critère. Ceci exige d'établir des modèles de référence pour les critères considérés.

### 6.1.3. Critères considérés

Comme nous l'avons évoqué précédemment, nous ne considérons que deux types de critères : ergonomique et technique (malgré l'existence d'autres critères comme les critères écologiques, politiques,...).

Aussi nous nous limitons à trois types de critères ergonomiques qui sont : la charge de travail, la sécurité et la fiabilité. En ce qui concerne les critères

techniques, nous nous limitons aussi à deux types : la faisabilité technique et le coût.

6.1.3.1. Charge de travail

Malgré l'aspect temporel de la charge de travail (voir paragraphe 2.2.4.2, chapitre II), et la variation de sa valeur d'un individu à un autre, elle reste un indice fiable (selon beaucoup de psychologues de travail) pour estimer l'état de mobilisation d'un individu. Donc, elle peut servir à estimer si une action est facilement réalisable par l'homme ou non. Pour parvenir à ces fins, nous utilisons l'échelle de Cooper Harper modifiée (cité dans [Milot,1988]) de la façon suivante (voir Figure 6.4) : pour un modèle humain donné (mental et physique), l'action sera comparée (du point de vue de sa réalisation) avec dix niveaux de difficultés répartis sur l'échelle. Chaque niveau est noté par un indice  $\gamma_{CDT}$ , qui est considéré comme la pondération de la fonction  $x$  de l'action correspondante par rapport à la charge de travail (CDT).

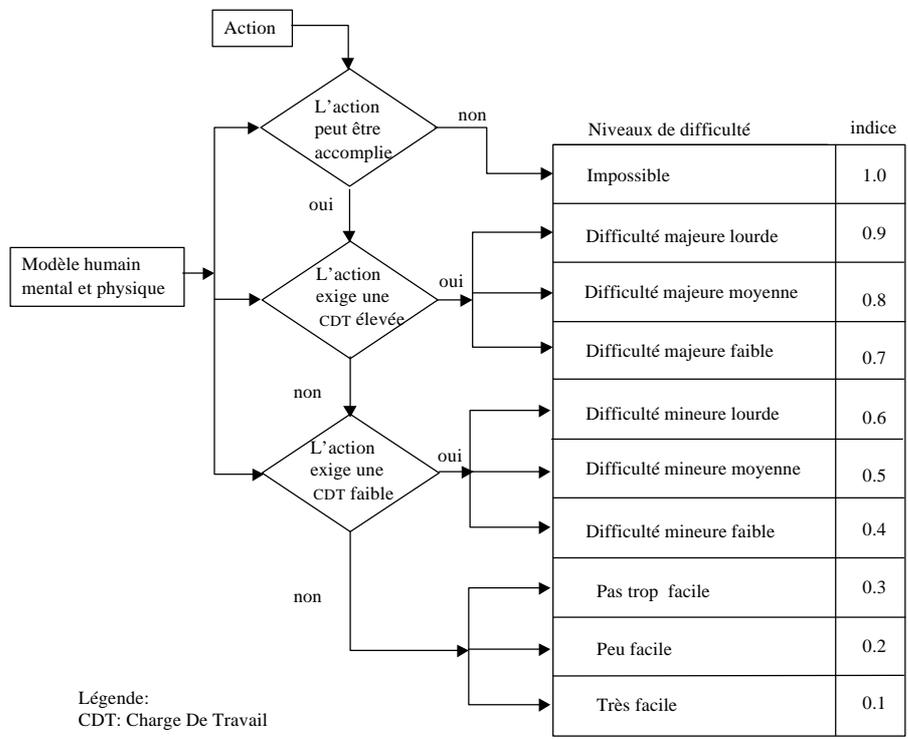


Figure 6.4 : Echelle Cooper Harper modifiée adoptée pour spécifier les actions

Par exemple, prenons l'action "décrocher" le taxiphone (voir l'exemple du taxiphone cité ci-dessus) : pour une personne de capacité mentale et physique moyenne et un contexte habituel d'utilisation du taxiphone, la réalisation de cette action n'exige pas une CDT ni élevée ni faible (voir Figure 6.4). Donc l'action considérée est soit très facile, soit peu facile ou encore pas trop facile. Vue l'incertitude du modèle humain, le choix peu facile sera assez judicieux. En conséquence, la pondération de la fonction  $x$  de cette action sera estimée à  $\gamma_{CDT}=0.2$ , donc  $x$  dans cette action sera :

$$x = x_0 (1 - g_{CDT}) = 1(1 - 0.2) = 0.8$$

ce qui revient à dire que cette action est plutôt humaine et elle ne nécessite pas d'assistance.

6.1.3.2. Sécurité

La sécurité est un critère important pour décider si une action peut être réalisée par un homme ou si sa réalisation est exclusivement réservée à la machine. Contrairement à la charge de travail, la sécurité ne dépend pas de l'individu (d'un modèle humain donné), mais elle est liée à la nature de l'action dans l'environnement de travail. En effet, la réalisation d'une action peut être soit dangereuse et en conséquence l'action est irréalisable par l'homme, soit elle n'est pas dangereuse et l'action est réalisable par l'homme (et par la machine) de deux manières : sans moyens de protection et avec moyens de protection. Par exemple, l'action "souder à la main" dans un atelier de maintenance est une action réalisable par l'homme avec un moyen de protection (le masque). Ainsi, pour définir les valeurs  $\gamma_s$  de sécurité qui influencent la fonction  $x$  de chaque action examinée, nous adoptons les valeurs arbitraires suivantes de  $\gamma_s$  (voir Tableau 6-1) : 1,0 , 0.2, 0,0. Ces valeurs reflètent le fait qu'une action est soit dangereuse (irréalisable par l'homme) avec  $\gamma_s= 1,0$ , ou alors pas dangereuse (réalisable par l'homme) avec  $\gamma_s= 0,0$  pour des actions sans besoin de moyens de protection, ou  $\gamma_s= 0,2$  pour des actions nécessitant des moyens de protection, le Tableau 6-1 récapitule ces propos.

Pour faire le calcul sur un exemple, reprenons encore l'action "décrocher" le taxiphone (voir l'exemple cité ci-dessus). Notre expérience montre que cette action ne constitue aucun danger, et elle peut être réalisée sans protection, ce qui signifie que  $\gamma_s$  sera considérée égale à zéro. Donc  $x$  de cette action sera :

$$x = x_0 (1 - g_s) = 1(1 - 0.0) = 1.0$$

<b>Action</b> →	<b>Action dangereuse</b>	<b>Action Pas dangereuse avec protection</b>	<b>Action Pas dangereuse sans protection</b>
<b>Pondération ↓ de fonction <math>x</math></b>			
$\gamma_s$	<b>1.0</b>	<b>0.2</b>	<b>0.0</b>

Tableau 6-1 : Les valeurs de pondération estimées pour le critère "sécurité"

6.1.3.3. Fiabilité

Larousse définit la fiabilité comme la probabilité de fonctionnement sans défaillance d'un dispositif dans des conditions spécifiées et pendant une période de temps déterminée. Pour notre cas, la fiabilité est considérée comme une estimation prévisionnelle du résultat de la réalisation d'une action. Elle reflète donc l'aptitude d'un individu à s'engager dans la réalisation de ces actions. En conséquence, elle dépend du modèle humain considéré (comme le critère "charge de travail").

Dans l'étape de conception des systèmes performants, la fiabilité sera un critère important pour spécifier une action. Elle nous permet de décider si tel acteur ou tel autre est censé réaliser l'action.

Dans un contexte donné, et pour un modèle humain donné, on peut supposer que la fiabilité de la réalisation d'une action est le niveau de rapprochement de l'objectif de cette action. Donc, un objectif parfaitement atteint fait penser à un niveau de réalisation très fiable. Un objectif atteint signifie un niveau fiable. Un objectif modérément atteint indique un niveau moyen de fiabilité. Un objectif de l'action difficilement atteint est l'indice de peu de fiabilité et finalement un objectif pas du tout atteint signifie pas de fiabilité.

Ces cinq niveaux de distinctions peuvent servir à estimer les indices de pondération du critère "fiabilité"  $\gamma_F$  sur les valeurs de  $x$ . Pour cela, nous fractionnons l'intervalle [0.0,1.0] en cinq sous-intervalles. Ensuite, nous faisons la correspondance entre chaque niveau de fiabilité et un sous-intervalle comme il est montré sur le Tableau 6-2. La valeur de  $\gamma_F$ , pour chaque niveau, se trouve dans le sous-intervalle correspondant. Par exemple, pour le niveau "peu fiable", la valeur de  $\gamma_F$  appartient à l'intervalle [0.2-0.4[. Pour estimer  $\gamma_F$ , nous choisissons la valeur moyenne de chaque sous-intervalle (ce choix ne change rien par rapport au niveau de fiabilité estimé). Ainsi pour le niveau "peu fiable",  $\gamma_F$  sera égal à 0.3. Toutes les valeurs estimées de  $\gamma_F$  sont montrées au Tableau 6-2.

<b><i>Fiabilité de la réalisation d'une action</i></b>	<b><i>Sous intervalles correspondant</i></b>	<b><i>Valeurs estimées de <math>\gamma_F</math></i></b>
<b>Pas fiable</b>	<b>[0.8-1.0]</b>	<b>0.9</b>
<b>Peu fiable</b>	<b>[0.6-0.8[</b>	<b>0.7</b>
<b>Fiabilité moyenne</b>	<b>[0.4-0.6[</b>	<b>0.5</b>
<b>fiable</b>	<b>[0.2-0.4[</b>	<b>0.3</b>
<b>Très fiable</b>	<b>[0.0-0.2[</b>	<b>0.1</b>

**Tableau 6-2 : Les valeurs de pondération estimées pour le critère "fiabilité"**

A titre d'exemple, reprenons encore une fois l'action "décrocher" le taxiphone. Pour une personne de moyenne capacité mentale et physique et un contexte habituel d'utilisation du taxiphone, l'objectif de cette action sera parfaitement atteint. Donc le niveau de fiabilité est "très fiable". En conséquence la valeur de  $\gamma_F$  est 0,1, donc  $x$  de cette action sera :

$$x = x_0 (1 - g_F) = 1(1 - 0.1) = 0.9$$

Ceci montre que la réalisation de cette action est réservée à l'homme. Son automatisation est donc inutile.

#### 6.1.3.4. Faisabilité

Pour répondre à la question : est-ce qu'une machine (entité informatique ou physique) est capable de réaliser une action donnée? Nous avons choisi la faisabilité comme critère technique permettant de donner une réponse à cette question. Dans l'étape de conception, on suppose que l'on dispose des

informations (un ensemble de documentation technique) pour décider si une action est automatisable (une machine peut la réaliser). Par conséquent, la réponse à la question posée au début de ce paragraphe serait: soit l'action est complètement automatisable, soit elle ne peut pas être automatisée, soit encore elle est automatisable mais une assistance humaine est indispensable pour l'accomplir. Donc la pondération  $\zeta_F$  de la fonction  $y$  sera soit 0.0 pour montrer le fait que l'action est automatisable, soit 1.0 pour souligner que l'action est manuelle. Nous choisissons la valeur 0.5 pour distinguer le cas où l'action est automatisable mais une assistance humaine est nécessaire. Le Tableau 6-3 montre ces valeurs.

<b>Nature de l'action</b>	<b>Valeurs estimées de <math>\zeta_F</math></b>
<b>Automatisable</b>	<b>0.0</b>
<b>Automatisable avec assistance</b>	<b>0.5</b>
<b>Non automatisable</b>	<b>1.0</b>

**Tableau 6-3 : Les valeurs de pondération estimées pour le critère "Faisabilité"**

Par exemple, l'action "afficher décrocher" (voir l'exemple du taxiphone) ne peut être réalisé que par la machine (le taxiphone) (dans le contexte habituel d'utilisation du taxiphone). En conséquence la valeur de  $\zeta_F$  est 0,0, donc  $y$  pour cette action est :

$$y = y_0 (1 - z_F) = 1(1 - 0.0) = 1.0$$

#### 6.1.3.5. Coût

Le deuxième critère technique que nous avons choisi est le coût d'automatisation d'une action. Si le prix d'une automatisation est trop élevé, on considère que l'exécution de l'action sera manuelle (s'il n'y pas de contradiction avec d'autres critères comme la sécurité par exemple). L'estimation du coût d'automatisation devrait se baser sur plusieurs sources de données, ce qui constitue la difficulté de cette estimation. Pour notre cas, nous nous limitons à trois niveaux d'estimation du coût : niveau élevé, niveau moyen et bas niveau. Ceci nous permet de porter un jugement sur le choix de la réalisation d'une action donnée. Selon chaque niveau estimé, la pondération  $\zeta_C$  de la fonction  $y$  sera soit 0.0 pour montrer que le choix devrait s'orienter vers l'automatisation, soit 1.0 pour souligner que l'exécution manuelle est un choix prioritaire. La valeur de  $\zeta_C$  égale à 0.5 signifie que le choix du mode de réalisation de l'action est libre et donc ne dépend pas du coût. Le tableau montre ces valeurs et les choix correspondants.

<b>Choix pour la réalisation d'une action</b>	<b>Estimation du coût</b>	<b>Valeurs estimées de <math>\zeta_C</math></b>
<b>Automatisable</b>	<b>bas</b>	<b>0.0</b>
<b>Libre</b>	<b>moyen</b>	<b>0.5</b>
<b>Non automatisable</b>	<b>élevé</b>	<b>1.0</b>

**Tableau 6-4 : Les valeurs de pondération estimées pour le critère "Coût"**

Par exemple pour l'action " taper touche" (voir l'exemple du taxiphone), le choix d'automatiser la réalisation de cette action entraîne un coût trop élevé. En conséquence la valeur de  $\zeta_C$  est 1,0, donc  $y$  de cette action est :

$$y = y_0 (1 - z_C) = 1(1 - 1.0) = 0.0$$

Ceci signifie que le choix de ne pas automatiser cette action serait judicieux.

Les cinq critères présentés ci-dessus nous serviront à spécifier toutes les actions du système socio-technique étudié. Avant de débiter la spécification des actions de la cellule de désassemblage, nous allons trouver le  $x$  de l'action "décrocher" de notre exemple le taxiphone en considérant les trois critères ergonomiques :

- charge de travail : nous avons vu que la pondération est  $\gamma_{CDT}=0.2$ .
- sécurité : nous avons trouvé que la pondération est  $\gamma_S=0.0$ .
- fiabilité : la pondération de ce critère  $\gamma_F$  est 0,1.

En remplaçant ces valeurs dans la formule (5), tout en remarquant que  $\alpha$  est égal à un, on trouve le  $x$  de l'action "décrocher" :

$$x = x_0 (1 - 1.(\mathbf{g}_{CDT} + \mathbf{g}_S + \mathbf{g}_F)) = 1.(1 - (0.2 + 0 + 0.1)) = 0.7$$

Pour trouver son  $y$ , nous nous référons aux critères techniques :

- faisabilité : l'automatisation de cette action est faisable (on peut toujours penser à une solution robotique pour décrocher le téléphone), donc on peut considérer  $\zeta_F$  égal à zéro (Tableau 6-3).
- coût : le coût de cette automatisation est trop élevé donc  $\zeta_F$  sera estimé à un (Tableau 6-4).

en introduisant ses valeurs dans (10), tout en remarquant que  $\beta$  est égal à un, le  $y$  de l'action "décrocher" sera :

$$y = y_0 (1 - 1.(z_F + z_C)) = 1.(1 - (0.0 + 0.1)) = 0.0$$

en conséquence l'action "décrocher" se trouve dans le secteur I (voir Figure 6.3) ce qui signifie que la réalisation de cette action est réservée à l'homme.

## 6.2. Spécification des actions de la cellule de désassemblage

Dans le chapitre précédent, nous avons identifié treize actions au sein de la cellule de désassemblage. Dans ce volet, nous allons les situer par rapport à l'homme et à la machine en considérant la démarche et les critères présentés dans le volet précédent. Mais avant de procéder à cette analyse, notre modèle humain est présenté et les caractéristiques techniques de la machine sont mises en évidence.

### 6.2.1. Modèle humain

Il est difficile de regrouper toutes les caractéristiques humaines dans un seul et unique modèle. En effet, le système "être humain" est un système complexe, adaptatif, sa modélisation exige de prendre en compte ces trois composants : cognitif, psychologique et physiologique. Nous nous limitons, dans le cadre de cette thèse, à considérer un modèle comportemental de l'être humain face à une situation donnée. Dans le premier chapitre, nous avons présenté deux modèles comportementaux pour la résolution de problèmes, un développé par Rasmussen [1983], le deuxième par Hoc et Amalberti [Hoc, 1996]. Ce dernier représente, d'une manière assez explicite, les étapes de résolution d'un problème. Nous adoptons ce modèle pour représenter un individu possédant des caractéristiques lui permettant de réaliser ses buts suivant une boucle comportementale. La Figure 6.5 rappelle ce modèle.

Il est tout à fait normal de supposer que la réalisation d'une action correspond au problème à résoudre. Donc la réalisation d'une action peut être basée sur l'habileté (boucle à court terme), les règles (boucle à moyen terme) et les connaissances (boucle à long terme). Pour spécifier cette action nous appliquons les critères ergonomiques (voir paragraphe 6.1.3) en considérant pour chaque boucle les quantifications des caractéristiques humaines (capacité, vigilance, stress, efficacité et adaptation). Dans le cas du modèle considéré, les quantifications sont représentées comme le montre la Figure 6.5, et elles sont les mêmes pour les trois boucles.

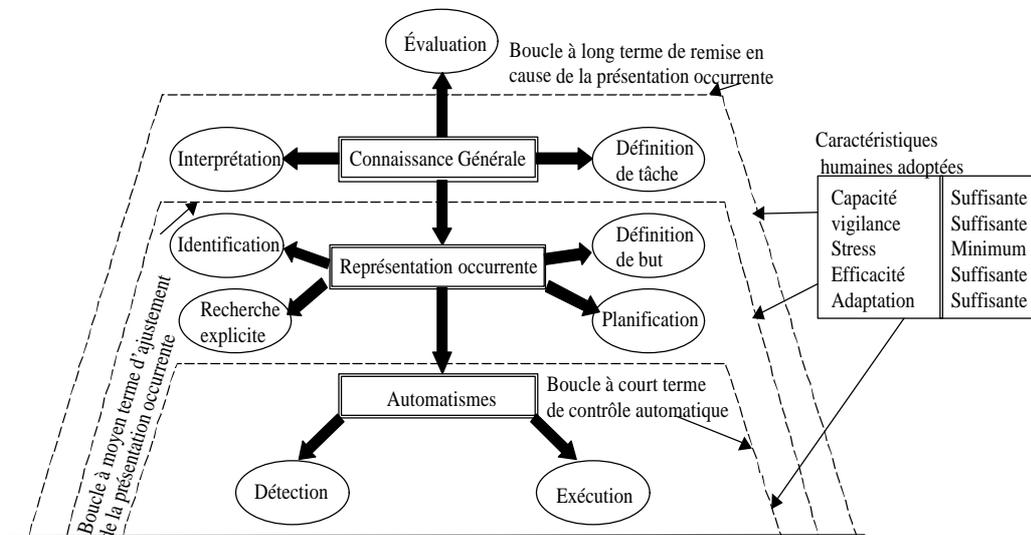


Figure 6.5 : Modèle humain considéré /adopté avec révision de Hoc-1996/

### 6.2.2. Caractéristique technique de la machine

Comme il est souligné dans la démarche globale de conception, les caractéristiques techniques de la machine (censée réaliser les actions) sont importantes pour spécifier les actions. Comme nous l'avons mentionné précédemment, les machines dans la cellule de désassemblage sont de deux types : robot et ordinateur. Nous explicitons ci-dessous les caractéristiques retenues de ces machines :

- Robot : les caractéristiques utiles pour le robot sont ses degrés de liberté (6 axes), sa précision, sa répétabilité, sa charge à bout de bras, ainsi que ses dimensions propres et celles de son domaine atteignable. Les mouvements du robot sont conjointement réalisés avec les actions des outils spécialisés (outil de dévissage, outil de découpage).
- L'automate de mise en butée permet de positionner correctement le produit à traiter face aux opérations prévues. Le nombre de mises en butée possibles pour un produit donné permet d'envisager d'autres alternatives de démontage, et introduit une flexibilité au niveau des actions envisageables sur le produit. Le choix d'une mise en butée plutôt qu'une autre dépend essentiellement de la liste des composants à extraire, et de la séquence des opérations.
- L'ordinateur équipé de SIAD : parmi les diverses caractéristiques techniques connues de l'ordinateur (SIAD), on retient la capacité et la rapidité du traitement d'informations et l'interactivité au travers d'une interface avec le superviseur (prise de décision avec le SIAD) et avec le robot (contrôle et pilotage de macro-opérations telles que le dévissage, le découpage,...). Une macro-opération est paramétrée de telle sorte qu'elle peut être appelée par un programme extérieur lui fournissant uniquement le type de procédé (dévissage, découpage, extraction, ...), l'identifiant de la fixation à enlever ou l'identifiant du composant à extraire, et l'outil nécessaire à utiliser. La macro-opération se charge alors de récupérer, dans la base de données, les informations indispensables au bon déroulement du procédé. Lorsque la macro-opération se termine, l'information sur le succès ou l'échec est renvoyée au programme appelant.

### 6.2.3. Analyse des actions

Nous avons identifié (chapitre 5), pour le niveau de supervision (globale et locale), sept actions suffisantes pour réaliser toutes les tâches de supervision : **préparer**, **diagnostiquer**, **décider**, **suivre**, **capter**, **commander** et **renseigner**. Les acteurs de ces actions sont le calculateur (SIAD) et le superviseur. Pour le niveau d'exécution, six actions étaient identifiées : **fixer**, **tourner**, **intervenir**, **dévisser**, **découper** et **extraire**. Elles sont réalisables par le robot et l'opérateur.

La spécification de ces treize actions consiste à décider quelles sont les actions dont la réalisation est exclusivement réservée à un seul acteur, quelles sont les actions dont la réalisation est faite par un acteur et nécessite l'assistance de l'autre. Donc, la spécification revient à trouver **x** et **y** pour chaque action, en appliquant la méthode et les critères exposés précédemment.

#### 6.2.3.1. Préparer

La réalisation de cette action produit toutes les séquences possibles pour démonter un produit, à partir de son modèle numérique, y compris la séquence la plus profitable du point de vue économique.

1) Critères ergonomiques :

- Charge de travail : cette action exige (voir Figure 6.4) une CDT trop élevée et sa réalisation pose des difficultés majeures lourdes. Donc l'indice de la pondération de la fonction **x** est  $\gamma_{CDT}=0,9$ .
- Sécurité : la réalisation de cette action ne pose aucun problème pour l'individu. Donc l'indice de la pondération de la fonction **x** est  $\gamma_s=0,0$ .
- Fiabilité : le résultat de la réalisation de cette action par un individu est peu fiable. Donc l'indice de la pondération de la fonction **x** est  $\gamma_F=0,7$ .

En introduisant ses valeurs dans la formule (5) on trouve :

$$x = x_0 \left( 1 - \min \left( 1, \frac{1}{(\mathbf{g}_{CDT} + \mathbf{g}_S + \mathbf{g}_F)} \right) (\mathbf{g}_{CDT} + \mathbf{g}_S + \mathbf{g}_F) \right) =$$

$$= 1 \left( 1 - \min \left( 1, \frac{1}{0,9 + 0 + 0,7} \right) (0,9 + 0 + 0,7) \right) = 1 - 0,625 \cdot 1,6 \approx 0$$

2) Critères techniques :

- Faisabilité : il existe des procédures algorithmiques programmables permettant une réalisation automatique de cette action. Donc l'indice de la pondération de la fonction **y** est  $\zeta_F = 0,0$ .
- Coût : La réalisation de cette action exige un coût relativement faible. Donc l'indice de la pondération de la fonction **y** est  $\zeta_C = 0,0$ .

En introduisant ses valeurs dans la formule (10), on trouve :

$$y = y_0 \left( 1 - \min \left( 1, \frac{1}{(\mathbf{z}_F + \mathbf{z}_C)} \right) (\mathbf{z}_F + \mathbf{z}_C) \right) = 1(1 - 1 \cdot (0 + 0)) = 1$$

les valeurs de x et y montrent que l'action **préparer** se trouve dans le secteur II (voir Figure 6.3) ce qui signifie que la réalisation de cette action est réservée à la machine.

L'analyse complète des treize actions de la cellule se trouve dans l'annexe B, dont il résulte le tableau suivant :

<b>Action</b>	<b>Critères ergonom. (x)</b>	<b>Critères techniques (y)</b>	<b>Réalisable par</b>	<b>Réalisation assistée par</b>
<b>préparer</b>	0.0	1	ordinateur	-
<b>diagnostiquer</b>	0.5	0.5	ordinateur	superviseur
<b>décider</b>	0.5	0.5	superviseur	ordinateur
<b>suivre</b>	0.5	0.5	ordinateur	superviseur
<b>capter</b>	0.0	1.0	ordinateur	-
<b>commander</b>	0.0	1.0	ordinateur	-
<b>renseigner</b>	0.5	1.0	ordinateur	superviseur
<b>fixer</b>	0.1	1.0	robot	-
<b>tourner</b>	0.1	1.0	robot	-
<b>intervenir</b>	0.6	0.0	opérateur	-
<b>dévisser</b>	0.3	1.0	robot	-
<b>découper</b>	0.3	1.0	robot	-
<b>extraire</b>	0.6	0.0	opérateur	-

Tableau 6-5 : La spécification des actions

### 6.3. Les activités dans la cellule de désassemblage

Les actions, définies dans le chapitre 5 et spécifiées dans le volet précédent, sont à la base de toutes les activités dans la cellule. Dans ce volet, nous expliquons comment, à partir de ces actions, on constitue la liste des activités véritablement perceptibles et satisfaisant des objectifs au sein de la cellule.

D'une manière générale, tous les systèmes semi-automatiques contiennent trois zones d'activités : celles automatisables (effectuées par la machine), celles entièrement manuelles (effectuées obligatoirement par l'homme) et celles pouvant être effectuées par l'homme en s'appuyant sur l'assistance de la machine ou par la machine en présence d'assistance humaine. La Figure 6.6 montre ces trois zones. On constate que la zone des activités homme-machine se trouvent autour d'une ligne qui sépare les deux zones : automatique et manuelle.

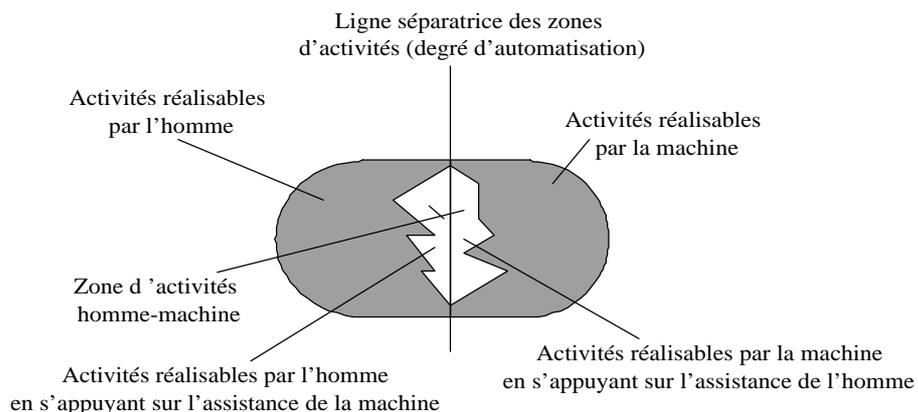


Figure 6.6 : Les zones d'activités du système

La conception adéquate d'un système se base sur la définition de ces trois zones. L'exactitude de cette définition détermine la qualité de la conception du

système. Toutefois, parvenir à déterminer les contours exacts de ces trois zones n'est pas toujours facile (voir même très difficile).

### 6.3.1. Définition des activités

En s'inspirant de [Zamaï, 1997] (où une démarche d'identification des activités pour un nœud de surveillance-commande est décrite), nous considérons qu'une activité au sein d'un système homme-machine est une association des actions du système avec les acteurs réalisant (ou pouvant réaliser) ces actions. Donc l'association acteur(s) et action(s) produit une activité (Zamaï [1997,p.44] suppose qu'une activité est obtenue en associant les différents éléments, ressource, produit, et une ou plusieurs fonctions de surveillance-commande). Par exemple, les actions "taper\_touche" et "afficher\_numéro" (voir l'exemple du taxiphone) associées avec les acteurs homme et appareil de téléphone (homme^appareil^"taper\_touche"^"afficher\_numéro") constitue l'activité "composer" un numéro de téléphone (voir Figure 6.1).

La façon la plus simple pour recenser toutes les activités d'un système est de prendre les n-uplets constitués d'une combinaison de  $i$  éléments (les acteurs et les actions du système). Cette méthode engendre un ensemble d'activités dites fictives parmi lesquelles se trouvent les activités effectives. L'identification de ces activités (effectives) dépend du système étudié et des règles qui régissent la façon dont ces actions sont gérées. Nous détaillons cette méthode pour les systèmes de supervision et d'exécution dans la cellule de désassemblage.

#### 6.3.1.1. Les activités de supervision

Les acteurs supposés à ce niveau sont l'ordinateur et le superviseur. Ils partagent la réalisation de quatre actions (voir Tableau 6-5) : **diagnostiquer**, **décider**, **suivre** et **renseigner**. Pour obtenir l'ensemble exhaustif des activités (effectives et fictives) de supervision (dans la cellule), nous prenons les n-uplets de ces six éléments (deux acteurs et quatre actions). Donc l'ensemble des activités sera d'ordre  $2^6$  (64 activités présentées dans l'annexe C-1). Pour déduire les activités effectives parmi l'ensemble de 64 activités, il faut considérer le fait que les quatre actions sont réalisables par les deux acteurs (l'un réalise et l'autre assiste), donc l'absence d'un acteur signifie que l'activité correspondante devient fictive. Par exemple, l'activité <ordinateur ^ **diagnostiquer** ^ **décider**> est une activité fictive car un ordinateur seul est incapable (dans le contexte de la cellule de désassemblage) de diagnostiquer une situation et de décider. Après avoir éliminé toutes les activités, fictives on obtient 16 activités qui représentent les activités homme-machine effectives au niveau de la supervision. Dans le Tableau 6-6, nous présentons ces 16 activités, où les 0 et les 1 contenus dans les cases déterminent si l'élément (acteur, action) en haut de la colonne fait partie (1) ou ne fait pas partie (0) de l'activité correspondante (lignes du tableau).

N°	ordinateur	superviseur	diagnostiquer	décider	suivre	renseigner
3	1	1	0	0	0	0
7	1	1	1	0	0	0
11	1	1	0	1	0	0
15	1	1	1	1	0	0
19	1	1	0	0	1	0
23	1	1	1	0	1	0
27	1	1	0	1	1	0
31	1	1	1	1	1	0
35	1	1	0	0	0	1
39	1	1	1	0	0	1
43	1	1	0	1	0	1
47	1	1	1	1	0	1
51	1	1	0	0	1	1
55	1	1	1	0	1	1
59	1	1	0	1	1	1
63	1	1	1	1	1	1

Tableau 6-6 : Activités homme-machine de supervision

Nous présentons, ci-dessous, une interprétation de ces 16 activités (dans l'expression de l'activité, les acteurs sont considérés implicitement) :

- Activité N°3 <> : la supervision (globale et locale) est inactive, donc la cellule de désassemblage est en arrêt.
- Activité N°7 <**diagnostiquer**> : traduit un état de diagnostic pour répondre à une situation d'échec.
- Activité N°11 < **décider**> : cette activité représente l'état de prise de décision pour engendrer le fichier de travail.
- Activité N°15 < **diagnostiquer, décider**> : représente un état de diagnostic suivi d'une prise de décision pour résoudre un problème posé par le niveau d'exécution.
- Activité N°19 < **suivre**> : traduit un état de surveillance du déroulement du processus.
- Activité N°23 < **diagnostiquer, suivre**> : c'est la composition de l'activité N°7 avec l'activité N°19. Cette activité traduit un état de diagnostic et un état de surveillance effectués en parallèle.
- Activité N°27 < **décider, suivre**> : c'est la composition de l'activité N°11 avec l'activité N°19. Cette activité traduit un état de prise de décision et un état de surveillance effectués en parallèle.
- Activité N°31 < **diagnostiquer, décider, suivre**> : c'est la composition de trois activités (N°7, N°11 et N°19). Cette activité traduit un état de diagnostic, de prise de décision et de surveillance effectués en parallèle.
- Activité N°35 <**renseigner**> : cette activité représente l'état de fournir les renseignements demandés par l'opérateur.

- Activité N°39 < **diagnostiquer, renseigner**> : représente l'activité N°7 et l'activité N°35 réalisées en parallèle. Cette activité traduit un état de diagnostic pour renseigner.
- Activité N°43 < **décider, renseigner**> : représente l'activité N°11 et l'activité N°35 réalisées en parallèle. Cette activité traduit un état de prise de décision pour renseigner.
- Activité N°47 < **diagnostiquer, décider, renseigner** > : représente l'activité N°15 et l'activité N°35 réalisées en parallèle. Cette activité traduit un état de diagnostic suivi d'une prise de décision pour renseigner.
- Activité N°51 < **suivre, renseigner**> : représente l'activité N°19 et l'activité N°35 réalisées en parallèle. Cette activité traduit l'état de surveillance tout en fournissant les renseignements demandés par l'opérateur.
- Activité N°55 < **diagnostiquer, suivre, renseigner**> : traduit un état de diagnostic et de surveillance tout en fournissant les renseignements demandés par l'opérateur. Cette activité représente l'activité N°23 et l'activité N°35 réalisées en parallèle.
- Activité N°59 < **décider, suivre, renseigner**> : traduit un état de prise de décision pour renseigner l'opérateur pendant la surveillance. Cette activité représente l'activité N°43 et l'activité N°19 réalisées en parallèle.
- Activité N°63 < **diagnostiquer, décider, suivre, renseigner**> : représente un état de surveillance et de diagnostic suivi d'une prise de décision (pour résoudre un problème posé par le niveau d'exécution), suivi encore de l'envoi des enseignements nécessaires à l'opérateur. Cette activité représente l'activité N°47 et l'activité N° 19 réalisées en parallèle.

En ce qui concerne les actions : **préparer, capter et commander**, elles sont réalisables par l'ordinateur (voir Tableau 6-5). En appliquant la même démarche, présentée ci-dessus, on obtient 16 activités (fictives et effectives). Pour trouver les activités effectives, nous éliminons toutes les activités sans acteur (les valeurs 0 dans les cases de la colonne "ordinateur" (voir annexe C-2). Ceci réduit le nombre d'activités à 8 activités. Mais comme l'action **préparer** est réalisée une seule fois en début de processus, nous procédons à l'élimination de toutes les activités contenant cette action avec une autre action (les valeurs 1 dans les cases de la colonne "préparer" avec au moins une valeur 1 dans les autres cases). Ce fait réduit le nombre d'activités à 5 effectives qui sont présentées au Tableau 6-7.

N°	ordinateur	préparer	capter	commander
M1	1	0	0	0
M3	1	1	0	0
M5	1	0	1	0
M9	1	0	0	1
M13	1	0	1	1

**Tableau 6-7 : Les activités de la machine dans le niveau de supervision**

Nous présentons, ci-dessous, une interprétation de ces 5 activités :

- Activité N°M1 < > : l'ordinateur est inactif, donc la cellule de désassemblage est en arrêt.
- Activité N°M3 <préparer> : c'est une activité de calcul pour produire les séquences de démontage.
- Activité N°M5 <capter> : correspond au traitement des comptes-rendus et des requêtes de solution.
- Activité N°M9 <commander> : c'est une activité d'interprétation et de transformation d'information pour contrôler les organes opératoires.
- Activité N°M13 <capter, commander> : traduit un état de contrôle d'un organe opératoire en considérant la rétroaction.

Enfin, dans le niveau de supervision, on n'a pas trouvé d'actions dont la réalisation est exclusivement réservée à l'homme. En conséquence, il n'existe pas d'activités de l'homme seul à ce niveau.

#### 6.3.1.2. Les activités d'exécution

Nous avons identifié, dans ce niveau, quatre actions réalisables par le robot et deux actions réalisables par l'opérateur (voir Tableau 6-5). Par contre, nous n'avons pas identifié d'actions réalisables par un acteur avec l'assistance de l'autre. Donc les activités homme-machine n'existent pas.

Pour obtenir l'ensemble exhaustif des activités de la machine (effectives et fictives). Nous adoptons la même démarche que celle exposée au paragraphe précédent. Considérant que le robot réalise les quatre actions suivantes (voir Tableau 6-5) **fixer**, **retourner**, **découper** et **dévisser**, l'ensemble des activités sera de l'ordre  $2^5$  (32 activités présentées dans l'annexe C-3). Pour trouver les activités effectives, nous éliminons toutes les activités sans acteur (les valeurs 0 dans les cases de la colonne "robot" (voir annexe C-3)). Ceci réduit le nombre d'activités à 16 activités. Mais comme l'action **fixer** ( mise en butée) est obligatoire pour réaliser les actions, nous procédons à l'élimination de toutes les activités ne contenant pas cette action (les valeurs 0 dans les cases de la colonne "fixer"). De même, les actions **dévisser** et **découper** ne peuvent pas être réalisées en même temps (le robot réalise une seule action à la fois, voir la description des acteurs de la cellule, chapitre 5), ce qui conduit à éliminer toutes les activités contenant ces deux actions. Ces faits réduisent le nombre d'activités à 7 activités effectives (voir Tableau 6-8).

N°	robot	fixer	tourner	dévisser	découper
R1	1	0	0	0	0
R3	1	1	0	0	0
R7	1	1	1	0	0
R11	1	1	0	1	0
R15	1	1	1	1	0
R19	1	1	0	0	1
R23	1	1	1	0	1

Tableau 6-8 : Les activités de la machine dans le niveau d'exécution

Nous présentons, ci-dessous, une interprétation de ces 7 activités :

- Activité N°R1 <> : la réalisation est inactive, donc la cellule de désassemblage est en arrêt.
- Activité N°R3 <fixer> : traduit un état de mise en butée.
- Activité N°R7 <fixer, tourner> : cette activité représente l'état de mise en butée conditionnelle.
- Activité N°R11 <fixer, dévisser> : c'est une activité de dévissage d'une fixation.
- Activité N°R15 <fixer, tourner, dévisser> : c'est l'activité de la mise en butée conditionnelle pour le dévissage.
- Activité N°R19 <fixer, découper> : c'est une activité de découpage du produit à démonter.
- Activité N°R23 <fixer, tourner, découper> : correspond à une mise en butée conditionnelle pour le découpage.

Enfin, à partir des actions réalisées par l'opérateur (**intervenir, extraire**), nous recensons trois activités :

- Activité N°O1 < **intervenir** > : correspond à une intervention manuelle au cours du processus de désassemblage pour résoudre un problème.
- Activité N°O2 < **extraire** > : traduit l'état d'extraction d'une pièce libérée.
- Activité N°O3 < **intervenir, extraire** > : traduit l'état d'intervention pour libérer une pièce et l'extraire.

#### 6.4. La réalisation coopérative de travail

A partir de l'ensemble des activités recensées dans le volet précédent nous allons identifier des tâches au sein du système homme-machine. On distingue à ce stade trois catégories de tâches : des tâches effectuées par la machine comme par exemple la tâche qui associe l'activité N°R11 (activité de dévissage) et l'activité N°R19 (activité de découpage). La deuxième catégorie concerne les tâches manuelles qui se forment d'activités manuelles (par exemple l'activité N°O1, N°O2 et N°O3). La dernière catégorie représente les tâches homme-machine : ce sont des tâches formées à partir d'au moins une activité manuelle avec une activité de la machine ou d'une activité homme-machine (par exemple l'activité N°N15). Cette dernière catégorie représente le terrain d'étude de la coopération entre l'homme et la machine.

Dans ce sens, on considère donc que le travail coopératif entre l'homme et la machine est une forme de mise en commun coordonnée de la réalisation des actions élémentaires. En conséquence, la partageabilité de la réalisation des tâches se limite à une forme d'aide à la réalisation d'actions élémentaires.

La Figure 6.7 montre cette vision de la coopération ; on constate que la bonne identification des actions (dès l'étape de conception du système homme-machine) contribue à renforcer la coopération, soit au niveau système de contrôle, soit au niveau système contrôlé. La dynamique du coordinateur des actions (voir la Figure 6.7) est basée sur les scénarios de production développés dans l'étape de conception.

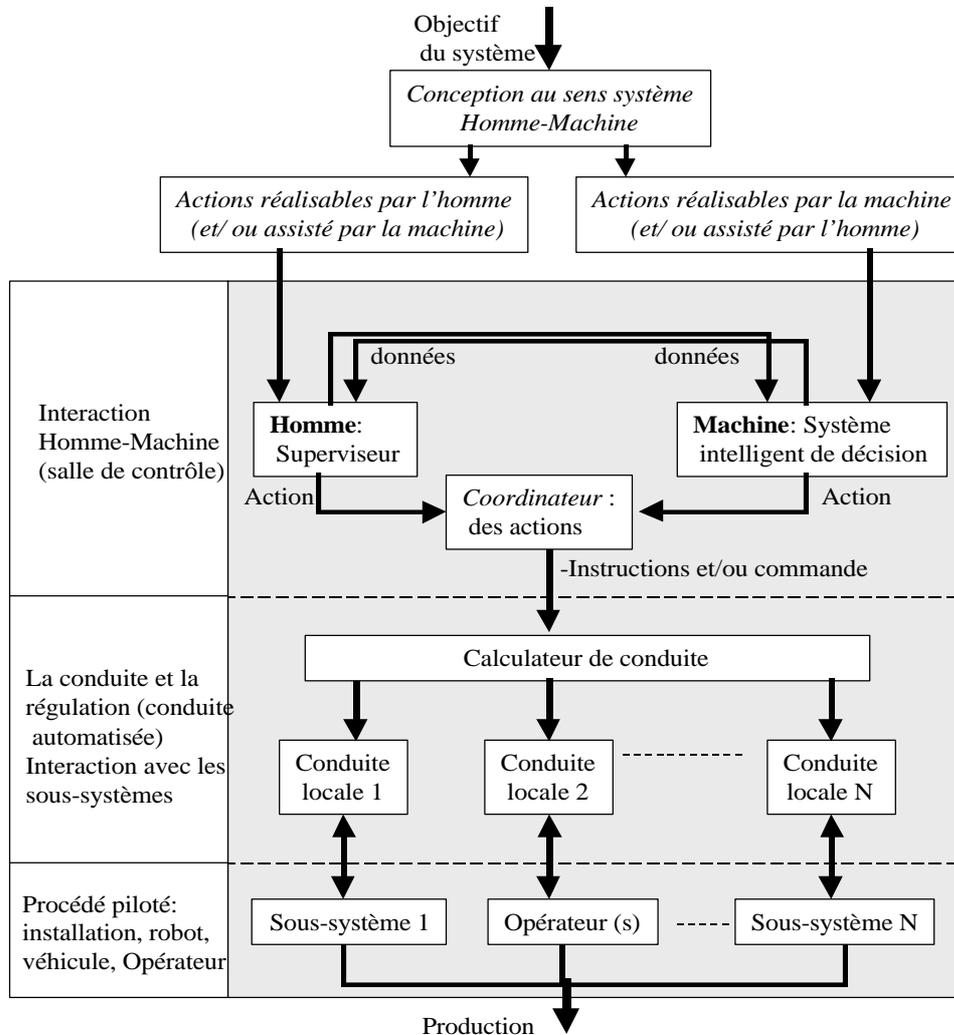


Figure 6.7 : La coopération Homme-Machine : une vision basée sur la réalisation des actions

## 6.5. Généralisation

Le principe de la coopération développé précédemment peut être généraliser pour l'ensemble des missions, des tâches et des activités. Rappelons les définitions suivantes, sur lesquelles nous nous sommes appuyé :

- **Actions** : représente les efforts consentis pour atteindre un objectif dit transitoire. Une action est exécutée, soit par une machine, soit par un homme. Une ou plusieurs actions constituent une **activité**.

- **Activité** : représente un ensemble d'actions visant à atteindre un sous-objectif, une ou plusieurs activités constituent une **tâche**.
- **Tâche** : représente un ensemble d'activités visant à atteindre un objectif. Une ou plusieurs tâches constituent une **mission**.
- **Mission** : représente l'ensemble des tâches visant à réaliser de l'objectif global du système.

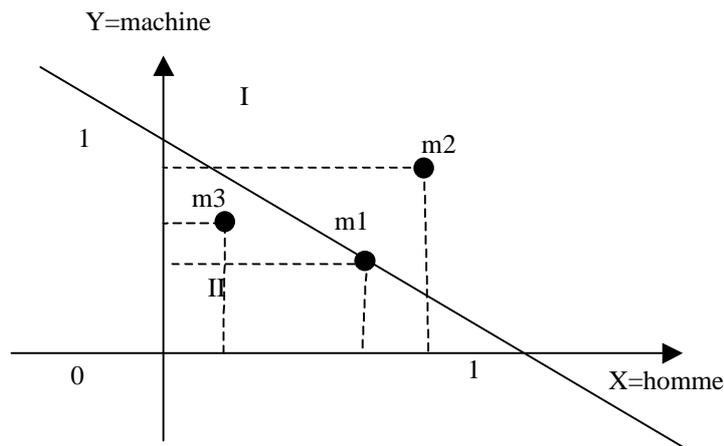
La réalisation optimale d'une mission, est basée sur la réalisation optimale des tâches qui la composent. De la même manière, la réalisation optimale d'une tâche revient à optimiser la réalisation des activités qui la composent. Donc, la mise en œuvre de la coopération homme-machine (rappelons que l'objectif de la coopération est l'optimisation de la performance du système entier) ne se limite pas à l'identification et à la spécification des actions ; mais la coopération dépend aussi du mode d'organisation de ces actions dans les activités, et/ou les tâches (et évidemment dans les mission) et du mode de leurs partage entre les acteurs (mode statique dans l'étape de conception et/ou dans l'étape de démarrage du système, et mode dynamique en temps réel selon les capacités respective des acteurs). Du point de vue homme-machine, nous considérons globalement qu'une mission est composite, c'est-à-dire qu'elle nécessite à la fois des interventions de l'homme et de la machine. Ceci peut également être vrai au niveau des tâches et des activités. Au niveau fin, concernant les actions, on ne doit plus raisonner de façon globale, mais de façon locale et précise (on rappelle que les actions sont considérées comme élémentaires). Celles-ci sont donc individualisées, c'est-à-dire affectées à un acteur précis (homme ou machine).

Dans ce contexte, il est possible de représenter les niveaux supérieurs (mission, tâche, activité) par un graphique montrant la participation composite des différents acteurs (voir Figure 6.8).

En effet, sur ce graphique on représente sur l'axe des x la contribution de l'homme à la mission (éventuellement à la tâche, et à l'activité) et sur l'axe des y celle de la machine (comme nous avons fait pour les actions voir && 6.1.2). Si le point indiquant la position de la mission se situe au point (1,0), la mission est entièrement manuelle ; si elle est en (0,1), elle est entièrement automatique et si elle est sur la droite  $x+y=1$ , elle est composite avec une participation de chacun des acteurs et entièrement déterminée (spécifiée). Si la position se trouve en dessous de cette droite (triangle II), elle est sous définie (sous-spécifiée), si elle est au dessus de cette droite elle est sur spécifiée.

La définition de ces trois emplacements (probabilistes) de chaque mission (tâche, activité) s'explique de la manière suivante : une mission (tâche, activité) se trouvant sur la ligne  $x+y=1$  est composée des actions qui appartiennent aux secteurs I, II, III et IV (Figure 6.3), et qui sont bien spécifiés dans un contexte donné et pour un ensemble de critères considérés. Si la mission (la tâche, l'activité) se trouve au dessus de la ligne  $x+y=1$  (avec des valeurs de x et y inférieur ou égal à 1), on parle d'une mission (tâche, activité) composée des actions qui appartiennent aux secteurs I, II, III et IV (Figure

6.3), et qui sont spécifiées dans différents contextes et pour un ensemble de critères considérés. Finalement, si la mission (la tâche, l'activité) se trouve sous la ligne  $x+y=1$  (en considérant que les valeurs positives de  $x$  et  $y$ ) on a le cas de sous-spécification (ou l'indéterminisme par rapport aux acteurs hommes et machines), cette sous-spécification suppose que la mission (la tâche, l'activité) est composée essentiellement d'actions appartenant au secteur V (voir Figure 6.3), ces actions ne peuvent pas être spécifiées à cause de l'insuffisance des critères considérés dans un contexte donné. Nous excluons ces missions (tâches, activités), comme nous l'avons fait pour les actions. On suppose donc, que toutes les missions (tâches, activités) sont, soit spécifiées d'une manière déterministe (sur la ligne  $x+y=1$ ), soit sur-spécifiées.



**Figure 6.8 : Participation de l'homme et de la machine à une mission (tâche, activité)**

De point de vue de la mise en œuvre de la coopération homme-machine, le cas de sous-spécification pose le problème du non déterminisme. Ce problème peut être traité en temps réel lors de l'exécution, en laissant aux acteurs entière (ou une certaine) liberté de choix de solution, ce qui peut éventuellement poser un problème de qualité, de fiabilité et de sécurité, par la non validation préalable des solutions potentielles.

Par contre, le cas de sur-spécification est du point de vue de la coopération plus intéressant. En effet, la sur-spécification encapsule différents scénarios de types déterminés (se trouvant sur la ligne  $x+y=1$ ). Donc, la sur-spécification des missions (tâches, activités) conduit à identifier les rôles potentiels de chacun des acteurs et indique également les possibilités de choix pour arriver à une définition particulière (et entièrement déterminée). Dans ce cas, comme l'indique la Figure 6.9, une projection de point représentant la mission (tâche, activité) sur les axes  $x$  et  $y$  définit un vecteur sur la ligne  $x+y=1$ . Ce vecteur représente les cas possibles de la définition déterminée de la mission (tâche, activité), et par conséquent cette projection sert à passer de la définition potentielle à la définition opérationnelle. En effet, à partir du point m2, qui représente une mission (tâche, activité) sur-spécifiée, on peut, en choisissant l'implication particulière de l'homme et de la machine (on a le droit de choisir car les actions élémentaires sont spécifiées pour différents contextes (et donc sur-spécifiée) comme nous l'avons expliqué ci-dessus), arriver sur la droite  $x+y=1$  dans l'intervalle délimité par les intersections de cette droite avec les droites donnant des coordonnées  $x$  et  $y$  du point m2. Si l'on choisit le

déplacement horizontal, on diminue (minimise) la participation de l'homme à cette mission (tâche, activité) (point P1m2), lors du déplacement vertical, on diminue (minimise) la participation de la machine (point P2m2). Tout point Pnm2 dans l'intervalle sur la droite  $x+y=1$  correspond à un cas valide de la participation de l'homme et de la machine à cette mission (tâche, activité).

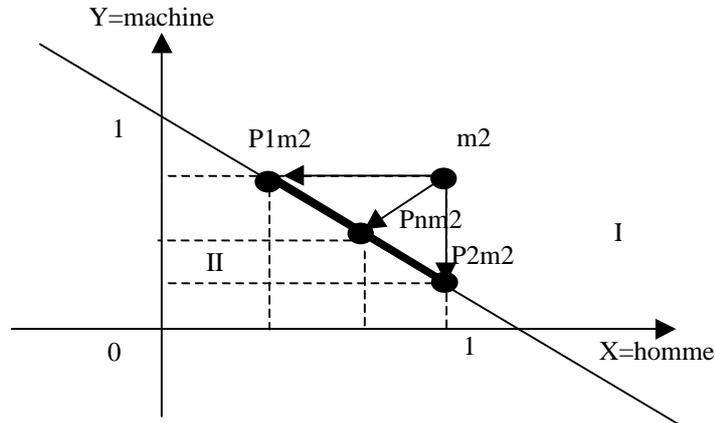


Figure 6.9 : Différentes instanciations d'une mission (tâche, activité) sur-spécifiée

Cette idée nous montre que la spécification des actions dans différents contextes mène à élargir le concept de la coopération et du partage de travail entre les acteurs. En effet, étudions la

Figure 6.10 qui schématise une modélisation MAD d'un système, dont l'objectif est atteint par la réalisation de  $n$  missions. Chaque mission peut être, soit définie d'une manière déterministe, soit être sur-spécifiée. A son tour, toute mission est composée d'un ensemble de tâches qui peuvent être, soit définies de manière déterministe, soit être sur-spécifiée. De même, les tâches sont composées des activités qui peuvent aussi être définies de manière déterministe, ou sur-spécifiées. Dans le premier cas, l'activité sera composée d'un ensemble des actions spécifiées pour un contexte donné, comme les actions  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ , ces actions seront réalisées parallèlement, séquentiellement ou de manière alternative (voir

Figure 6.10). Dans le deuxième cas, chaque activité comme A2 peut avoir plusieurs projections (activité définie d'une manière déterministe), chacune de ces projections possède un ensemble d'actions spécifiées pour le contexte correspondant comme les actions  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ . C'est à ce niveau que l'on peut parler du partage dynamique pour la réalisation des activités (et ainsi des tâches et des missions) : ce partage qui peut-être réalisé dans l'étape de démarrage du système, et /ou en temps réel selon les capacités respectives des acteurs.

La mise en œuvre de ce partage est fondée sur les actions spécifiées pour différents contextes. On peut donc activer un ensemble d'actions selon le contexte et le couple capacité-disponibilité des acteurs. De plus, pour les actions de type  $a_3$  qui peuvent être réalisées par l'homme ou par la machine un partage temps réel s'impose.

### 6.5.1. Partage temps réel

La vision exposée au § 6.4 montre ce que l'on peut appeler la coopération par un partage statique des actions. Ce partage consiste à attribuer les actions à réaliser entre les acteurs. Cette attribution est effectuée dans l'étape de la conception et ceci avant l'implémentation du système homme-machine. En d'autre terme, ce partage est réaliser off-line et une fois pour toute.

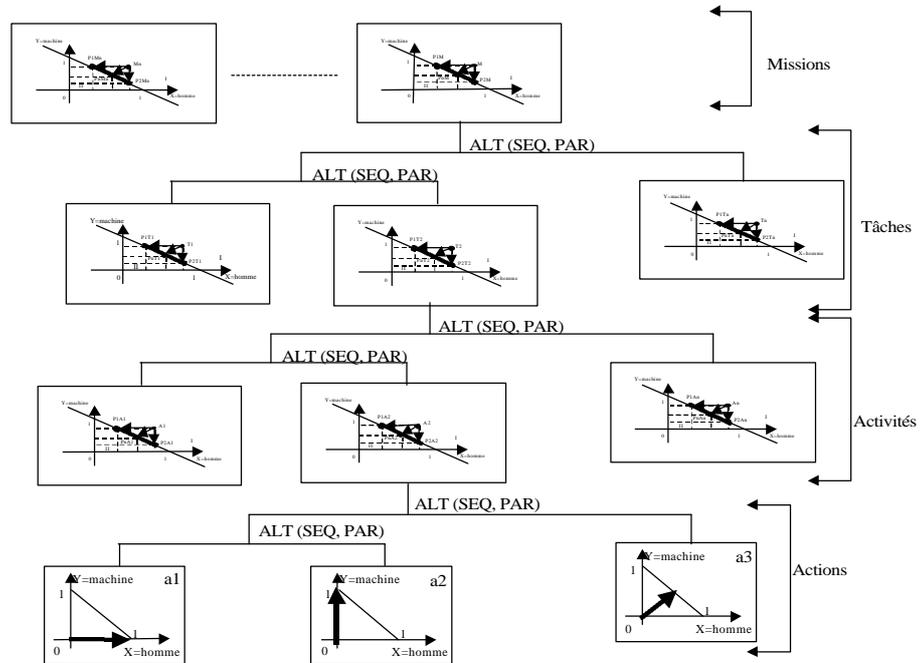


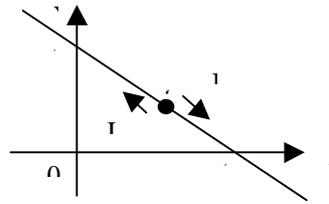
Figure 6.10 : Représentation MAD d'un ensemble (missions, tâches, activités, actions)

En effet, ce mode de partage est bon si on pouvait garantir la non-variation des performances des acteurs. Ce qui n'est pas le cas, donc un autre mode de partage est nécessaire. Le partage dynamique des actions (voir chapitre 2, &2.2.4.1) peut jouer le rôle de compensateur de cette insuffisance.

Le partage dynamique des actions va donc ajuster et améliorer la coopération réalisée "statistiquement". Pour cela, il faut mesurer des indices de provenance des acteurs (chapitre 2, &2.2.4.1). Selon ces indices, un ajustement du partage sera effectué. Pour un système homme-machine on a besoin d'au moins :

- Un indice (P) de performance du système technique (calculateur).
- Un indice (Wl) mesurant l'état de mobilisation de l'homme (charge de travail).

Selon les valeurs de ces indices, une redistribution des actions homme-machine (secteur III et IV sur la figure 6.3) est effectuée. On peut schématiser ce partage sur la Figure 6.11 (on garde les significations et les valeurs des axes comme dans la figure 6.3).

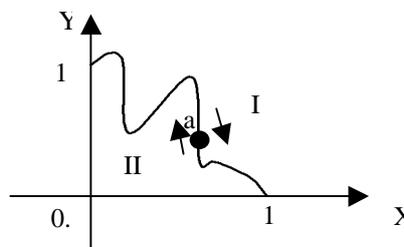


**Figure 6.11 : La représentation graphique des actions homme-machine dans le cas de l'application du partage dynamique**

Dans cette figure, on note que toutes les actions homme-machine se trouvant sur la ligne qui relie les points (0,1) et (1,0) sont des actions qui changent l'acteur. Ce changement est le résultat de la prise en compte des indices (cités ci-dessus). Donc, une action se trouvant sous la responsabilité de l'homme à un moment donné, peut, à un autre moment, se trouver sous la responsabilité de la machine.

En ce qui concerne l'espace I (limitée à l'espace des actions identifiées) et II, ce sont les espaces contenant les actions réalisables par un acteur et assisté par l'autre. Il est supposé que pour un ensemble des critères considérés, ces actions ne peuvent pas changer leur acteur principal, par conséquent, on applique la coopération dans le sens aide (assistance).

Dans la Figure 6.11 nous avons supposé que les actions partageables se trouvent sur une ligne représentée par une équation linéaire. De manière générale, toujours en considérant un ensemble de critères et les indices mesurés, les actions peuvent se trouver sur la courbe d'une fonction plus complexe que l'équation d'une ligne (la définition de cette fonction dépend du contexte du système analysé et des critères considérés). Ainsi, la Figure 6.11 sera modifiée comme ceci est montré sur la Figure 6.12.



**Figure 6.12 : La représentation graphique des actions homme-machine dans le cas du partage dynamique temps réel**

Comme nous venons de le voir, le partage dynamique des actions exige la mesure en temps réel des indices (performance, charge de travail). De plus il faut déterminer la dynamique du "répartiteur-coordonateur" (voir chapitre 2; & 2.2.4). Ce qui complique considérablement la réalisation de ce mode de partage lors de la mise en œuvre de la coopération.

Nos travaux de réalisation dans le cadre de cette thèse se limitent à la mise en place de la coopération dite "statique" ou encore verticale par une spécification adéquate des actions identifiées au sein du système homme-machine ; ceci sera l'objet du septième chapitre. Par contre, la réalisation du partage dynamique des actions en temps réel sera une ambition et une continuité de ce travail.

### 6.5.2. Partage au démarrage du système

Ce mode de partage s'appuie essentiellement sur la notion de sur-spécification des activités (tâches et missions). Le fait qu'une activité (de même pour les tâches et les missions) soit sur-spécifiée signifie qu'elle possède plusieurs ensembles d'actions de type a1, a2 et a3.(voir

Figure 6.10). L'activation d'un ensemble choisi au démarrage du système peut être considéré comme un partage visant à améliorer la performance du système et par conséquent l'optimisation de la coopération homme-machine. En effet, on peut imaginer que la disponibilité et la capacité des acteurs à traiter un ensemble donné des actions varient. Donc il faut d'une certaine manière choisir l'ensemble (l'instance de l'activité) qui correspond au mieux aux disponibilités et aux capacités des acteurs. Ce fait exige d'avoir les mesures de la disponibilité et de la capacité des acteurs, ce qui ne facilite pas la mise en œuvre pratique de ce mode de partage (comme le cas de partage en temps réel). Néanmoins, on peut dans l'étape de démarrage du système, considérer certains indices comme, la capacité de réaliser l'action (les actions) correspondante, le rendement et la disponibilité ; ensuite on choisit l'ensemble des actions (l'instance de l'activité) les plus adaptés pour réaliser l'activité (tâche, mission) de manière performante.

A titre d'exemple, prenons l'activité A2 représentée sur la Figure 6.13 ; supposons qu'elle possède trois instances (P1A2, P2A2, P3A2) et que chaque instance regroupe trois actions : l'instance P1A2 avec le premier ensemble d'actions (a11, a12, a13), où l'action a11 est réalisée par l'homme, a12 est réalisée par la machine et a13 peut être réalisée, soit par l'homme, soit par la machine (partage dynamique temps réel). L'instance P2A2 avec le deuxième ensemble d'actions (a21, a22, a23), où a21 et a22 sont sous la responsabilité de la machine et a23 sous la responsabilité de l'homme. Dernière instance P3A2 avec un troisième ensemble d'actions (a31, a32, a33), où les deux premières sont sous la responsabilité de l'homme et a33 soumise à la condition du partage dynamique. Si on considère la disponibilité des acteurs pour optimiser le choix d'un ensemble, on peut facilement constater (Figure 6.13) que choisir l'instance P2A2 est judicieux si l'homme est non disponible. Par contre choisir l'instance P3A2 en cas de non disponibilité de la machine est la solution apparente.

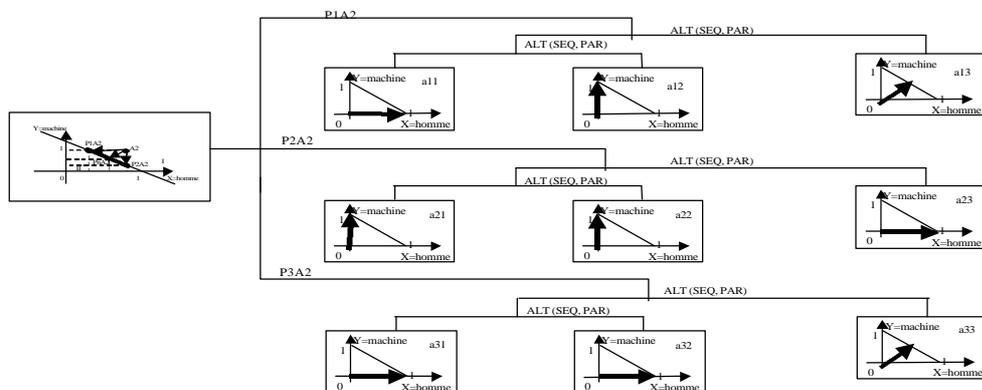


Figure 6.13 : L'activité A2 avec ses trois instances (trois ensemble d'actions)

Ce type de partage est intéressant quand le système peut-être démarré de différentes manières et/ou les acteurs, chargés de réaliser les tâches, supportent des modifications dans leur staff. Optimiser le choix des actions à réaliser au démarrage s'avère un problème très intéressant. Traiter ce problème dans ses différents aspects, constitue une perspective importante de notre travail.

## 6.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé une méthodologie globale pour la conception du système homme-machine. Le principe de cette méthodologie est l'identification et la spécification des actions à réaliser au sein du système homme-machine. Nous avons souligné le fait qu'il est possible de spécifier l'ensemble des actions pour déterminer l'acteur qui est censé les réaliser d'une manière optimale. Pour cela, nous avons adopté un ensemble de critères techniques et ergonomiques et une démarche analytique. Nous avons appliqué cette démarche au système de désassemblage ce qui nous a amené à identifier trois types d'activités: les activités de l'homme, les activités de la machine et les activités homme-machine. Ces activités forment les tâches homme-machine et par conséquent le système homme-machine de contrôle et le système homme-machine contrôlé. Ensuite nous avons discuter la mise en œuvre pratique de la coopération et nous sommes parvenus à supposer que le travail coopératif entre l'homme et la machine est une forme de mise en commun coordonnée de la réalisation des actions élémentaires, et ainsi la partageabilité de la réalisation des tâches, en ce sens, se limite à une forme d'aide à la réalisation d'actions élémentaires. Enfin, nous avons clos le chapitre par une généralisation du principe de partage dynamique pour la mise en œuvre de la coopération.

Le prochain chapitre traitera de la conception et de la réalisation d'une application de supervision d'une cellule de désassemblage et de l'étude quantitative du niveau d'exécution de cette cellule.

Chapitre

7

---

## Etudes quantitatives : application DISSOFT, expérimentations ergonomiques

Dans le premier et dans le cinquième chapitre, nous avons introduit et expliqué la structure de la cellule de désassemblage en tant que système socio-technique. Nous avons précisé que ce système est décomposé en deux niveaux : système de contrôle et système contrôlé. Le premier système reflète l'interaction entre le superviseur et le calculateur. Le deuxième reflète l'interaction entre l'opérateur et le robot. Dans le cinquième et dans le sixième chapitre, nous avons identifié et spécifié les actions dans la cellule de désassemblage. Ensuite nous avons recensé toutes les activités effectives à partir des actions spécifiées. Dans cette démarche, nous sommes partis du principe de concevoir un système centré sur l'homme dans le sens d'un système homme-machine coopératif. Dans ce contexte, nous avons montré qu'une coopération entre l'homme et la machine vise à optimiser le processus de production.

Dans le premier volet du présent chapitre, nous présentons la réalisation d'un système superviseur-calculateur (niveau de supervision) de la cellule de désassemblage, en soulignant l'architecture logicielle de l'application développée. Dans le deuxième volet, nous discutons de la conception ergonomique du système robot-opérateur (niveau d'exécution) et son impact sur la performance globale de la cellule de désassemblage.

### 7.1. La réalisation du système superviseur- calculateur

Le système de supervision pour la cellule de démontage (niveau de supervision) est réalisé en considérant les actions (**préparer, diagnostiquer, décider, suivre, capter, commander et renseigner**) et les activités qui en résultent (voir chapitre VI). L'application logicielle développée pour ce niveau se base essentiellement sur ces actions et les activités considérées.

### 7.1.1. L'architecture logicielle

Le système de supervision a été développé essentiellement dans le but d'une part, de montrer que l'utilisation pratique de la démarche de conception du système homme-machine est possible, et d'autre part, pour améliorer et tester notre connaissance dans le domaine du désassemblage en fournissant un outil d'aide aux superviseurs du processus de désassemblage.

L'application développée est basée sur deux architectures qui reflètent les deux modes de supervision : globale et locale (cf. Chapitre V, Figure 5.3). La fonctionnalité de cette application est constituée à partir de sept actions considérées pour le niveau de supervision et les 21 activités identifiées (cf. chapitre VI).

#### 7.1.1.1. Description générale

L'architecture logicielle pour la supervision globale se base sur le découpage en quatre sous-systèmes [Skaf,2000 et 2001]. Ces sous-systèmes décrivent le processus de construction et de traitement du modèle commençant par la sélection d'une séquence de démontage jusqu'à la constitution d'un fichier de travail (cf. chapitre V). La Figure 7.1 montre ces sous-systèmes et leurs relations :

- Sous-système de génération de séquences : ce sous-système vise à réaliser trois objectifs :
  - 1) Organiser les informations géométriques et techniques pour construire des modèles matriciels et géométriques des produits à démonter. Les informations viennent de deux sources : l'une est le Modèle CAO de produits neufs, l'autre est la base de données (centré sur le diagnostic du produit).
  - 2) Organiser les informations concernant le coût de désassemblage de chaque partie (pièce) de produit d'un modèle. La base de données regroupe tous les facteurs influençant le coût (technique, écologique et l'état du marché).
  - 3) Générer toutes les séquences possibles de désassemblage pour démonter, soit le produit entier, soit un composant du produit.
- Sous-système de sélection de la meilleure séquence : l'objectif de ce sous-système est de sélectionner une séquence de démontage optimale du point de vue économique. Cette séquence prend la forme d'une série de nombres qui représentent les composants (pièces) à démonter.
- Sous-système de planification des opérations de désassemblage : à partir de la séquence choisie et des données sur tous les composants (pièces), ce sous-système procède à la planification des opérations de désassemblage [Sanatochi et al., 1992]. Pour chaque composant et ses liens avec le reste du produit, les actions identifiées pour le niveau d'exécution sont mises en œuvre (dévisser, découper, extraire...etc.). Pour

la réalisation des actions robotisées, le système planifie les opérations et les trajectoires que le robot doit achever (prenant en considération l'analyse géométrique des composants pour la sélection des outils). En ce qui concerne les actions de l'opérateur, le système associe à chaque action à réaliser une fiche dite d'apprentissage (voir Figure 7.1).

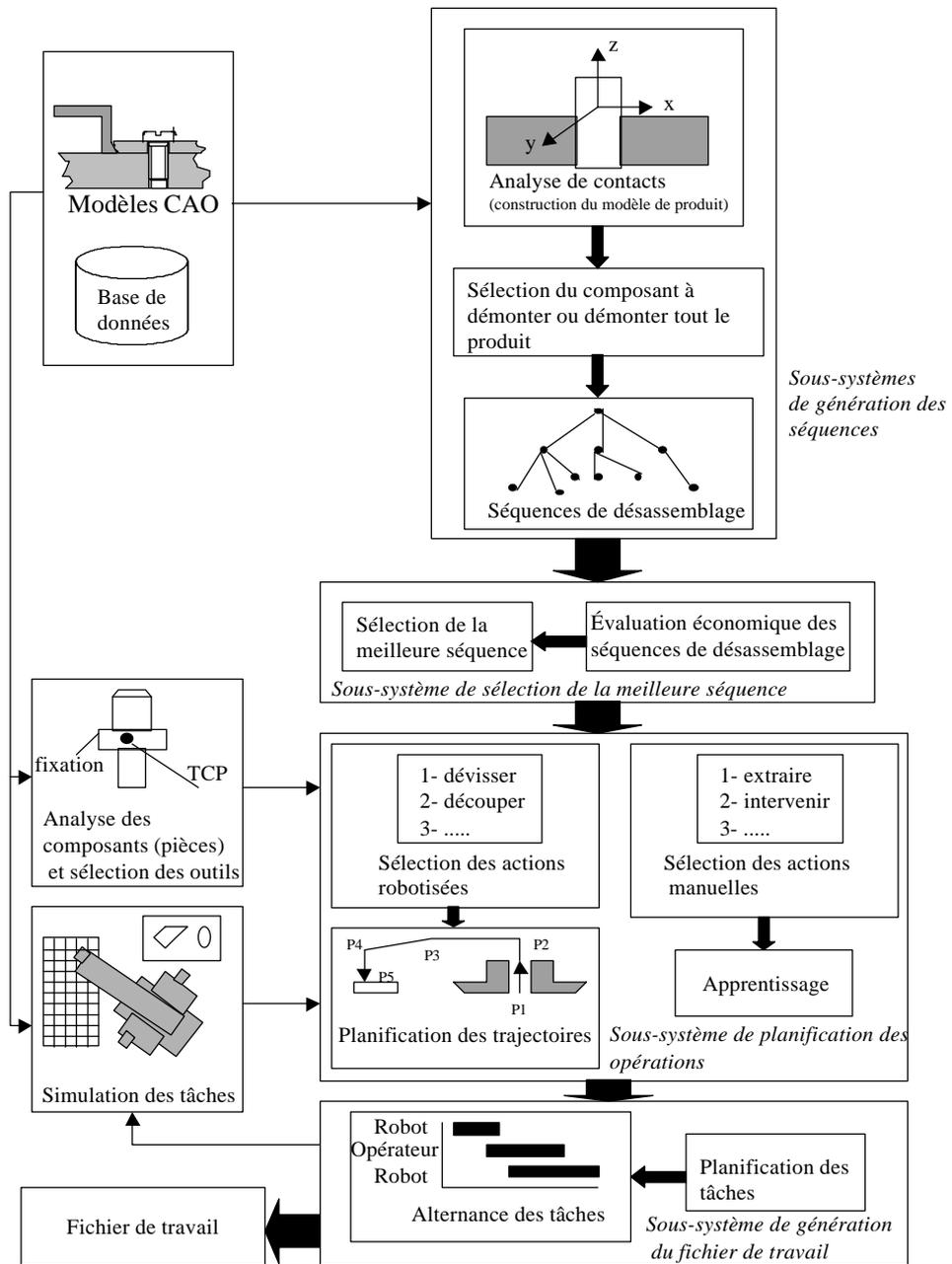


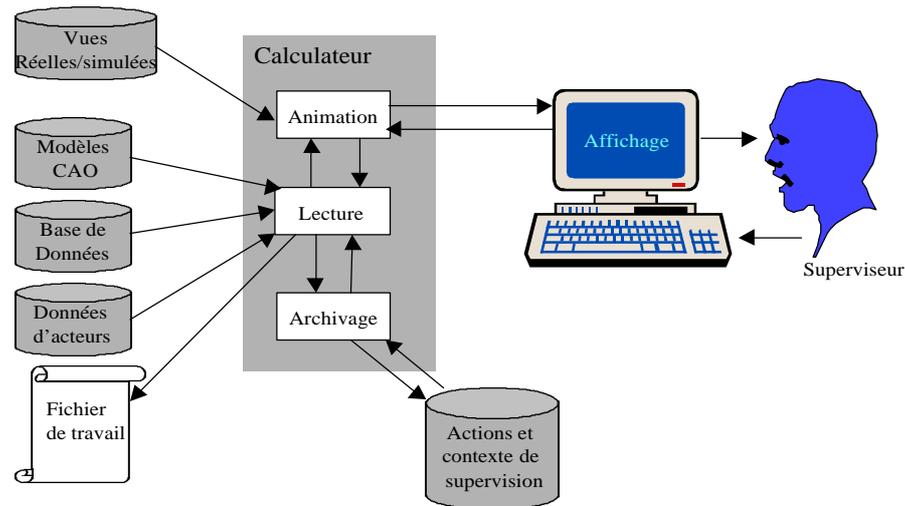
Figure 7.1 : Les sous-systèmes de construction et de traitement du modèle de produit

- Sous-système pour la génération d'un fichier de travail : ce sous-système vise à organiser les informations, en provenance du sous-système de planification des opérations, en tâches robotisée et humaines. Ces tâches constituent le fichier de travail dont la réalisation devrait amener au démantèlement du produit (ou d'un composant du produit). Avant d'envoyer ce fichier au niveau d'exécution, ce sous-système peut l'évaluer

par une simulation virtuelle qui peut amener à modifier certaines actions (opérations).

#### 7.1.1.2. L'architecture pour la supervision globale

L'architecture logicielle correspondant à la supervision globale est schématisée sur la Figure 7.2. Cette architecture reflète une structuration des données et des acteurs (calculateur, superviseur) assurant la réalisation des objectifs de ce système (générer le fichier de travail et superviser le bon déroulement de sa réalisation (voir chapitre V et VI)).



**Figure 7.2 : Architecture logicielle de la supervision globale**

Le calculateur réalise ses activités (activités réalisables par lui seul M3, M5, M9 et M13 et les activités réalisables avec participation du superviseur N°3, N°7, N°11, N°15, N°19, N°23, N°27, N°31, N°35, N°39, N°43, N°47, N°51, N°55, N°59, N°63. Voir chapitre VI, § 6.3.1.1) en utilisant trois modules : module de lecture, module d'animation et module d'archivage. Le module de lecture réalise les fonctionnalités suivantes :

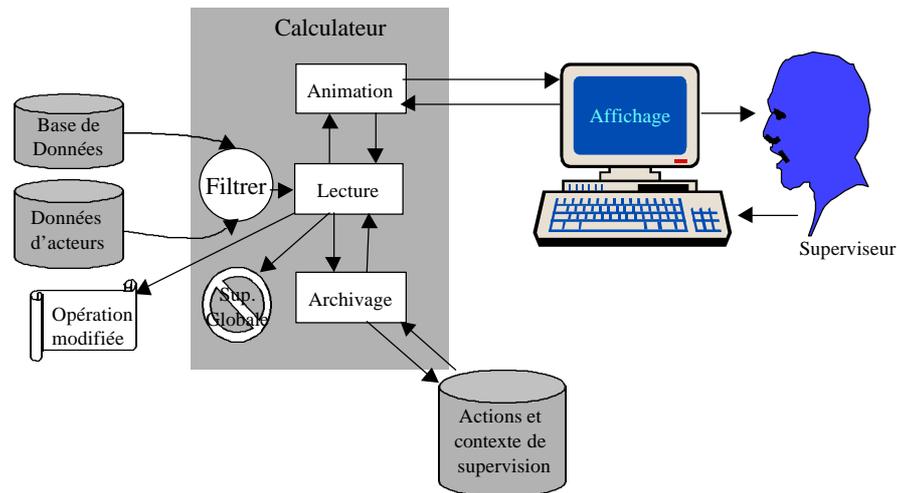
- La lecture du modèle CAO (produit neuf) et le modèle diagnostiqué (produit en fin de vie) et la construction du modèle matriciel.
- La lecture des données concernant les acteurs (robot, opérateur) : capacité, limite, profil...etc.
- La lecture et l'archivage des actions du superviseur et le contexte.
- Le contrôle des modules d'animation et d'archivage.
- Le traitement de toutes les données reçues pour générer le fichier de travail.

Le module d'animation contrôle les aspects graphiques et les vues de l'affichage selon le déroulement du processus (réel ou simulé) et selon les actions du superviseur. Le module d'archivage enrichit la base de

connaissances (à construire à long terme) par la sauvegarde des situations, du contexte et des actions du travail.

### 7.1.1.3. L'architecture pour la supervision locale

Nous avons distingué une architecture logicielle dite locale pour assurer un certain degré de flexibilité de l'application et par conséquent du système de supervision (vu les aléas du processus de désassemblage).



**Figure 7.3 : Architecture logicielle de la supervision locale**

Cette distinction est faite par l'introduction d'un processus de surveillance locale dont l'objectif est de filtrer ce qui devrait être (fichier de travail) et ce qui est (opération instantanée de démontage). Ce filtrage mène, soit à prévoir les prochaines opérations (surtout en cas de sélection de séquences on-line), soit à mettre en cause l'aboutissement de l'opération et par conséquent proposer les mesures nécessaires pour la correction. Si ces mesures réussissent à débloquer la situation, la surveillance continue, sinon toute la séquence est remise en cause et un appel à la supervision globale est nécessaire (voir Figure 7.3).

Enfin, ces deux architectures (globale et locale) sont à la base de l'application DISSOFT développée pour un système de désassemblage.

### 7.1.2. Principe de coopération superviseur-calculateur

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié les différentes approches de la coopération entre un agent humain et un agent artificiel. Nous avons souligné que l'objectif principal de la coopération est l'amélioration de la performance du système entier. Nous avons défini six moyens pour parvenir à une coopération efficace entre les participants. Nous avons analysé en détail les deux modes de coopération (verticale et horizontale) pour dégager une vision de la coopération qui a été exposée au chapitre 6. Dans ce paragraphe, nous expliquerons le principe de coopération (établi entre le superviseur et l'entité informatique) en se basant d'une part, sur les deux modes de coopération verticale et horizontale, et d'autre part sur la vision de coopération avancée au chapitre 6 (&& 6.4).

Le principe adopté de la coopération est basé sur la définition des actions et des activités du système (système de supervision). Comme nous l'avons vu au chapitre 6, les actions spécifiées sont réalisables soit par l'un (calculateur, superviseur) sans l'assistance de l'autre, soit par l'un avec l'assistance de l'autre (voir les moyens de regroupement et de spécialisation, chapitre II). La réalisation des activités (formulées à partir de ces actions) implique les acteurs censés réaliser les actions de l'activité. Par exemple, l'activité N°M3 <préparer> n'implique que le calculateur, car l'action "**préparer**" a été spécifiée en tant qu'action réalisable par la machine. Mais si l'activité contient des actions spécifiées en tant qu'actions homme-machine, l'implication de deux acteurs devient nécessaire. Dans ce cas, on peut distinguer deux situations :

- L'activité ne contient qu'une seule action : un acteur la réalise en s'appuyant sur l'aide de l'autre acteur. Donc on retrouve ici la coopération verticale (elle nécessite la mise en œuvre de moyens de communication, chapitre II). Par exemple, l'activité N°11 < **décider** > : pour choisir une séquence de démontage, le calculateur représente graphiquement et textuellement les informations nécessaires pour que le superviseur décide quelle séquence doit être choisie.
- L'activité contient plus qu'une action à réaliser en parallèle : la réalisation du travail revient à partager la réalisation des actions. Donc, on retrouve ici la coopération horizontale au sens général (elle nécessite la mise en œuvre de moyens de communication et de coordinations, cf. chapitre II). Mais, sans toutefois prêter attention sur qui va gérer cette coopération (malgré l'intérêt indiscutable de cette question, Millot et d'autres ont essayé d'y répondre), le partage de la réalisation des actions pose deux problèmes : qui fait quoi? Quand le faire? Si la spécification des actions désigne l'acteur principal de l'action et l'acteur qui assiste, la réponse à la première question devient simple. Toutefois malheureusement ce n'est pas toujours le cas comme par exemple pour l'activité N°23 < **diagnostiquer, suivre** > : l'acteur principal de ces deux actions est le calculateur et l'assistant est le superviseur. Dans nos travaux actuels, nous n'avons pas traité ces deux problèmes ; nous nous sommes consacrés à réaliser une interface qui permet une meilleure présentation graphique et textuelle, ce qui aide le superviseur à effectuer ces actions (on se ramène alors à une coopération verticale). La coopération horizontale existe dans certains cas, elle est réalisée par des requêtes d'intervention du calculateur et/ou du superviseur. Par exemple, pour l'activité précédente, le superviseur intervient au cours de l'activité pour imposer un choix donné (comme, par exemple, inviter l'opérateur à réaliser une action de déblocage).

### 7.1.3. Réalisation de l'application DISSOFT

L'application DISSOFT (DISassembling SOFTware) est basée essentiellement sur les actions et les activités génériques identifiées dans le chapitre 6. De plus, DISSOFT est enrichi par d'autres fonctionnalités qui visent à satisfaire les

objectifs du sous-système de construction et de traitement du modèle du produit (Figure 7.1).

La réalisation de DISSOFT se base sur les scénarii de fonctionnement du système de désassemblage (chapitre V). Elle débute par une description MAD et UAN d'interface : MAD pour décrire les fonctionnalités d'interface, UAN pour préciser son comportement. Ensuite vient l'étape de réalisation logicielle proprement dite.

#### 7.1.3.1. Description MAD

La description de l'interface selon le formalisme MAD permet d'obtenir une vue globale de l'interaction comme le montre la Figure 7.4. cette figure représente les tâches principale de l'application: Editer, Sélectionner, contrôler, réaliser on-line, Modifier l'affichage et Sortir. Les trois premières tâches se réalisent d'une façon séquentielle commençant par "éditer", ensuit "sélectionner" et finalement "contrôler". Et l'ensemble de ces trois tâches se réalise d'une manière alternative par rapport aux tâches : "réaliser on-line", "modifier l'affichage" et "sortir". La tâche "éditer" se décompose en deux groupes d'activités qui sont réalisées d'une façon séquentielle : le premier groupe contient quatre activités ("visualiser modèle produit", "modifier modèle produit", "créer modèle produit" et "supprimer modèle produit"), ces activités sont réalisée alternativement. Le deuxième groupe contient une seule activité "générer les séquence". Ces deux groupes sont réalisés d'une façon séquentielle. De même la tâche "sélectionner" se décompose en quatre activités réalisée alternativement "visualiser le graphique du coût", "visualiser le graphique du bénéfice", "arranger les séquences par composant/pas de désassemblage" et "filtrer les séquences selon les besoins -choisir une séquence". La tâche "contrôler" se réalise à travers 6 activités qui sont effectuées d'un manières séquentielle, une activité parmi elles est soumise à une condition pour être réaliser l' activité "changer l'acteur". La tâche "réaliser on-line" représente la tâche "changer le modèle P" qui est décomposée en deux activité "démarrer le désassemblage" et "redémarrer le désassemblage", ces deux activité sont réalisées séquentiellement et en plus la dernière activité est soumise à une condition "si un nouveau modèle de produit existe". L'activité "démarrer le désassemblage" se réalise à travers de deux actions réalisées de façon alternative, ce sont "changer l'acteur" et "stopper le désassemblage". La première action est sous à la condition "si le désassemblage est échoué". La tâche "modifier l'affichage" se décompose en deux activités réalisées alternativement "affichage mode 800-600" ou "affichage mode 1024-768". Finalement la tâche "sortie" ferme l'application.

#### 7.1.3.2. Description UAN

Nous avons utilisé la notation UAN afin de préciser le comportement de l'interface lors de l'interaction entre le superviseur et l'entité informatique (le système). En effet, cette description montre le rôle de chaque interlocuteur par l'affinage de ses actions : ceci facilite la mise en œuvre du code de l'application et aide à satisfaire les besoins de chaque acteur. La Figure 7.5 montre la description UAN de l'interface de DISSOFT.



Sur cette figure on traduit la description MAD en description UAN, ainsi chaque tâche de la Figure 7.4 ("éditer", "sélectionner", "contrôler", "réaliser on-line" et "sortir") correspond à une action et/ou un ensemble d'actions de la cellule de désassemblage. Dans UAN on précise le rôle de chaque acteur (machine, homme) pour la réalisation de cette action (ces actions) en ajoutant des nouvelles actions élémentaires (qui correspondent à la manipulation de l'interface).

La tâche "éditer" correspond aux deux actions (préparer, diagnostiquer) identifiées pour la cellule de désassemblage. Le superviseur et le système (l'entité informatique) partage la réalisation de ces actions de la manière suivante : le superviseur lance l'interface de l'édition et le système réagit par l'affichage de modèle de produit, en suite le superviseur peut modifier (créer, supprimer) le modèle et le système affiche et enregistre les modifications. Troisième acte est que le superviseur lance la génération des séquences de démontage et le système calcule et prépare les séquences.

La tâche "sélection" représente l'action "décider" de la cellule. Le superviseur visualise et modifie les vues selon les besoins, le système réagit par l'affichage des vues demandées. Aussi le superviseur peut cliquer sur une courbe pour visualiser les détails et le système en réponse affiche la courbe en gras avec toutes les informations correspondantes. En fin le superviseur sélectionne une séquence et le système prépare le fichier de travail (la séquence à réaliser).

La tâche "contrôler" représente les actions (décider, renseigner, diagnostiquer, capter et commander) de la cellule. Le superviseur déclenche ou stoppe le processus de désassemblage et surveille son déroulement, le système en réponse affiche une vue (réelle ou virtuelle) de la cellule, affiche l'état de progression du désassemblage et affiche les messages textuels sur l'avancement du processus. Le superviseur informe l'opérateur par des messages textuels ou vocaux, le système transmet les messages. En fin le superviseur ordonne le changement de l'acteur d'une opération, le système transmet l'ordre et modifie l'ordre d'opération envoyées au robot.

La tâche "réaliser on-line" représente les actions (décider, suivre, diagnostiquer, capter et commander) de la cellule. Le superviseur déclenche ou stoppe le processus de désassemblage, le système en réponse affiche l'arbre d'états du modèle de produit et l'avancement du processus et affiche des messages textuels sur l'avancement du processus. Le système peut demander l'intervention du superviseur pour résoudre un conflit, en réponse à telle requête le superviseur intervient pour changer l'acteur d'une opération.

Les tâches "modifier l'affichage" et "sortir" sont spécifiques à l'application : pour la première le superviseur demande la modification du mode d'affichage, en réponse le système modifie l'aspect d'affichage. En fin la tâche sortie et réaliser par une requête du superviseur pour quitter l'application, en réponse le système ferme toutes les fenêtres de l'application et revient à la plate-forme d'explication.

La Figure 7.5 montre cette description en détails, où à gauche on trouve les tâches décrites en MAD et à droite la description MAD correspondante.

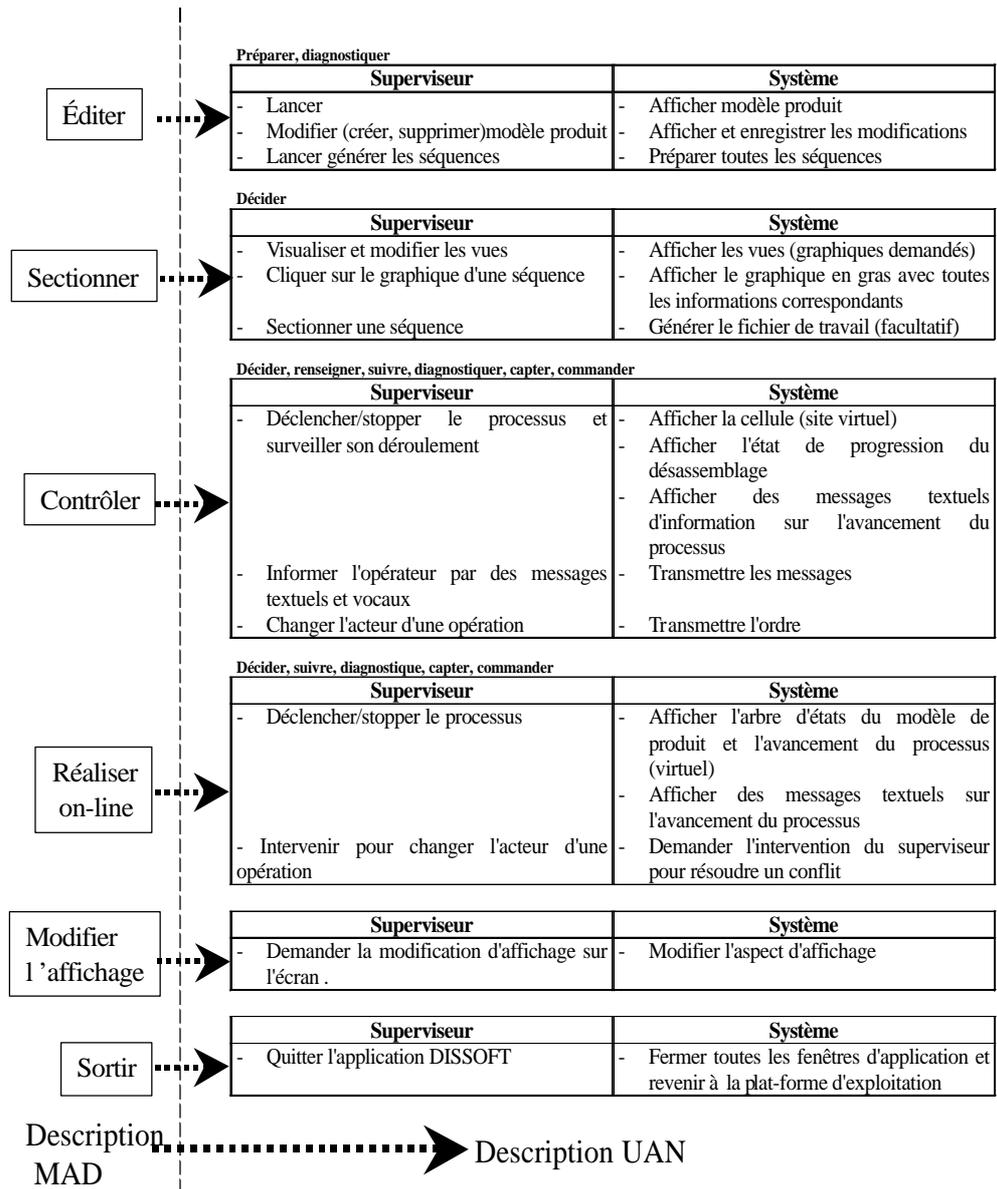


Figure 7.5 : Description UAN de l'interface DISSOFT

7.1.3.3. Limites de DISSOFT

Malgré l'architecture complète de notre application, la réalisation logicielle de la version actuelle est assez limitée. En effet, la non existence de la cellule de désassemblage nous a contraint à considérer une cellule virtuelle où l'on se limite à :

- Considérer un seul modèle de produit très simplifié (de 8 composants).
- Simuler le processus de démontage d'une manière aléatoire.
- Générer les dysfonctionnements du robot d'une manière aléatoire.
- Traiter les séquences de désassemblage sans établir l'algorithme de commande du robot (nous avons réalisé cet aspect dans l'environnement virtuel sous UNIX).

Malgré ces limites, l'application constitue un bon moyen pour montrer que l'utilisation pratique de la démarche de conception du système homme-machine est possible.

#### 7.1.3.4. Réalisation logicielle

L'implémentation de DISSOFT a été faite en Visual C++ dans sa version 6.0. Le développement s'est effectué sur une plate-forme Windows NT et cinq interfaces assurent l'interaction entre le superviseur et l'entité informatique (calculateur).

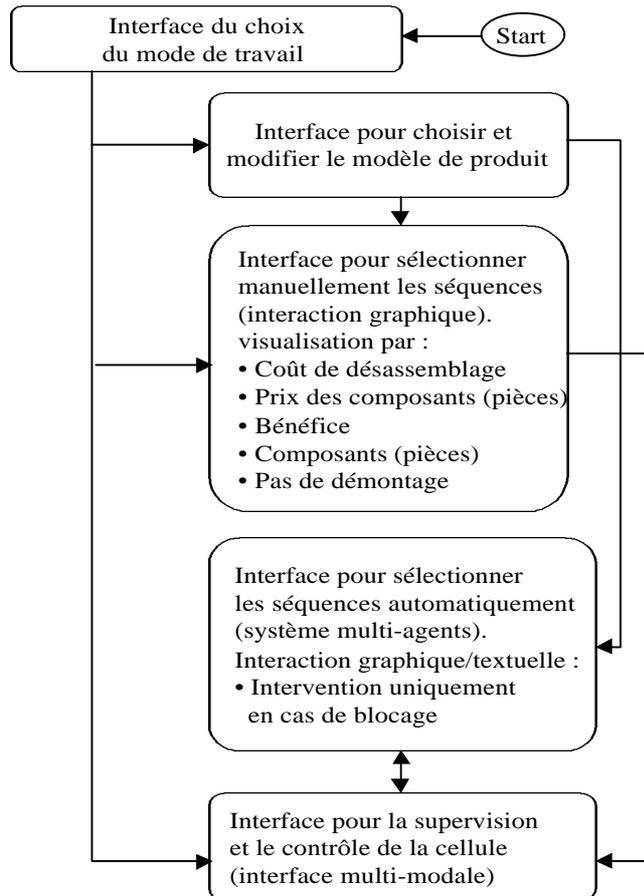


Figure 7.6 : Les interfaces de DISSOFT et leurs interconnexions

La Figure 7.6 montre schématiquement ces cinq interfaces et leurs interconnexions. La première interface donne la possibilité de choisir entre quatre modes de travail. La Figure 7.7 montre cette interface, à partir de laquelle on peut passer pour choisir et modifier le modèle de produit (le bouton "select object"), ou encore passer à l'interface pour sélectionner manuellement les séquences de désassemblage (le bouton "Analyse sequences") ; et finalement, passer à l'interface de supervision et de contrôle de la cellule (bouton "Disassembly process").

L'interface pour choisir et modifier le modèle du produit est présenté sur la Figure 7.8. Cette interface permet de créer le modèle d'un produit (bouton "New object"), supprimer un modèle (bouton "Delete object"), afficher et

modifier le modèle matriciel du produit (bouton "show matrixes" et "modify matrixes"). Et enfin, elle permet de générer les séquences de désassemblage (bouton "Generate sequence file")

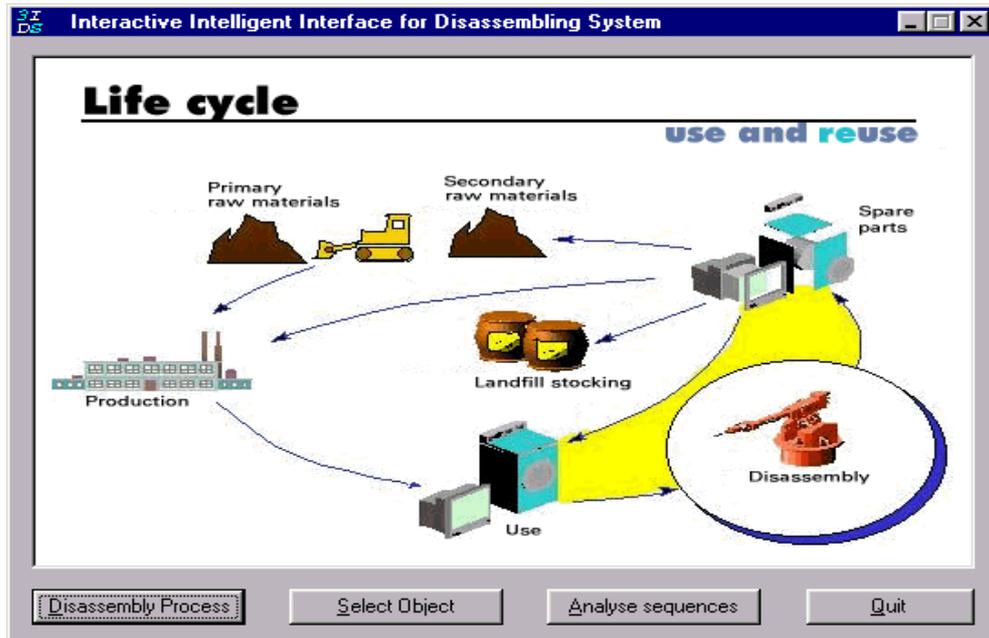


Figure 7.7 : Interface du choix du mode de travail

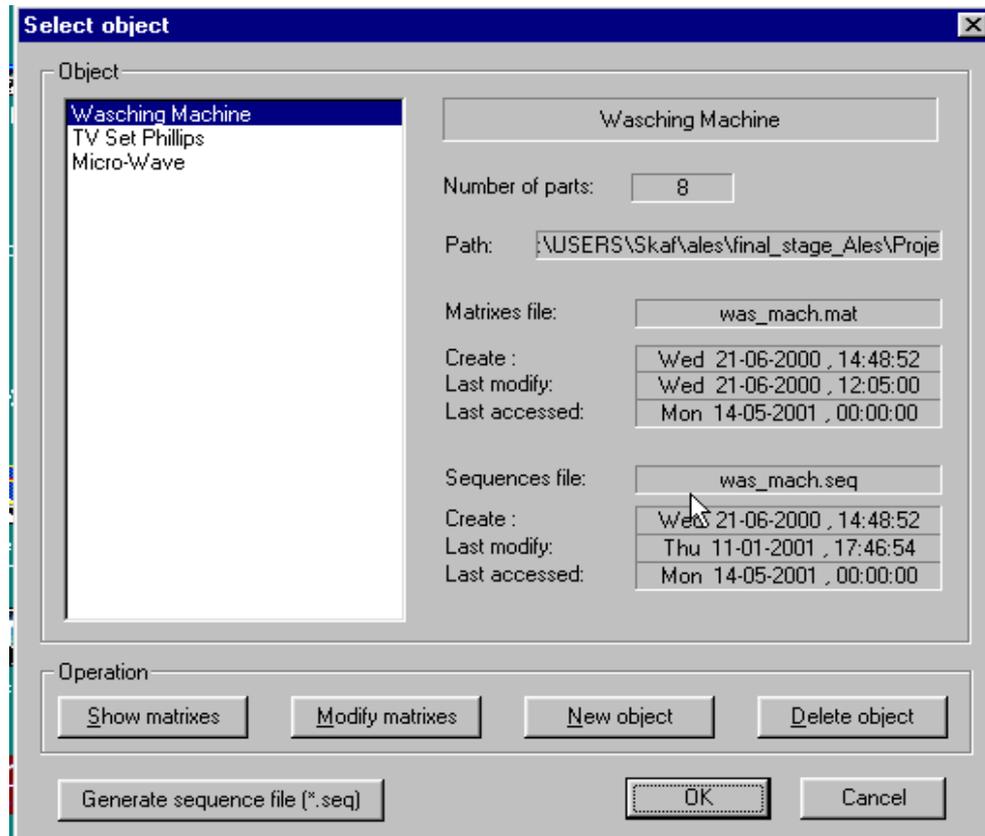


Figure 7.8 : Interface pour choisir et modifier le modèle de produit

L'interface pour sélectionner les séquences de désassemblage est montré sur Figure 7.9. Cette interface permet au superviseur de visualiser les séquences

de démontage générées précédemment afin d'en choisir une qui satisfait les critères considérés. La visualisation des séquences se fait par rapport au coût du désassemblage, au prix des composants, au bénéfice, aux composants et au pas de démontage. La séquence choisie est envoyée à la réalisation en appuyant sur le bouton "Pick up".

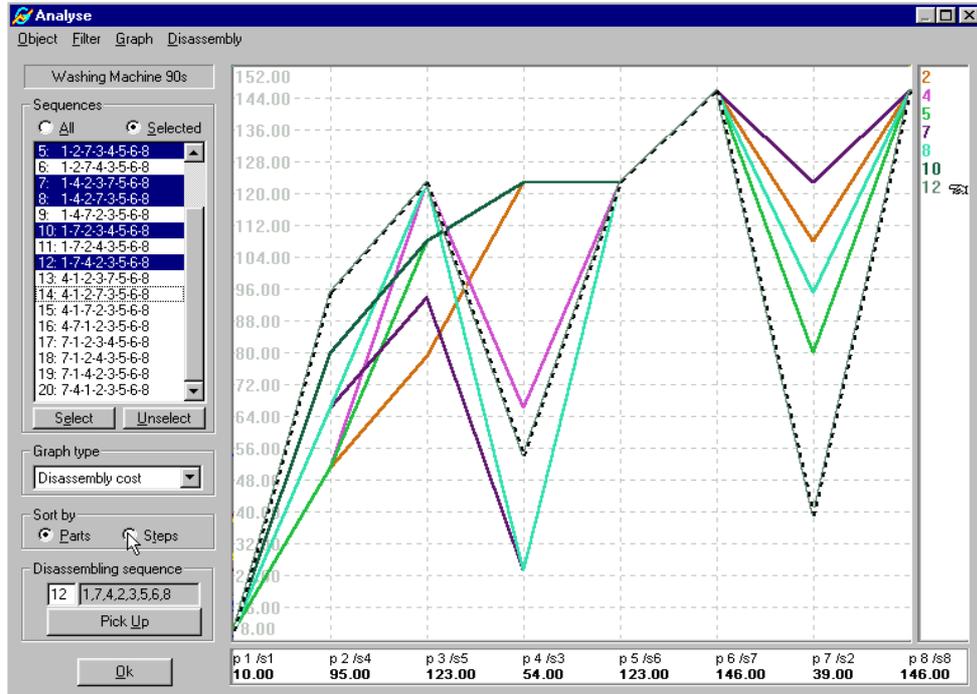


Figure 7.9 : Interface pour sélectionner manuellement les séquences

L'interface pour la supervision et le contrôle de la cellule de désassemblage permet aux superviseurs de visualiser le déroulement du processus de désassemblage tout en ayant la possibilité d'intervenir pour modifier le comportement de ce processus par le fait de changer l'acteur de l'opération en-cours. Ceci intervient quand le superviseur constate un blocage ou une défaillance, ou quand le système affiche un défaut de réalisation. La Figure 7.10 représente cette interface avec 6 fenêtres qui peuvent être activées ou désactivées selon le besoin de superviseur. Ces fenêtres sont :

- Contrôle : permet de stopper le processus et de changer l'acteur chargé de la réalisation d'une opération.
- Time sheet : permet de visualiser l'état d'avancement du démontage d'un composant en signalant le retard ou l'avancement de la réalisation d'un opération (en seconds).
- Look book : permet de s'assurer que le processus de démontage se déroule correctement.
- Les fenêtres part information et part information plus : permettent de visualiser l'information sur les composants à démonter.
- Diary : permet au superviseur de rédiger des remarques et des messages textuels.

L'interface de supervision et de contrôle permet aussi de passer au mode automatique de sélection des séquences. Ce mode est accessible à partir du menu d'interface "Multi-Agent System" ; le superviseur en choisissant ce mode peut accéder au menu pour spécifier les critères du choix de la séquence. Une fois que ce mode est activé, le système basé sur le concept des agents trouve la séquence optimale par rapport aux critères choisis.

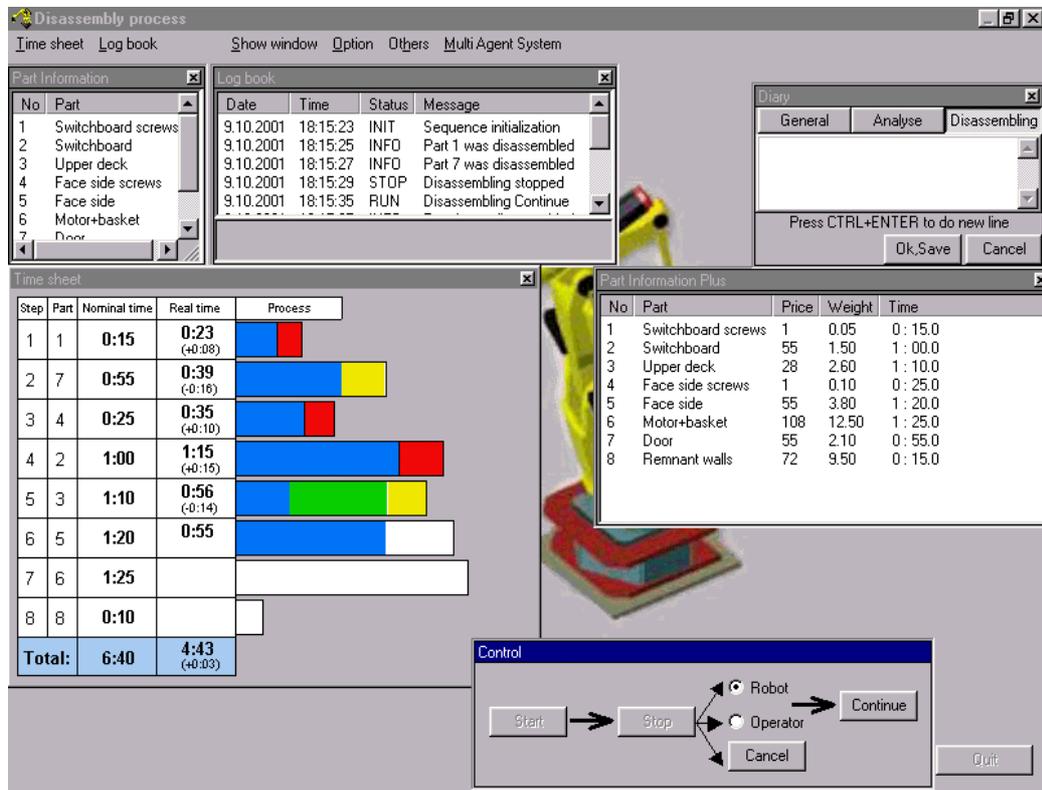


Figure 7.10 : Interface pour la supervision et le contrôle de la cellule de désassemblage

La dernière interface est l'interface du choix automatique des séquences, cette interface représente une application dont la réalisation s'appuie sur une architecture basée sur les systèmes multi-agents. La Figure 7.11 montre cette interface, le superviseur prend en charge de démarrer ou de stopper le processus de fabrication et de réalisation des séquences. Le système affiche l'arbre du modèle de produit et le parcours fait à chaque fois pour trouver une séquence ; le système affiche aussi l'état d'avancement du processus de désassemblage tout en demandant au superviseur d'intervenir en cas de problèmes.

Nous soulignons que l'interface pour sélectionner les séquences automatiquement représente ce que nous appelons "réalisation on-line". Cette réalisation on-line est justifiée par le fait que les produits à démonter ne possèdent pas un modèle sûr (le produit lui-même est différent de son modèle). Donc, l'établissement des séquences de démontage au préalable se révèle parfois à l'encontre de ce qui existe dans le produit. Pour cette raison, le calcul et la réalisation des séquences pas à pas peut combler ce fossé. La Figure 7.12 montre comment se modélise ce système en utilisant les cas d'utilisation de UML. Dans cette figure on représente par l'acteur externe

"superviseur" l'utilisateur principale de quatre fonctions essentielles du système (use cas) : débiter le désassemblage, stopper le désassemblage, action manuelle et modifier la décision. L'acteur "simulateur" est un acteur interne qui utilise l'agent de simulation (use cas) pour simuler la décision prise (use cas). Ce dernier cas d'utilisation contient (utilise) deux comportements : créer une nouvelle action et modifier une action. Le cas d'utilisation "débiter le désassemblage" utilise le cas "prise de décision". La démarche fonctionnelle représenté par cette figure (Figure 7.12) peut être résumer de la façon suivante : le superviseur débute le processus de désassemblage, en réponse le système génère un agent pour chaque possibilité de démontage. Ces agents négocient une décision (selon les critères imposés par le superviseur) et prennent un décision qui se représente soit par la création d'une nouvelle action (dan le sens opération) de démontage soit par la modification d'une ancienne action simulé (mais pas accordée) par l'agent de simulation. Si l'opération de démontage échoue le superviseur sera appelé pour intervenir soit pour rendre l'action réalisable d'une façon manuelle (attribuer à l'opérateur) soit par la modification de la décision. L'annexe D contient tous les diagrammes UML expliquant cette démarche.

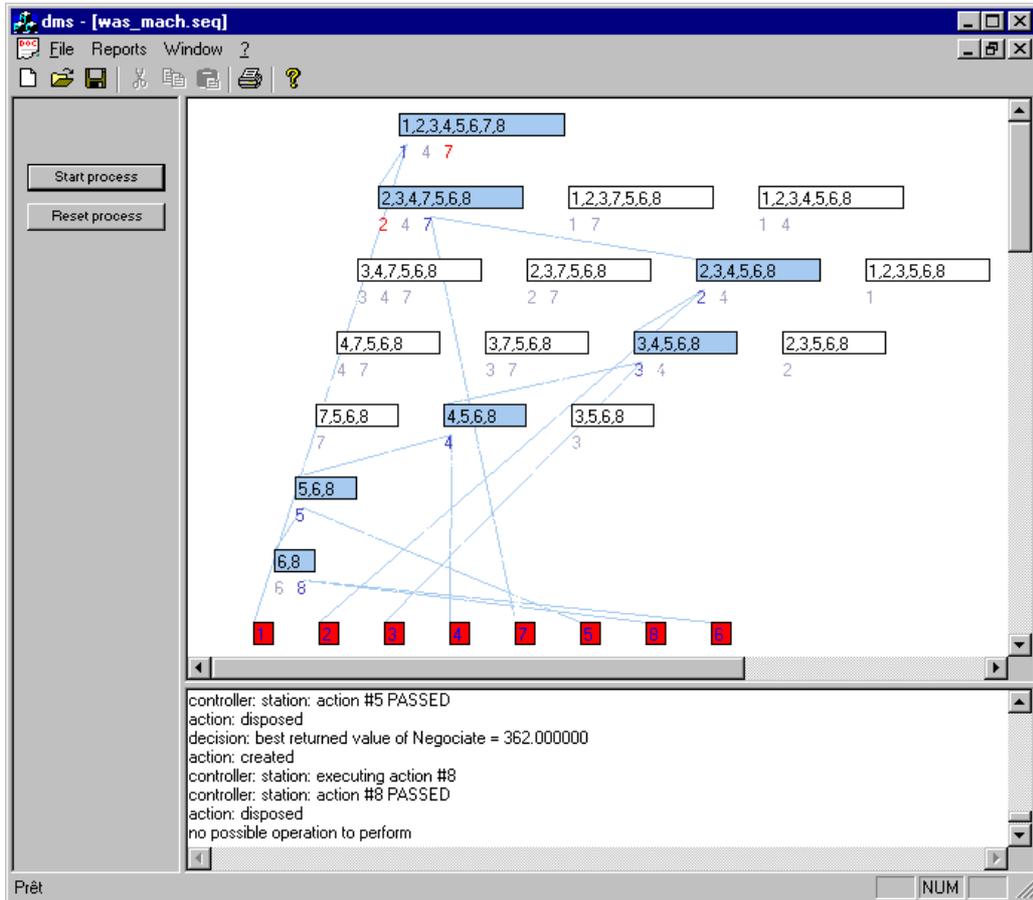


Figure 7.11 : Interface pour sélectionner les séquences automatiquement

Les détails techniques concernant les méthodes de programmation employées pour réaliser l'application DISSOFT, et les différentes étapes de sa mise en œuvre sont exposés dans [Skaf, 2000b], [Skaf, 2000c], [Skaf et al.,2000b].

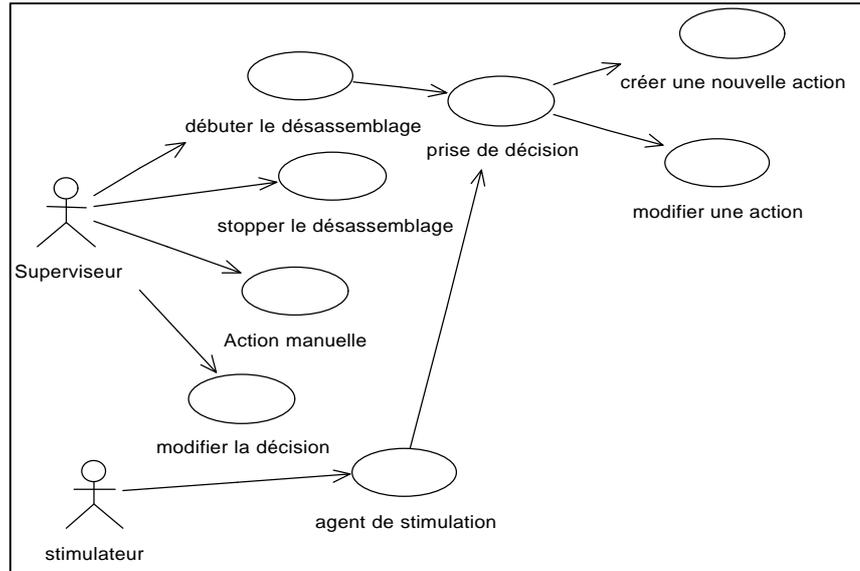
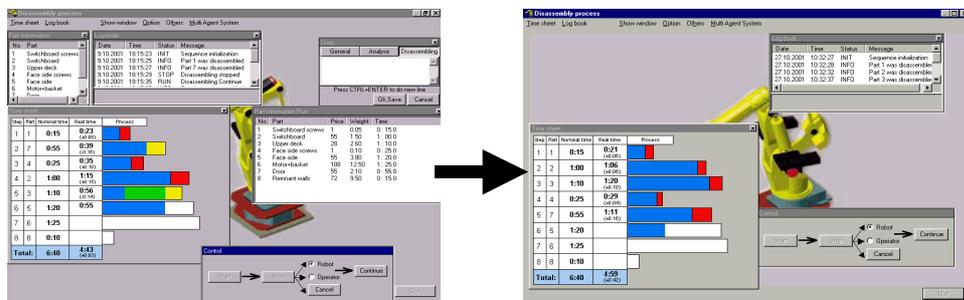


Figure 7.12 : Cas d'utilisation (use cases) pour le système réalisation on-line

7.1.3.5. Perspectives de DISSOFT

La réalisation des tâches dans l'environnement DISSOFT est partagée entre le système (le calculateur) et le superviseur. Ce partage est réalisé dans l'étape de conception (de façon préalable), comme nous l'avons montré sur la description UAN de l'application (Figure 7.5). Une perspective de développement de cette application est de réaliser le partage dynamique pour les actions homme-machine (réalisables par l'homme et la machine). Ce partage doit s'appuyer sur deux modules supplémentaires (voir && 6.5.1), un pour capturer et mesurer l'état de mobilisation du superviseur (charge de travail), le deuxième pour mesurer la performance de l'entité informatique (la machine). Selon ces deux mesures, un troisième module va contrôler la quantité de fenêtres affichées à un moment donné (nous supposons que chaque fenêtre correspond à une action). Donc, quand le superviseur est surchargé, la quantité de fenêtres se réduit à un nombre garantissant une meilleure performance. Par contre, quand il est sous-chargé, la quantité de fenêtres augmente. La Figure 7.13 montre l'interface de supervision et de contrôle de la cellule prise à deux moments différents.



A un moment t, le superviseur a la responsabilité de 6 fenêtres (6 actions) | Au moment t+t', le superviseur est surchargé, les fenêtres se réduisent à trois, le superviseur réalise 3 actions

Figure 7.13 : L'interface de supervision et de contrôle dans le cas de partage dynamique

## 7.2. Conception ergonomique du système robot-opérateur

Dans le chapitre six, nous avons identifié les actions et les activités que l'opérateur réalise dans un espace partagé avec un robot, qui, à son tour, réalise ses activités en parallèle avec l'opérateur. Une coopération pour la réalisation du travail à ce niveau est possible, soit par la mise en œuvre d'une loi de commande intégrant les aspects d'assistance pour la réalisation d'une action (opérateur, robot), soit par une planification ajustée de la réalisation des actions, qui peut améliorer la performance globale du système opérateur-robot. Cette planification impose l'étude de l'aménagement ergonomique de l'espace de travail, car la réalisation d'une action, et en conséquence d'une tâche, est fortement liée à l'organisation de l'espace de travail. De plus, la performance optimale du système homme-machine dépend de la performance de l'élément humain dont l'optimisation dépend de l'organisation du travail et de l'espace de travail. Dans ce volet, nous allons décrire une étude quantitative d'une cellule robotisée de production (qui représente le niveau d'exécution dans la cellule de désassemblage) en considérant l'énergie humaine dépensée pour la réalisation d'une action ou plus globalement d'une tâche. Nous montrons que, en calculant l'énergie dépensée, on peut juger si l'aménagement ergonomique du poste de travail favorise une performance humaine optimale et en conséquence une optimisation de la performance du système tout entier.

### 7.2.1. Les standards ergonomiques

L'analyse ergonomique du travail humain a pour objectif d'assurer que l'espace de travail, les équipements et les activités humaines sont conçus en tenant compte des standards ergonomiques internationalement reconnus. Ces standards sont [Robcad/man, 1998]:

- GARG
- MTM
- NIOSH
- BURANDT SCHULTETUS
- OWAS

Nous donnons ci-dessous une brève présentation de chacun de ces standards, sans trop approfondir, ce qui sortirait du cadre de cette thèse. Dans la continuité de ce volet nous ne considérons que le standard GARG qui permet de mesurer l'énergie dépensée par l'opérateur.

#### 7.2.1.1. GARG

Ce standard représente un ensemble d'équations pour estimer la dépense énergétique pendant la réalisation d'une action. Ces équations ont été développées par Arun Garg [1989 et 1992].

Les équations de Garg permettent de calculer le taux de dépense énergétique (en Kcal/minute) pour les actions de marche, de soulever/déposer des objets en se courbant, en s'accroupissant ou en utilisant uniquement les bras (standing, stoop lift, squat lift, arm lift, stoop lower, squat lower, arm lower, walking, and carrying loads)<sup>7</sup> :

- Standing

$$E = 0.024 \times BW$$

- Stoop lift pour  $h1 < h2 \leq 0.81$

$$E = 0.01[0.325 \times BW(0.81 - h1) + (1.41 \times L + 0.76 \times S \times L)(h2 - h1)]$$

- Squat lift pour  $h1 < h2 \leq 0.81$

$$E = 0.01[0.514 \times BW(0.81 - h1) + (2.19 \times L + 0.62 \times S \times L)(h2 - h1)]$$

- Arm lift pour  $0.81 < h1 < h2$

$$E = 0.01[0.062 \times BW(h2 - 0.81) + (3.19 \times L - 0.52 \times S \times L)(h2 - h1)]$$

- Stoop lower pour  $h1 < h2 < 0.81$

$$E = 0.01[0.268 \times BW(0.81 - h1) + 0.675 \times L(h1 - h2) + 5.22 \times S(0.81 - h1)]$$

- Squat lower pour  $h1 < h2 \leq 0.81$

$$E = 0.01[0.511 \times BW(0.81 - h1) + 0.701 \times L(h1 - h2)]$$

- Arm lower pour  $0.81 < h1 < h2$

$$E = 0.01[0.093 \times BW(h2 - 0.81) + (1.02 \times L + 0.37 \times S \times L)(h2 - h1)]$$

- Walking

$$E = 0.01 \times t [51 + 2.54 \times BW \times V^2 + 0.379 \times BW \times G \times V]$$

- Carrying loads contre les cuisses ou contre le ventre

$$E = 0.01[68 + 2.54 \times BW \times V^2 + 4.08 \times L \times V^2 + 11.4 \times L + 0.379 \times G \times V(L + BW)]$$

où : E- l'énergie dépensée en (kcal/min)

BW- le poids du corps humain (kg)

h1- hauteur du point de début de soulèvement/ de fin de dépôt (m)

h2- hauteur du point de fin de soulèvement/ de début de dépôt (m)

<sup>7</sup> Nous gardons les termes d'origine (anglais) pour ne pas modifier les types d'actions considérés

L- le poids de la charge portée (kg)

S- 0=femelle, 1=male

V- vitesse de marche (m/s)

t- temps (minutes)

G- qualité de la surface de marche (%)

Dans notre étude de la cellule robotisée, nous nous limitons à utiliser ce standard pour quantifier et analyser le travail humain.

#### 7.2.1.2. MTM

Methods Time Measurement (MTM) est un standard qui se représente par des tableaux de mesures de temps pour différents types d'actions : mouvement des bras, saisissement, positionner, mouvement des yeux, mouvement des jambes et des pieds...etc. Le temps mesuré est exprimé en MTU (Measurement Time Unit) qui équivaut à 0.00001 heure (1MTU=0.00001h=0.0006m=0.036s). Ce standard a été développé par l'Association MTM pour les Standards et les Recherches.

#### 7.2.1.3. NIOSH

Le standard NIOSH développé par National Institute for Occupational Safety and Health correspond aux deux standards NIOSH existant : NIOSH81 et NIOSH91. Ce sont deux équations pour évaluer les tâches de soulèvement (lifting) des objets avec deux mains. L'objectif de cette évaluation est la prévention et la réduction de LBP (Low Back Pain) occasionnée par le soulèvement.

#### 7.2.1.4. BURANDT SCHULTETUS

Ce standard a été développé pour analyser les forces et les moments appliqués sur une seule main. L'objectif est d'évaluer les forces maximales qui peuvent être supportées par la main droite et gauche en prenant en compte l'âge, le genre, la fréquence...etc.

#### 7.2.1.5. OWAS

Le Owako Working posture Analysing System (OWAS) a été développé pour classifier les postures de travail (le dos, les bras, les jambes et la tête).

### 7.2.2. Analyse de travail

Pour pouvoir analyser le travail humain, nous avons utilisé l'environnement logiciel Robcad/Man. Cet environnement permet de créer des maquettes virtuelles du contexte de travail avec un réalisme très acceptable. De plus ce logiciel est doté des moyens puissants de calcul qui permet d'étudier les différents aspects ergonomiques de la conception de l'espace de travail ainsi que de l'organisation de travail lui-même. Dans ce contexte nous nous somme

limité à modélisé un espace de travail simplifié qui nous sert a montre l'utilité de l'analyse ergonomique du travail.

7.2.2.1. Configuration du système

La Figure 7.14 représente le système d'exécution : nous avons mis en place une cellule virtuelle où un opérateur réalise son travail avec un robot.



Figure 7.14 : Système d'exécution Opérateur-Robot (cellule virtuelle)

L'opérateur est représenté par un prototype humain (mannequin). Nous avons choisi deux opérateurs de sexe masculin avec les caractéristiques suivantes :

<b>Opérateur →</b>	<b>Opérateur 1</b>	<b>Opérateur 2</b>
<b>↓ Attribues</b>		
<b>Age (ans)</b>	<b>35</b>	<b>55</b>
<b>Taille (m)</b>	<b>1.75</b>	<b>1.75</b>
<b>Longueur de bras (m)</b>	<b>0.55</b>	<b>0.55</b>
<b>Poids (kg)</b>	<b>70</b>	<b>85</b>

Le travail humain dans cette cellule consiste à :

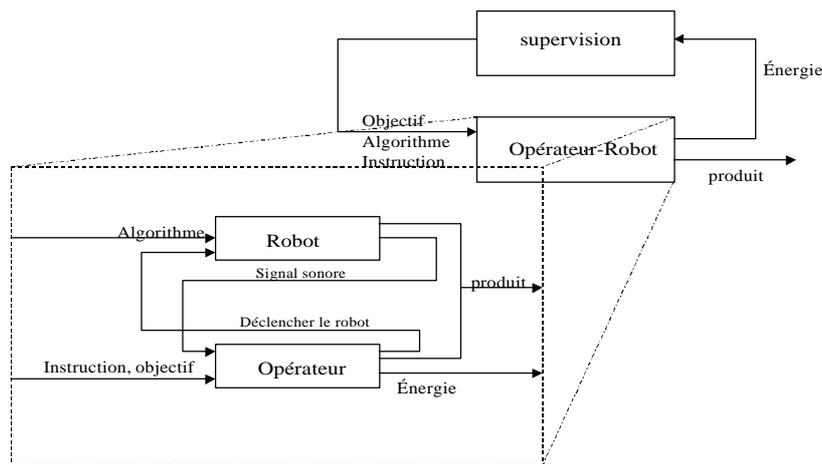
- Porter un objet se trouvant sur une table et le placer sur une autre table (qui se trouve devant le robot) à côté d'un autre objet. La distance à effectuer est de 3 mètres.
- Donner un signal (destiné au robot) pour confirmer le bon déroulement du transport de l'objet.
- Attendre le signal de fin de travail du robot.
- Porter les deux objets (qui sont maintenant soudés) et les placer sur une troisième table en parcourant une distance de 5 mètres.
- Aller au pupitre pour enregistrer certaines données. Ensuite, revenir au

point de départ.

Le travail du robot consiste à déplacer un outil de soudage selon une trajectoire donnée et à effectuer trois points de soudage sur les deux objets. A la fin du soudage, le robot se met dans la position initiale et donne un signal sonore pour avertir l'opérateur.

#### 7.2.2.2. Structure des tâches Opérateur-Robot

Comme nous l'avons vu au chapitre V, la présence d'acteurs, de relations et d'échanges d'informations entre ces acteurs conduit à imaginer puis à évaluer différentes structures étudiées du système de production. Nous avons structuré la cellule de désassemblage en deux sous-systèmes : sous-système d'exécution physique, et sous-système de supervision et de contrôle. Nous considérons le sous-système d'exécution (système opérateur-robot) en tant que système contrôlé par les entrées de contrôle suivantes : l'objectif à réalisé, des algorithmes et des instructions. Les informations fournies par ce système sont le temps de réalisation de l'action et l'énergie dépensée par l'opérateur. La Figure 7.15 schématise le système opérateur-robot dans le contexte global du système de production (voir la Figure 5.3).



**Figure 7.15 : Entrées-sorties du système Homme-Robot**

Comme nous l'avons déjà évoqué au chapitre II, l'objectif principal de la coopération entre l'homme et la machine est l'amélioration de la performance du système homme-machine en entier. Cette performance peut être mesurée de plusieurs façons comme par exemple : taux de production, énergie, temps de réalisation, qualité de production...etc. Pour notre système opérateur-robot, nous avons adopté l'énergie dépensée par l'opérateur comme principale variable à mesurer pour juger la performance du système tout entier et par conséquent évaluer la coopération entre l'opérateur et le robot. Pour cela, nous tenons à souligner les trois hypothèses suivantes :

- Les tâches robotisées (réalisées par le robot) sont calculées et planifiées d'une façon optimale, ceci signifie que la performance du système entier ne dépend que de tâches manuelles. Donc, pour optimiser la performance, il s'agit de minimiser l'énergie dépensée par l'opérateur pour réaliser ses tâches (autrement dit éviter la fatigue de

l'opérateur qui peut faire chuter la performance).

- Le retard causé par le non respect du temps de réalisation des tâches humaines se répercute sur les tâches robotisées d'une manière automatique (cet aspect est intégré dans l'algorithme transmis au robot), ce qui signifie que la performance du système entier dépend de l'état physiologique de l'opérateur mesuré par l'énergie dépensée pour la réalisation de ses tâches.
- Le début du travail (tâche humaine ou tâche robotisée) est décidé selon la nature du travail à achever.

Pour la simulation du système opérateur-robot, dans le contexte du travail décrit précédemment, nous avons choisi de structurer ce travail en quatre tâches : trois tâches humaines et une tâche robotisée (cf. Figure 7.16). Le travail débute par la tâche "Tâche\_opérateur\_1", à la fin de celle-ci l'opérateur vérifie s'il y a une autre tâche à sa charge, sinon il donne l'ordre au robot pour réaliser sa tâche "Tâche\_robot\_1". Après avoir réalisé sa tâche, le robot vérifie s'il doit réaliser une autre tâche, sinon il donne un signal sonore indiquant à l'opérateur qu'il doit débiter la réalisation d'une nouvelle tâche "Tâche\_opérateur\_2", et ainsi de suite jusqu'à l'achèvement du travail. Le scénario complet est montré sur la Figure 7.16.

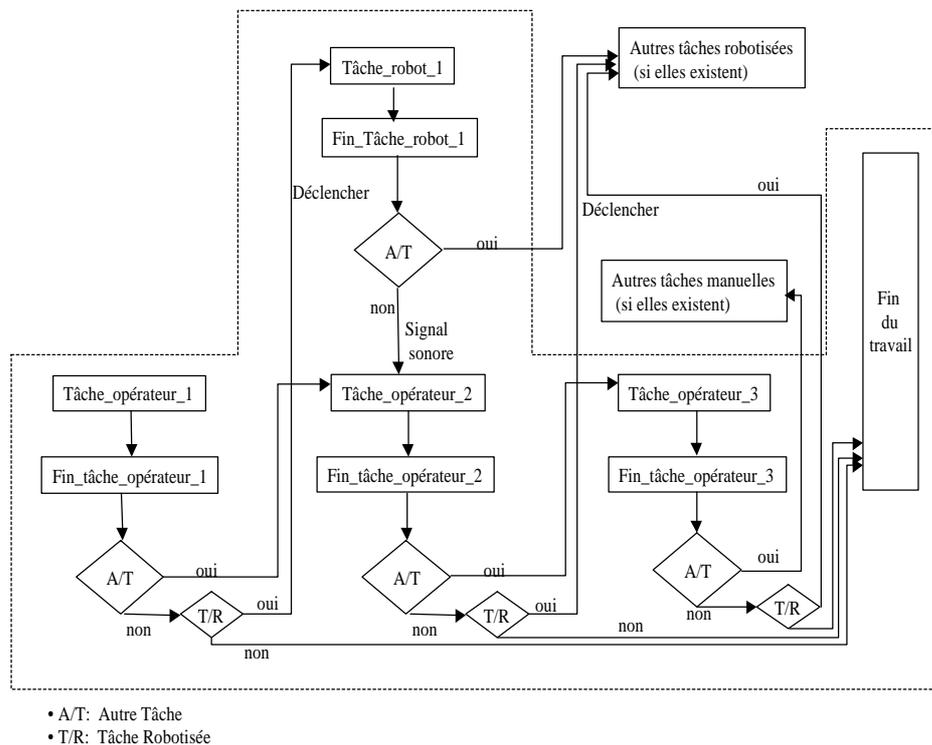


Figure 7.16 : L'organisation des tâches opérateur- robot

L'analyse des tâches manuelles nous amène à identifier quatre types d'actions qui sont : marcher, atteindre, prendre et déposer. Ces quatre types d'actions alternent pour formuler les activités ( pour simplifier l'analyse nous considérons que chaque action formule une activité) qui constituent les tâches manuelles :

- Tâche\_opérateur\_1 : l'opérateur porte un objet se trouvant sur une table et le place sur une autre table (qui se trouve devant le robot) à côté d'un autre objet, ensuite il déclenche le robot. Cette tâche se décompose en onze actions (éventuellement onze activités). Le tableau ci-dessous montre les 11 actions de cette tâche.

	Actions	Nom des actions*
Tâche_opérateur_1	Marcher	start_end
	Marcher	raise_hands_stand_point
	Marcher	get_part_stand_point
	Prendre (à deux mains)	get_part_1_r, get_part_1_l
	Marcher	put_fix_stand_point
	Déposer (à deux mains)	put_part_1_r, put_part_1_l
	Atteindre	retract_r, retract_l
	Marcher	walk_back
	Marcher	mark_stand_point
	Atteindre	via_press
	Atteindre	press

Tableau 7-1 : Les actions de la tâche "Tâche\_opérateur\_1"

- Tâche\_opérateur\_2 : l'opérateur se met en position d'attente de la fin de la tâche robotisée. Cette tâche contient 3 actions qui sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

	Actions	Nom des actions*
Tâche_opérateur_2	Marcher	mark_stand_point
	Atteindre	press
	Marcher	put_fix_stand_point

Tableau 7-2 : Les actions de la tâche "Tâche\_opérateur\_2"

- Tâche\_opérateur\_3 : l'opérateur porte l'objet soudé et le place sur une troisième table. Ensuite, il va au pupitre pour enregistrer les données. Cette tâche se décompose en 22 actions qui sont montrées dans le Tableau 7-3.

### 7.2.2.3. Situation de simulation

Pour vérifier et valider la bonne conception de la cellule, soit au niveau aménagement ergonomique de l'espace de travail, soit au niveau organisation des tâches humaines/robotisées et leur interaction, on effectue des simulations. Nous nous en servons pour montrer que la coopération opérateur-robot-espace de travail dépend des caractéristiques physiques de l'opérateur et de la bonne conception de l'espace de travail. Dans l'exemple étudié, nous nous limitons à considérer la tâche "Tâche\_opérateur\_1" et ses onze actions. Néanmoins, une analyse semblable pourrait aboutir à la même conclusion pour les deux autres tâches. Aussi, nous considérons que le temps de travail journalier est de huit heures et le temps de réalisation d'une action est déterminée par la méthode MTM.

\* Nous conservons les noms des actions telles qu'elles sont dans le logiciel de simulation

		Actions	Nom des actions
Tâche opérateur_3		Marcher	put_fix_stand_point
		Atteindre	retract_r, retract_l
		Prendre (à deux mains)	take_out_part_1_r, take_out_part_1_l
		Prendre (à deux mains)	take_out_part_2_r, take_out_part_2_l
		Atteindre	stand_up_r, stand_up_l
		Marcher	walk_via
		Marcher	put_out_stand_point
		Déposer (à deux mains)	put_out_part_1_r, put_out_part_1_l
		Déposer (à deux mains)	put_out_part_2_r, put_out_part_2_l
		Atteindre	leave_part_r, leave_part_l
		Marcher	walk_back2
		Marcher	via_write
		Marcher	write_stand_point
		Atteindre	via_take_r, via_take_l
		Prendre	get_pen_r, get_pen_l
		Prendre	get_board_r
		Atteindre	move_up_r, move_up_l
		Atteindre	write
		Atteindre	write_r
		Déposer	place_pen_r, place_pen_l
		Déposer	place_board_r, place_board_l
	Marcher	start_end	

Tableau 7-3 : Les actions de la tâche "Tâche\_opérateur\_3"

- Situation A : La cellule est aménagée en respectant les standards ergonomiques (Figure 7.14), ce qui signifie qu'aucune dégradation de la performance n'est causée par le mauvais aménagement :
- 1) cas 1 : Opérateur 1 réalisant la tâche "Tâche\_opérateur\_1". La Figure 7.17 montre le taux de dépense énergétique par rapport aux actions réalisées (11 actions). A partir du temps de réalisation de chaque action (voir Annexe F), nous pouvons calculer la dépense énergétique totale pour accomplir une seule tâche (elle est égale à 1.54 Kcal pour notre opérateur). La durée totale de cette tâche est de 13.14 s, ce qui signifie que l'opérateur devrait réaliser 2191 tâches pendant un jour de travail. Donc la dépense énergétique pour un jour est de 3375 kcal.

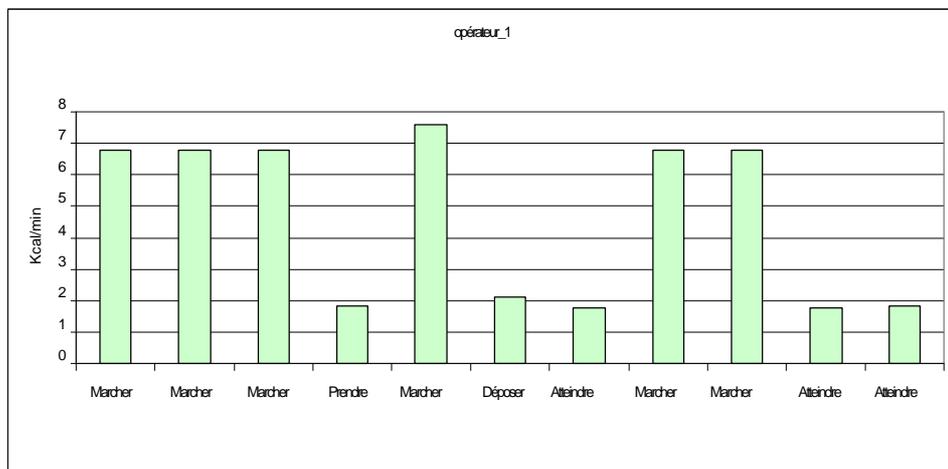


Figure 7.17 : Le taux de dépense énergétique par l'opérateur 1 pour la tâche\_1

- 2) Cas 2 : Opérateur 2 réalisant la tâche "Tâche\_opérateur\_1". La Figure 7.18 montre le taux de dépense énergétique correspondant aux actions réalisées (11 actions). De même, nous trouvons que l'opérateur\_2 dépense par tâche 1.77 kcal, ce qui signifie qu'il dépense 3878 kcal pour réaliser les 2191 tâches par jour (voir Annexe F).

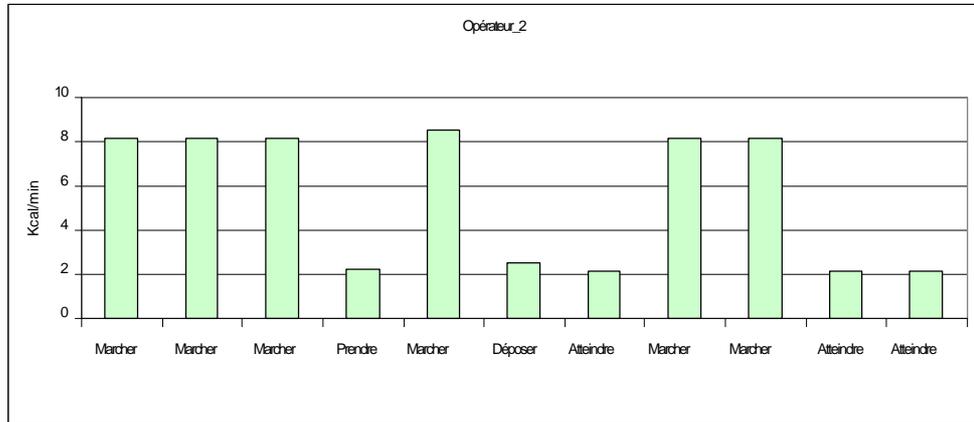


Figure 7.18 : Le taux de dépense énergétique par l'opérateur 2

**Discussion** : une comparaison entre les deux cas montre (voir Figure 7.19) que l'opérateur 2 dépense plus d'énergie pour réaliser la tâche et par conséquent son travail journalier que l'opérateur 1. Ceci aura un impact sur la performance, car l'opérateur qui dépense plus d'énergie pour réaliser un travail risque de se fatiguer plus que celui qui dépense moins pour le même travail. Cette chute de performance influence la coopération homme-machine négativement. Donc, l'optimisation des caractéristiques physiques des opérateurs aura une forte influence sur l'optimisation de la coopération.

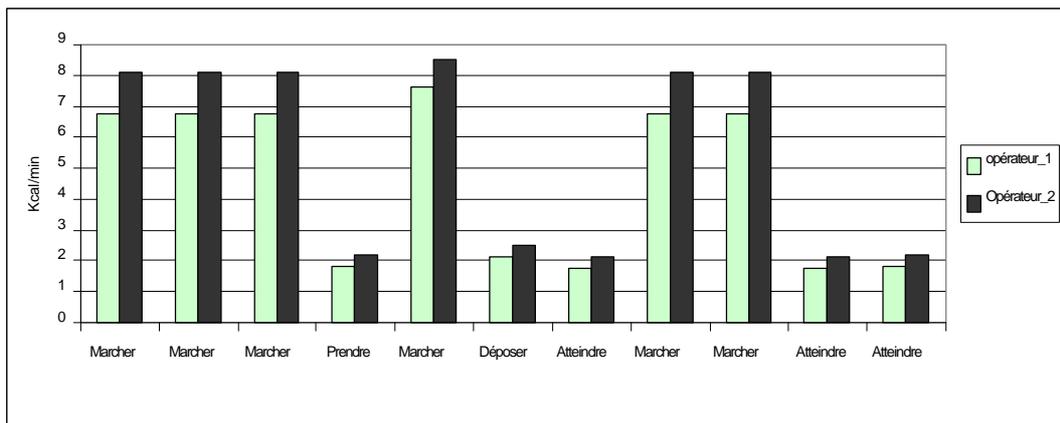


Figure 7.19 : Comparaison des taux de dépenses énergétiques par les deux opérateurs

- Situation B : nous modifions l'aménagement de l'espace de travail dans la cellule pour vérifier l'impact sur l'énergie dépensée. Pour ceci et à l'encontre des exigences ergonomiques, nous baissions la hauteur de la table où se trouve l'objet à transporter (voir Figure 7.20). Cette modification va se refléter sur la réalisation des actions correspondantes en modifiant l'énergie nécessaire pour leur accomplissement.

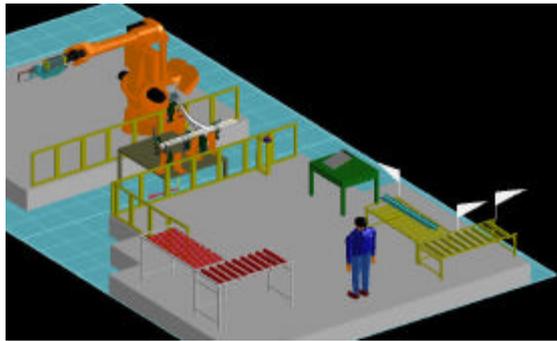


Figure 7.20 : La cellule après les modifications signalées par les drapeaux blancs

- Discussion :** La Figure 7.21 montre le taux de dépense énergétique pour réaliser les 11 actions de la tâche "Tâche\_opérateur\_1" par l'opérateur 1 avant et après la modification de la cellule. Par une simple comparaison, on peut constater que le taux de dépense énergétique pour trois actions (concernées par la modification) a augmenté. Donc l'opérateur dépense plus d'énergie pour compenser la mauvaise conception de l'espace de travail, ce qui mène à une baisse de sa performance, et en conséquence à mettre en cause la coopération visée.

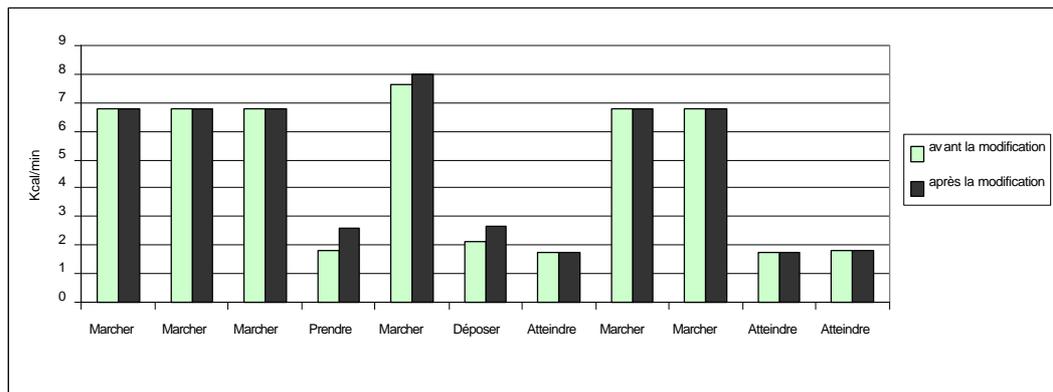


Figure 7.21 : Comparaison des taux de dépense énergétique avant et après les modifications de design de la cellule

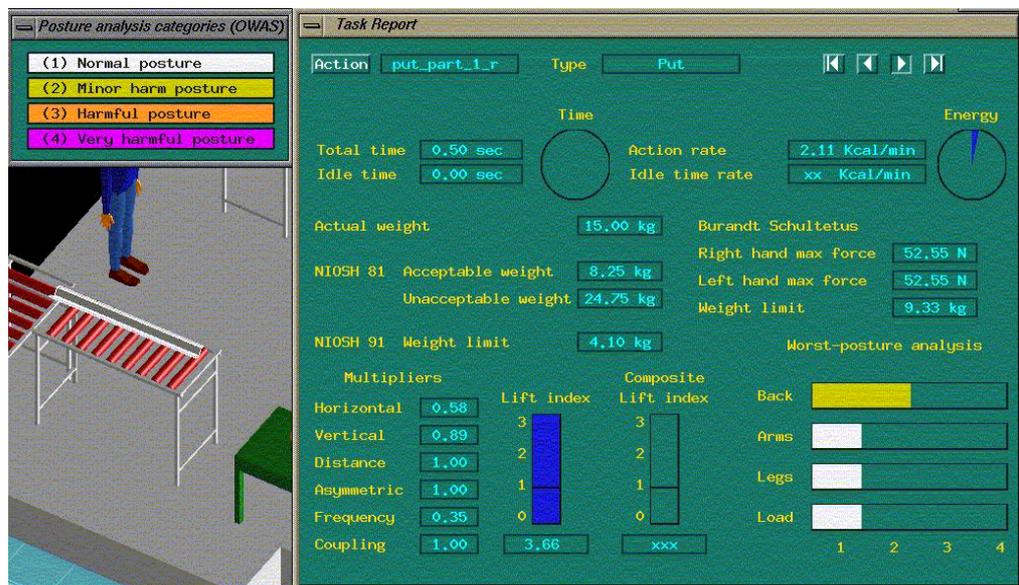


Figure 7.22 : L'interface Robcad/Man : analyse ergonomique

La modification de la conception ergonomique de l'espace de travail influence non seulement le taux de dépense énergétique (comme nous l'avons montré), mais aussi les autres indices ergonomiques (NIOSH, BURANDT SCHULTETUS, OWAS). L'interface montrée sur la Figure 7.22 représente l'analyse ergonomique de la réalisation de l'action "déposer" (put\_part\_1\_r). L'analyse donne tous les détails concernant la réalisation de l'action, en particulier on constate le temps de réalisation (MTM), la dépense énergétique (GARG), l'indice de soulèvement et l'impact sur le dos de l'opérateur (NIOSH), la force appliquée sur les mains de l'opérateur (BURNDT SCHULTETUS) et aussi l'analyse posturale (OWAS). Cette analyse sert à corriger les défauts de la conception du poste de travail par rapport à l'action considérée.

Statistical Posture Analysis			
*****			
Body Region	Percentage	Category	
Back			
Straight	95.83	1	
Forward	4.17	1	
Twisted	0.00	1	
Bent & twisted	0.00	1	
Arms			
Both arms below shoulder level	100.00	1	
One arm at or above shoulder level	0.00	1	
Both arms at or above shoulder level	0.00	1	
Legs			
Sitting	0.00	1	
Standing with both legs straight	20.83	1	
Standing with one leg straight	0.00	1	
Standing with both legs bent	0.00	1	
Standing with one leg bent	0.00	1	
Kneeling on one or both knees	0.00	1	
Walking	79.17	2	
Head			
Free	83.33	1	
Bent forward	12.50	1	
Bent sideways	0.00	1	
Bent backward	0.00	1	
Turned to the side	4.17	1	
Action Category 1-The work posture is normal.			
Action Category 2-The work posture may have some harmful effects.			
Action Category 3-The work posture has a harmful effect.			
Action Category 4-The work posture has a very harmful effect.			

**Tableau 7-4 : L'analyse posturale pour le premier opérateur (vue de ROBCAD/MAN)**

Enfin, il faut noter que cette analyse (l'interface présenté ci dessus) représente une fonctionnalité d'un environnement plus global qui permet l'étude ergonomique du poste de travail ROBCAD/MAN. A l'aide de ce logiciel, on peut pousser l'analyse ergonomique dans une direction souhaitée. Par exemple le Tableau 7-4 donne l'analyse posturale détaillée pour le premier opérateur.

### 7.3. Conclusion

Ce chapitre a présenté les étapes majeures de conception d'une application de supervision réalisée dans le cadre du projet "Rester Propre". Dans ce contexte une architecture logicielle a été proposée en développant deux aspects que nous avons appelés supervision globale et supervision locale. Ensuite, une description MAD et UAN de l'application a été détaillée en soulignant le principe adopté de la coopération homme-machine.

Le deuxième volet de ce chapitre a été consacré à l'étude quantitative du niveau d'exécution dans la cellule de désassemblage. Pour cela, une cellule virtuelle de travail a été programmée, ce qui a permis de simuler les tâches opérateur-robot. Ces simulations ont montré qu'une conception ergonomique adéquate de l'espace de travail a un impact positif sur la performance du système homme-machine et par conséquent l'optimisation de la coopération dans ces systèmes dépend proportionnellement de l'optimisation de la conception ergonomique de l'espace de travail.

C ONCLUSION ET PERSPECTIVES

C

## 8. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Partant de l'idée qu'un système socio-technique peut être organisé en deux niveaux, système de contrôle/commande et système d'exécution, et du fait que sa bonne conception s'appuie sur une définition précise de la place et du rôle de chaque acteur (homme et machine), nous avons proposé une méthodologie générale de conception. Cette méthodologie se décline selon les points suivants :

- Analyse du système de contrôle et du système contrôlé : il s'agit de déterminer les actions à effectuer, en analysant les deux contextes de fonctionnement : normal et anormal. Cette phase devient plus compliquée si le système n'existe pas encore, car l'analyse est plus hypothétique.
- Analyse des actions : il s'agit de définir les actions réalisables par l'homme et par la machine pour déduire les besoins d'assistance de l'homme. L'analyse est principalement basée sur les caractéristiques de l'homme et ses limites et sur les caractéristiques techniques de la machine.
- Définition des outils d'assistance ou des outils d'automatisation : il s'agit de déterminer l'outil adéquat pour chaque action. Ceci nous conduit à trois types de conceptions : conception ergonomique du poste de travail, conception de l'interface homme-machine et conception technique. Si les actions humaines avaient des caractères montrant la non nécessité d'assistance pour leur réalisation, la conception serait purement ergonomique. Si par contre la réalisation de ces actions nécessitait une assistance de la part de la machine, la conception serait orientée vers une spécification de l'interface homme-machine. Enfin, la conception technique vise les actions complètement automatisables. Chaque type de conception correspond à un type d'activité : activité de l'homme, activité homme-machine et activité de la machine.
- Ces activités forment les tâches homme-machine qui coexistent avec les tâches purement humaines ou purement automatiques. Ces tâches constituent soit le niveau d'exécution, soit le niveau de supervision. Ces niveaux seront implantés, soit directement sur un site réel, soit préalablement sur un site simulé pour valider le système homme-machine proposé.

Dans le contexte de cette méthodologie, nous avons proposé une approche de spécification des actions pour trier les actions identifiées au sein du système en trois catégories : actions de l'homme, actions de la machine et actions homme-machine. Cette approche est fondée sur un calcul approximatif des attributs des actions, qui dépendent des critères considérés et du modèle de l'homme et de la machine. Pour la mise en œuvre de cette approche, nous avons proposé un ensemble de critères dits ergonomiques et techniques.

A partir de cette spécification, nous avons défini la coopération homme-machine qui devrait exister pour améliorer la performance du système. Nous avons donc considéré que le travail coopératif entre l'homme et la machine est une forme de mise en commun coordonnée de la réalisation des actions élémentaires. En conséquence, la "partageabilité" de la réalisation des tâches se limite, dans ce sens, à une forme d'aide à la réalisation d'actions élémentaires. Nous avons ensuite élargi la notion de partage statique de la réalisation d'actions en introduisant le partage dynamique. Nous avons souligné deux types de partages dynamiques : partage temps réel, qui se base sur les mesures des indices en provenance des acteurs et le partage au démarrage du système, qui se base essentiellement sur la disponibilité des acteurs. Développer, approfondir et surtout mettre en œuvre ces deux aspects de partage dynamique, constitue une perspective de notre travail.

La mise en place de la méthodologie proposée nous a amené à développer une application DISSOFT pour la supervision (système de contrôle / commande) d'un système de désassemblage. L'application avait pour objectif d'aider le superviseur dans le processus de sélection des meilleures séquences de désassemblage (optimales du point de vue économique), et de faciliter la tâche de surveillance et de conduite de la partie opératoire du système. Deux architectures de supervision étaient à la base de cette application : l'une représente la supervision globale, l'autre la supervision locale. L'implémentation de cette application a été faite en considérant le mode de coopération dite verticale en se basant sur le principe de partage de la réalisation des actions (partage défini préalablement).

L'application de cette méthodologie au niveau "système d'exécution" a été argumentée par l'étude quantitative du niveau d'exécution dans la cellule de désassemblage. Pour cela, nous avons utilisé l'environnement Robcad/Man pour mettre en place une cellule virtuelle de travail et pour réaliser l'analyse ergonomique en nous servant de la bibliothèque des standards ergonomiques. Nous nous sommes limités à utiliser un seul standard d'évaluation qui concerne la dépense énergétique pour la réalisation des actions. Ainsi, nous avons basé notre étude sur l'estimation de l'énergie dépensée par l'opérateur pour la réalisation d'une action donnée. Les simulations des tâches opérateur-robot ont montré que la dépense énergétique (et aussi d'autres indices ergonomiques : NIOSH, BURANDT SCHULTETUS, OWAS que nous n'avons pas considéré) dépend des caractéristiques physiques de l'homme et de l'aménagement ergonomique de l'espace de travail. Nous avons conclu qu'une conception ergonomique adéquate de l'espace de travail a un impact positif sur la performance du système homme-machine ; par conséquent, l'optimisation de la coopération homme-machine dans ces systèmes dépend proportionnellement de l'optimisation de la conception ergonomique de l'espace de travail.

Enfin, il faut souligner que la principale difficulté de notre travail a résidé dans la recherche d'un compromis adéquat entre la mise en œuvre d'un système novateur de désassemblage (que l'on souhaite automatiser) et son étude du point de vue des systèmes homme-machine. Nous estimons que par le présent travail ce compromis a été trouvé, mais il doit être complété et enrichi. Dans ce sens, compléter et renforcer la méthode de spécification des actions

constitue une perspective essentielle. Car, comme nous l'avons signalé, cette méthode est approximative. Ainsi, rendre cette méthode plus sûre va considérablement enrichir ce travail. Aussi, le fait que l'utilisation de cette méthode exige un modèle humain plus significatif (mental et physique) demande une amélioration du modèle de référence pour l'opérateur humain. Dans le même cadre, il faudra compléter et ajuster la liste des critères ergonomiques et techniques proposés dans ce mémoire.

En ce qui concerne l'application DISSOF, la mise en œuvre du module de contrôle de l'écran pour l'application du partage dynamique constituera le travail de la prochaine étape.

Nous avons étudié la conception et la mise en œuvre de la coopération dans des systèmes homme-machine qui se composent d'un homme et d'une machine. Cette limitation s'impose pour la mise en œuvre pratique de tels systèmes. Il faudra donc envisager l'étude et l'évaluation qualitative de la collectivité (hommes, machines) dans ce type de système.

## 9. BIBLIOGRAPHIE

- Aptel M., Dronsart P.(1995). Charge maximale admissible de lever de charges : l'équation révisée du NIOSH. Documents pour le médecin de travail, N° 62, 2° trimestre, INRS, 1995.
- Berger T. (1992). Contribution à l'étude de l'activité cognitive de l'opérateur et à l'évaluation de sa charge de travail. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, France.
- Binder Z., Chevron D., Horacek P., Schmidt J., Tritsch Ch. (1995). Robot System for the Automated Disassembly of Technical Consumer Goods. Proceeding of the IAR Annual Meeting. Karlsruhe (Germany), 1995.
- David B. (2001) IHM pour les collecticiels. RSR-CP-13/2001. Les télé-applications, page 169 à 206.
- Chevron D. (1999). Contribution à l'étude de la supervision d'une cellule de démontage de produit technique en fin de vie. Thèse de doctorat, INPG, LAG. Grenoble, France.
- Chevron D., Gerner S., Skaf A., Binder Z., Descotes-Genon B., David B., Dubois M. (1999). Disassembly System Modelling, Supervision and Control. 14th World Congress of International Federation of Automatic Control (IFAC), 5-9 July. Pekin, China.
- Duthoit P. (1997). La supervision : l'art de maîtriser les processus, dans : *REE revue de l'électricité et de l'électronique*, N°7, Juillet 1997, p22.
- De Keyser V. (1988). De la contingence à la complexité : l'évolution des idées dans l'étude des processus continus. *Le travail humain*, V51, N°1.
- Entin E.E. et Serfaty D.(1990). Information gathering and decisionmaking under stress, Technical rept. NP 83, Proj RM33M20. Alphatech, Burlington.
- Ferber J. (1997). Les systèmes multi-agents vers une intelligence collective. InterEditions, Paris, France.
- Garg A. (1989). Epidemiological basis for manual lifting guidelines. National Institute for Occupational Safety and Health, Springfield, Va., NTIS (Reprod.), 58 s. , PB 91-227 348).
- Garg A., Moore J. Steven (1992). Ergonomics : low-back pain, carpal tunnel syndrome, and upper extremity disorders in the workplace. Philadelphia, Hanley & Belfus, S. 593-790 ; (Occupational medicine : state of the art reviews 7(1992):4) ; ISBN 1-56053-095-2 ; ISSN 0885-114X.
- Girus (1996). Les produits électriques et électroniques non portables en fin de vie en région Rhône-Alpes, Rapport final provisoire, Girus - Geode Environnement - CNRS, Décembre 1996.

- Grosjean V. (1999). Assistance à la conduite dans les situations dynamiques: influence de la construction d'une perspective temporelle sur la performance experte. Thèse de doctorat, Université de Liège, Faculté de Psychologie et des Sciences de l'Éducation. France.
- Hartson H.R., Siochi A.C. et Hix D. (1990). The UAN : A user-oriented representation for direct manipulation interface design. *ACM Transactions on Information Systems*, vol. 8, n° 3, p. 181-203.
- Harzallah M., Vernadat.F.(2000).Validation of modelling constructs for the organisational aspects in CIMOSA. 2nd Conference on Management and Control of Production and Logistics (MCPL). MCPL' 2000 5-8 juillet, Grenoble, France.
- Hoc I. M. (1996). *Supervision et contrôle de processus : la cognition en situation dynamique*. Presses universitaires de Grenoble, Grenoble, France.
- Johannsen G. (1986). Architecture of man-machine decision making systems. In E.Hollange, G. Mancini, and D.D. Woode(Eds.), *Intelligent decision support in process environment*. Nato series ASI, Vol F21. Springer Verlag, Berlin.
- Kab I. Kim (1998). Human-robot coordination with rotational motion. in :*Proceedings of the 1998 IEEE, International Conference on Robotics and Automation*. Leuven, Belgium.
- Kolski C. (1997). Interfaces homme-machine : application aux systèmes industriels complexes. Editions Hermès, Paris, France.
- Larvet P. (1994). *Analyse des systèmes : de l'approche fonctionnelle à l'approche objet*. InterEditions, Paris, France.
- Leplat J. (1993). L'analyse psychologique du travail, In: J. Leplat et al. (1993): *L'analyse du travail en psychologie ergonomique*. Tome 1, Octarès éditions pp23-25.
- Leroux P. (1995). Conception et réalisation d'un système coopératif d'apprentissage. Etude d'une double coopération : maître/ordinateur et ordinateur/groupe d'apprenants. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie Paris VI. France
- Jambon F. (1996). *Erreurs et interruptions du point de vue de l'ingénierie de l'interaction homme-machine*. Thèse de doctorat de l'université Joseph FOURIER - Grenoble I, France.
- Millot P. (1988). *Supervision des procédés automatisés et ergonomies*. Editions Hermès, Paris, France.
- Millot, P. (1996). De la surveillance à la supervision : l'intégration des opérateurs humains , Ecole d'été, Grenoble, France.

- Ning Xi (1998). Heterogeneous function-based human/robot cooperation in :*Proceedings of the 1998 IEEE, International Conference on Robotics and Automation*. Leuven, Belgium.
- Meinadier J.P. (1998). *Ingénierie et intégration des systèmes*. Edition Hermès, Paris, France.
- Rasmussen J. (1983). Skills, rules, and knowledge ; Signals, signs, and symbols and other distinction in Human Performance Models. In : *IEEE transactions on systems man and cybernetics* Vol. SMC-13, N°3, May/June 1983, p 257.
- Rester Propre (1997a). REcherches Socio-TEchniques pour le Recyclage de PROduits manufactures Par REvalorisation. Proposition de projet soumise à la Région Rhône-Alpes, Laboratoire d'Automatique de Grenoble, Mars 1997.
- Rester Propre (1997b). REcherches Socio-TEchniques pour le Recyclage de PROduits manufactures Par REvalorisation. Programme de projet de l'Année I, Laboratoire d'Automatique de Grenoble, Décembre 1997.
- Rester Propre (1998). REcherches Socio-TEchniques pour le Recyclage de PROduits manufactures Par REvalorisation. Rapport de l'Année I, Laboratoire d'Automatique de Grenoble, Avril 1998.
- Rester Propre (1999). REcherches Socio-TEchniques pour le Recyclage de PROduits manufactures Par REvalorisation. Rapport de l'Année II, Laboratoire d'Automatique de Grenoble, Avril 1999.
- Rester Propre (2000). REcherches Socio-TEchniques pour le Recyclage de PROduits manufactures Par REvalorisation. Rapport de l'Année III, Laboratoire d'Automatique de Grenoble, Septembre 2000.
- Rester Propre-International (2000). REcherches Socio-TEchniques pour le Recyclage de PROduits manufactures Par Revalorisation International. Rapport 99/00, Laboratoire d'Automatique de Grenoble, Septembre 2000.
- Robcad/Man (1998). For designing human operations in manufacturing workcelles, manuelle d'utilisation version 3.7.1. octobre 1998.
- Sanatochi M. and G. Dini (1992). Computer-Aided Planning of assembly operation: the selection of assembly sequences. *Robotics & Computr-Integrated Manufacturing*. Vol.9, N° 6, pp.439-446.
- Rouse W.B. and Rouse S.H. (1983). A framework for research on adaptive decision aids (tech. Report AFAMRL-TR-83-082). Armstrong Aerospace Medical Research Laboratory, OH, Wright-Patterson Air Force Base.
- Satnon N. (1995). Ecological ergonomie :understanding human action in cotext. *Proceedings of the Annual Conference of the Ergonomcs Society, contemporary ergonomics*, Canterbury, England.

- Scapin D.L. et Pierret-Golbreich C. (1989). MAD : Une méthode analytique de description des tâches. Colloque sur l'ingénierie des Interfaces Homme-Machine (IHM'89), Sophia-Antipolis, France, Mai 1989. p. 131-148.
- Sebilotte S. (1991). Décrire des tâches selon les objectifs des opérateurs : De l'interview à la formalisation. Le Travail humain, Paris, France : Presses Universitaires de France.
- Sheridan T. B. (1988). Human and computers roles in supervisory control and telerobotics: musing about function, language and hierarchy. In L.P.Goodstein, H.B. Andersen, and S.E. Olsen, (Eds.) *Task, errors and mental models*. Taylor&Francis. London. UK.
- Skaf A., David B., Descotes-Genon B., Binder Z. (1999). Analyse des activités dans un système homme-machine de désassemblage. Journées Doctorales d'Automatique, Nancy, 21-23 septembre, France.
- Skaf A., Tian H., Descotes-Genon B., David B., Binder Z. (1999a). Activities in man-machine disassembling systems. Proceedings of International Conference on Human Centered Processes (HCP'99), Brest, September 22-24, pp. 195-201, France.
- Skaf A., Gerner S., David B., Binder Z., Descotes-Genon B., (1999b). Disassembly process planning. IAR99, 18 - 19 November, Strasbourg, France.
- Skaf A., Tian H., Descotes-Genon B., David B., Binder Z., Dubois M. (1999c). Disassembling of end-of-life products and man-machine systems. Proceedings of the 2nd World Manufacturing Congress (WMC'99) (ISBN 3-906454-19-3), International Symposium on Manufacturing Systems (ISMS'99), September 27-30, pp. 700-706, Durham, UK.
- Skaf A., David B., Descotes-Genon B., Binder Z., Gerner S., Kobeissi A. (2000a). Supervision and control in Man-Machine System : the case of disassembling system. 7th IFAC Symposium on Automated Systems Based on Human Skill-Joint Design of Technology and Organisation, June 15-17, Aachen, Germany.
- Skaf A., Kwiatkowski K. (2000b). Decision Making System for disassembling process. Rapport de fin de stage, Août , Laboratoire d'Automatique de Grenoble, France.
- Skaf A., Gerner S., David B., Descotes-Genon B., Binder Z. (2000c). Qualitative study of Man-Machine Co-operation in work cell. 2nd Conference on Management and Control of Production and Logistics (MCPL). MCPL' 2000 5-8 juillet, Grenoble, France.
- Skaf A., David B., Descotes-Genon B., Binder Z. (2000d). Ergonomic and technical specification of action in Man Machine System. Accepté à Europe Chapter of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Conference Human-System Interaction: Education, Research and Application in the 21st Century. November 1-3, Maastricht, Netherlands.

- Skaf A. Pavliska A. (2000c). Computer- Aided application for disassembling system. Rapport du stage, juin, Laboratoire d'Automatique de Grenoble, France.
- Skaf A., David B., Descotes-Genon B., Binder Z. (2001). Supervision and control in Man-Machine System : Supervisory architecture and decision-making. International NAISO Congress on Information Science Innovations ISI'2001, March17-21, American University of Dubai U.A.E.
- Sperandio J.C. (1972). Charge de travail et variation des modes opératoire, Thèse de docteur ès sciences, Université de Paris V, Paris, France.
- Stammers R.B., Carey M. S. et Astley J.A. (1990). Task analysis. In Wilson J.R. & Corlett E.N. (Eds), Evaluation of Human Work- a practical ergonomics methodology. Taylor & Francis.
- Vernadat F. (2000). Enterprise Modelling and Integration: Current status and research perspectives. 2nd Conference on Management and Control of Production and Logistics (MCPL). MCPL' 2000 5-8 juillet, Grenoble, France.
- Wiener E.L.(1995). Eurisco Industrial summer School on Human Centred Automation, Saint-Lary, France.
- Zamaï E. (1997). Architecture de Surveillance-Commande pour les Systèmes à Evénements Discrets Complexes. Thèse de doctorat, Université de Paul Sabatier de Toulouse, France.

Annexes

---

## Fiche de procédure manuelle

Suite à des entretiens verbaux avec des experts, l'analyse a permis de décomposer une activité très générale en sous-procédures. L'exemple suivant traite du démontage manuel du compresseur d'un réfrigérateur, en supposant qu'il soit accessible.

- But général : Démontage du réfrigérateur

- sous-but 1: démonter le compresseur
- sous-but 1.1: mettre le frigo en place et se placer à l'arrière
- sous-but 1.2: effectuer la dépollution du compresseur
  - sous-but 1.2.1: prendre la station de dépollution
  - sous-but 1.2.2: pincer un tuyau tendre
  - sous-but 1.2.3: faire la dépollution et arrêter la station
- sous-but 1.3: enlever le compresseur
  - sous-but 1.3.1: prendre les outils nécessaires (pince, clé de 10, pince coupante)
  - sous-but 1.3.2: défaire le compresseur de ses liens
    - sous-but 1.3.2.1: faire sauter les crans avec la pince ou dévisser les écrous avec la clé de 10 (selon les cas)
    - sous-but 1.3.2.2: couper les fils et les tuyaux avec la pince coupante
  - sous-but 1.3.3: extraire le compresseur de son habitacle

- sous-but 1.3.3.1: le soulever
  - sous-but 1.3.3.2: le tirer en gardant le compresseur droit
- sous-but 1.4: stocker le compresseur en position debout pour qu'il ne se vide pas

Une décomposition de la tâche démonter le compresseur est établie en catégories d'actions. Une grille d'observation et de questionnement a été établie pour approfondir les actions et les ressources nécessaires à l'accomplissement de l'objectif général. Dans notre cas, sept champs ont été définis. En reprenant le sous-but 1 précédent, la grille obtenue est:

**Nom du composant récupéré :** Compresseur

- Contrôle :** Vérifier que la récupération du CFC (chlorofluorocarbure) a été faite sinon, il risque d'y avoir des fuites de gaz ou d'huile.
- Problèmes :** Cas d'échappement de gaz ou d'huile.  
Lors de la libération du compresseur, ne pas couper les tuyaux trop court sinon la réutilisation n'est plus possible.  
Les extrémités des tuyaux coupés sont tranchants.
- Procédure :** Couper le tuyau qui va à la grille arrière (radiateur ou condensateur).  
Couper le second tuyau.  
Couper le petit tuyau (capillaire).  
Couper les fils venant de la cuve.  
Dévisser les vis du châssis.  
Dégager le compresseur de son logement et le poser bien droit.
- Outils :** Pince coupante.  
Clés de 10 et de 13.  
Pince plate (pour les clips).  
Mains.
- Raisons :** Récupération du CFC : Contrainte législative et écologique.  
Récupération du compresseur : pour le stock.
- Remarques :** Attention ne pas couper le second tuyau à plus de 15 cm si on veut récupérer l'évaporateur dans la suite du démontage (dans ce cas, il faut couper le tuyau à ras du compresseur).  
Déposer le compresseur bien droit.  
Le cordon d'alimentation ne gêne pas le démontage.

---

 spécifications des actions de la cellule considérée

Nous avons identifié (chapitre cinq) pour le niveau de supervision (globale et locale) sept actions suffisantes pour réaliser toutes les tâches de supervision : **calculer, diagnostiquer, décider, suivre, capter, commander** et **enseigner**. Les acteurs de ces actions sont le calculateur (SIAD) et le superviseur. Pour le niveau d'exécution six actions étaient identifiées : **fixer, tourner, intervenir, dévisser, découper** et **extraire**. Elles sont réalisables par le robot et l'opérateur.

Dans le tableau suivant nous exposons les résultats de spécifications de ces actions. Nous soulignons le fait que nous avons considéré l'influence du critère « coût » égale à zéro, ce qui signifie que toutes les actions sont automatisables du point de vue économique.

Pour trouver les valeurs de  $x$  et  $y$  (se trouvant dans les deux dernières colonnes à droite) nous avons utilisé les formules (5) et (10) exposées dans le chapitre 6 :

$$x = x_0 \left( 1 - \min \left( 1, \frac{1}{\sum_{i=A}^{i=N} g_i} \right) \right)$$

$$y = y_0 \left( 1 - \min \left( 1, \frac{1}{\sum_{i=a}^{i=n} z_i} \right) \right)$$

<b>Action</b>	<b>Critères ergonomiques</b>				<b>Critères techniques</b>			
	Charge de travail	sécurité	fiabilité		Faisabilité	coût	x	y
<b>calculer</b>	0.9	0.0	0.7		0.0	0.0	0.0	1.0
<b>diagnostiquer</b>	0.2	0.0	0.3		0.5	0.0	0.5	0.5
<b>décider</b>	0.2	0.0	0.3		0.5	0.0	0.5	0.5
<b>suivre</b>	0.2	0.0	0.3		0.5	0.0	0.5	0.5
<b>capter</b>	0.8	0.2	0.7		0.0	0.0	0.0	1.0
<b>commander</b>	0.6	0.2	0.7		0.0	0.0	0.0	1.0
<b>enseigner</b>	0.2	0.0	0.3		0.0	0.0	0.5	1.0
<b>fixer</b>	0.2	0.2	0.5		0.0	0.0	0.1	1.0
<b>tourner</b>	0.2	0.2	0.5		0.0	0.0	0.1	1.0
<b>intervenir</b>	0.1	0.2	0.1		1.0	0.0	0.6	0.0
<b>dévisser</b>	0.2	0.2	0.3		0.0	0.0	0.3	1.0
<b>découper</b>	0.2	0.2	0.3		0.0	0.0	0.3	1.0
<b>extraire</b>	0.1	0.2	0.1		1.0	0.0	0.6	0.0

---

## Définition des activités

Dans cette annexe on représente l'ensemble des activités exhaustives (fictives et effectives) exercées dans la cellule de désassemblage considérée. Le premier tableau représente la liste exhaustive des activités de la supervision en considérant les actions partageables (réalisables par deux acteurs). Le deuxième tableau représente la liste exhaustive des activités de la supervision en considérant les actions non-partageables. Le troisième tableau montre la liste exhaustive des activités de l'exécution. Par "x" dans la dernière colonne on dénote que l'activité est fictive, et par "ok" on dénote que l'activité est effective.

**Annexe C-1** : liste exhaustive des activités de la supervision (actions partageables)

N°	ordinateur	superviseur	diagnostiquer	décider	suivre	renseigner	
0	0	0	0	0	0	0	x
1	1	0	0	0	0	0	x
2	0	1	0	0	0	0	x
3	1	1	0	0	0	0	ok
4	0	0	1	0	0	0	x
5	1	0	1	0	0	0	x
6	0	1	1	0	0	0	x
7	1	1	1	0	0	0	ok
8	0	0	0	1	0	0	x
9	1	0	0	1	0	0	x
10	0	1	0	1	0	0	x
11	1	1	0	1	0	0	ok
12	0	0	1	1	0	0	x
13	1	0	1	1	0	0	x
14	0	1	1	1	0	0	x
15	1	1	1	1	0	0	ok
16	0	0	0	0	1	0	x

17	1	0	0	0	1	0	x
18	0	1	0	0	1	0	x
19	1	1	0	0	1	0	ok
20	0	0	1	0	1	0	x
21	1	0	1	0	1	0	x
22	0	1	1	0	1	0	x
23	1	1	1	0	1	0	ok
24	0	0	0	1	1	0	x
25	1	0	0	1	1	0	x
26	0	1	0	1	1	0	x
27	1	1	0	1	1	0	ok
28	0	0	1	1	1	0	x
29	1	0	1	1	1	0	x
30	0	1	1	1	1	0	x
31	1	1	1	1	1	0	ok
32	0	0	0	0	0	1	x
33	1	0	0	0	0	1	x
34	0	1	0	0	0	1	x
35	1	1	0	0	0	1	ok
36	0	0	1	0	0	1	x
37	1	0	1	0	0	1	x
38	0	1	1	0	0	1	x
39	1	1	1	0	0	1	ok
40	0	0	0	1	0	1	x
41	1	0	0	1	0	1	x
42	0	1	0	1	0	1	x
43	1	1	0	1	0	1	ok
44	0	0	1	1	0	1	x
45	1	0	1	1	0	1	x
46	0	1	1	1	0	1	x
47	1	1	1	1	0	1	ok
48	0	0	0	0	1	1	x
49	1	0	0	0	1	1	x
50	0	1	0	0	1	1	x
51	1	1	0	0	1	1	ok
52	0	0	1	0	1	1	x
53	1	0	1	0	1	1	x
54	0	1	1	0	1	1	x
55	1	1	1	0	1	1	ok
56	0	0	0	1	1	1	x
57	1	0	0	1	1	1	x
58	0	1	0	1	1	1	x
59	1	1	0	1	1	1	ok
60	0	0	1	1	1	1	x
61	1	0	1	1	1	1	x
62	0	1	1	1	1	1	x
63	1	1	1	1	1	1	ok

**Annexe C-2:** liste exhaustive des activités de la supervision (actions non-partageables)

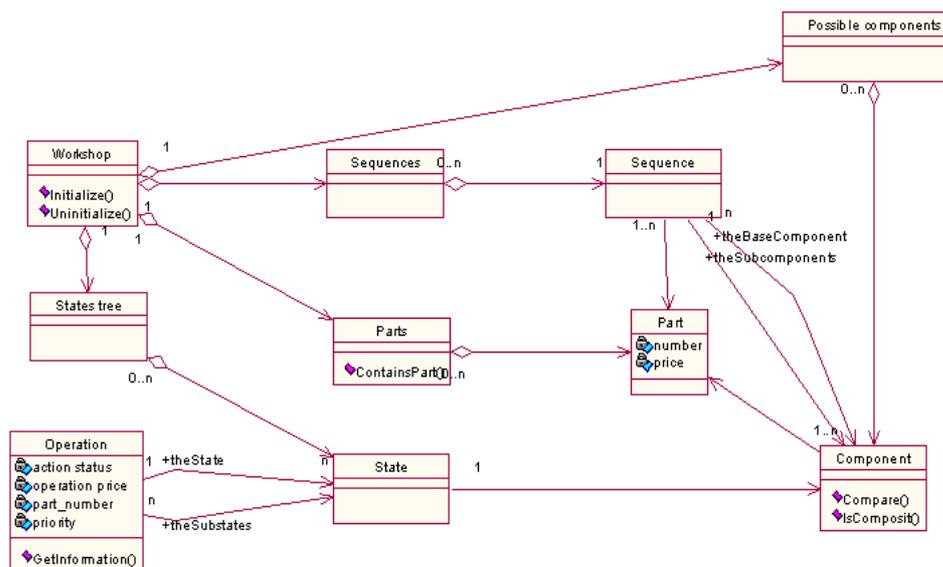
N°	ordinateur	préparer	capter	commander	
1	1	0	0	0	ok
3	1	1	0	0	ok
5	1	0	1	0	ok
7	1	1	1	0	x
9	1	0	0	1	ok
11	1	1	0	1	x
13	1	0	1	1	ok
15	1	1	1	1	x

**Annexe C-3:** liste exhaustive des activités de l'exécution

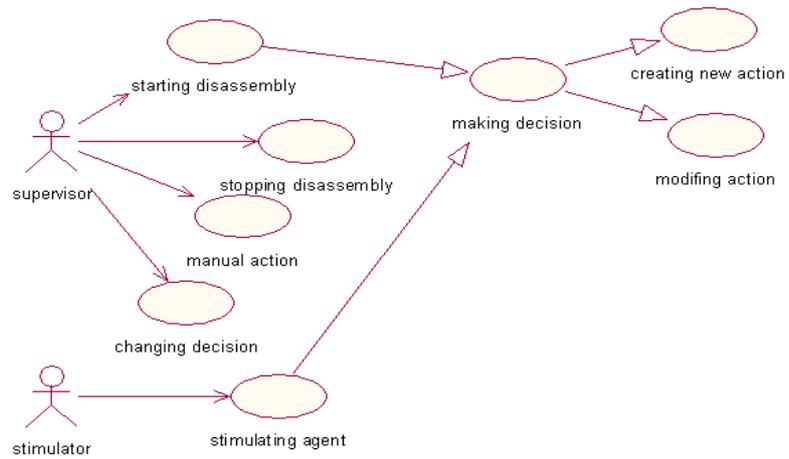
N°	robot	fixer	tourner	dévisser	découper	
1	1	0	0	0	0	ok
3	1	1	0	0	0	ok
5	1	0	1	0	0	x
7	1	1	1	0	0	ok
9	1	0	0	1	0	x
11	1	1	0	1	0	ok
13	1	0	1	1	0	x
15	1	1	1	1	0	ok
17	1	0	0	0	1	x
19	1	1	0	0	1	ok
21	1	0	1	0	1	x
23	1	1	1	0	1	ok
25	1	0	0	1	1	x
27	1	1	0	1	1	x
29	1	0	1	1	1	x
31	1	1	1	1	1	x

## Les diagrammes de UML de système multi-agents d'aide à la décision

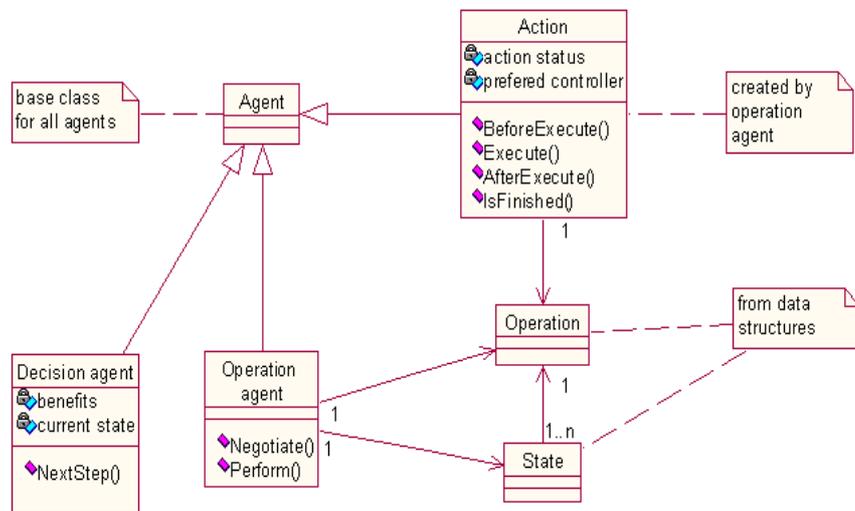
La modélisation du système multi-agent de prise de décision en employant le langage UML permet de visualiser et de manipuler les éléments de la modélisation de différents points de vue. Ci-après les différents diagrammes de modélisation sont présentés.



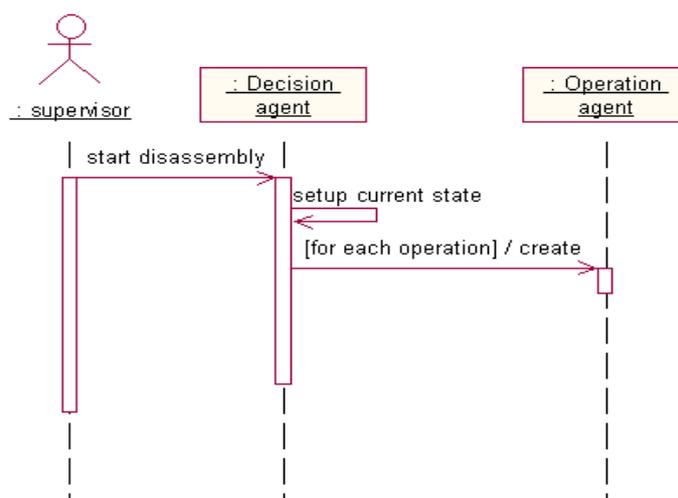
Class structure of the system's data structures



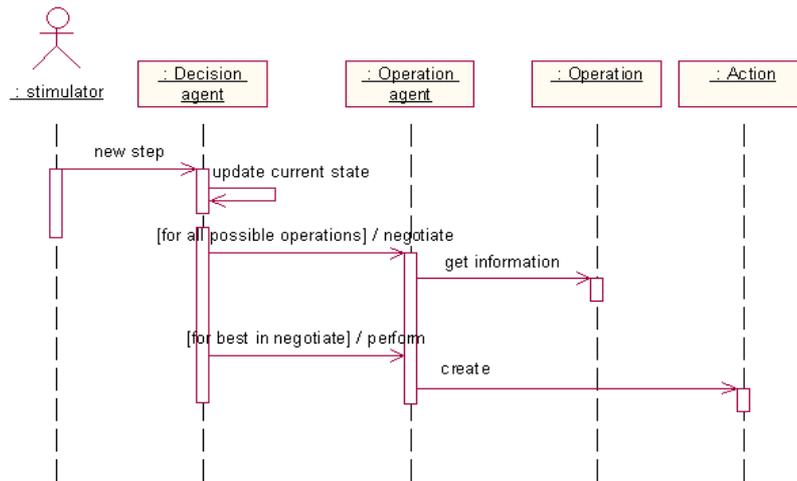
Use cases for decision making



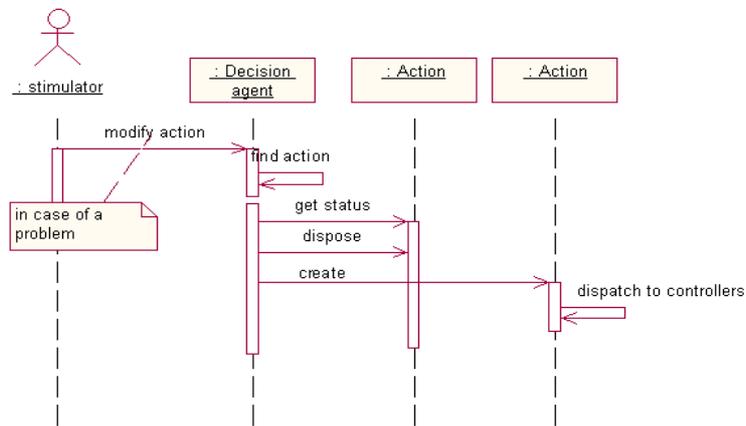
Class structure of decision making agents



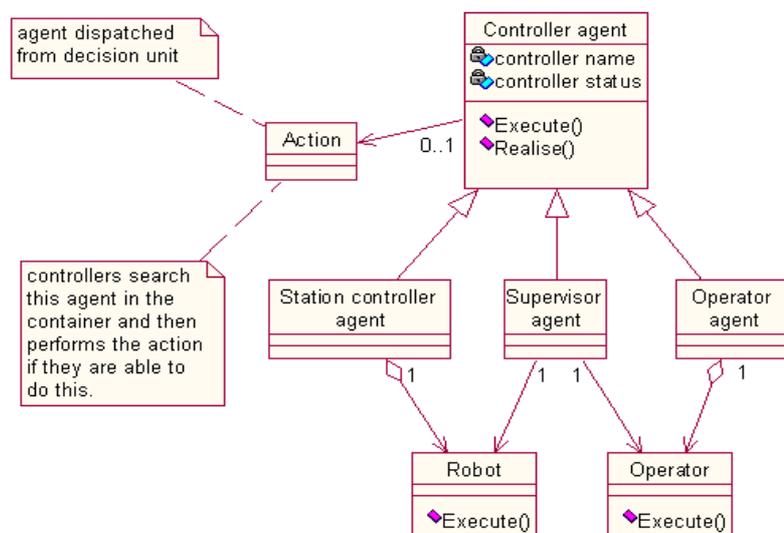
Sequences diagram for starting disassembly



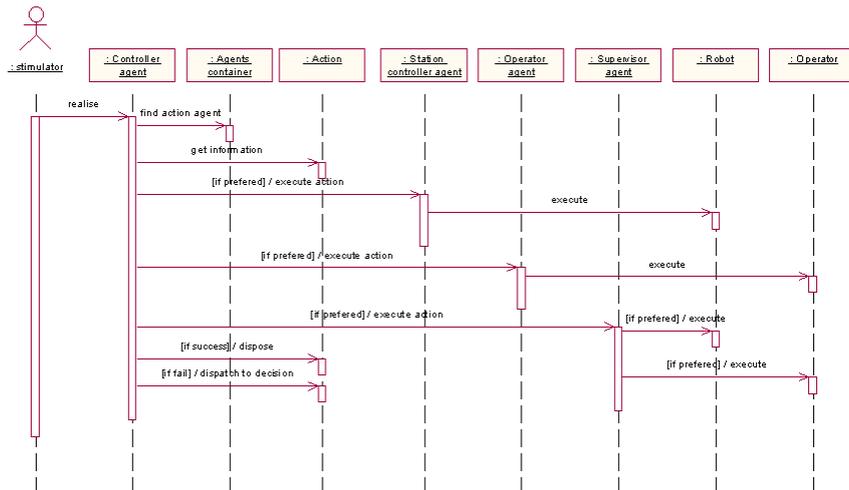
Sequences diagram for *new step*



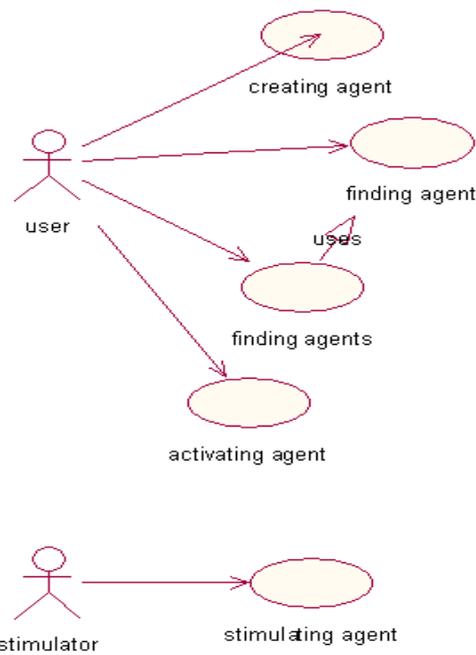
Sequences diagram for *modify action*



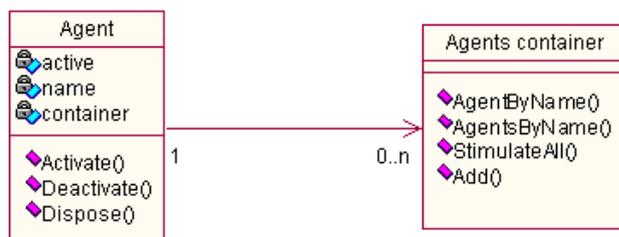
Class diagram of controllers



Sequences diagram of action execution



Use cases for agents environment



Class structure of agents environment

Annexe  
F

Rapports ergonomiques de réalisation des tâches

Dans le tableau suivant une description de la tâche "Tâche\_opérateur\_1" est exposée sous forme du rapport ergonomique (fournit par le logiciel Robcad/Man). La colonne de gauche contient le rapport de réalisation de cette tâche par le premier opérateur (celui âgé de 35 ans et qui pèse 70 kg). La colonne de droite contient le rapport de réalisation de la même tâche par le deuxième opérateur (celui âgé de 55 ans et qui pèse 85 kg).

La description de la tâche "Tâche_opérateur_1" réalisée par le premier opérateur.	La description de la tâche "Tâche_opérateur_1" réalisée par le deuxième opérateur.
<pre> ROBCAD/Man   Version3.7.1    Date7/2/2001            ERGONOMIC REPORT  Cell:                sop  #####       Human m50 #####  HumanParameters:    Weight                70.00Kg   Age                   35.00years   Conditioning          1.00           </pre>	<pre> ROBCAD/Man   Version3.7.1    Date7/2/2001            ERGONOMIC REPORT  Cell:                sop  #####       Human m50 #####  HumanParameters:    Weight                85.00Kg   Age                   55.00years   Conditioning          1.00           </pre>

Step size	Default	Step size	Default
##### Tasktask11 #####		##### Tasktask11 #####	
TaskParameters:		TaskParameters:	
Idle Time	0.00sec	Idle Time	0.00sec
Shift Time	8.00hours	Shift Time	8.00hours
Shift Difficulty	Middle	Shift Difficulty	Middle
Frequency	Default	Frequency	Default
##### Action start_end #####		##### Action start_end #####	
Action Type:		Action Type:	
Walk		Walk	
Location:		Location:	
start_end[296.1,5345.9,450.0,0.0,0.0,88.4]		start_end[296.1,5345.9,450.0,0.0,0.0,88.4]	
Time:		Time:	
Motion Time	0.00sec	Motion Time	0.00sec
Idle Time	0.00sec	Idle Time	0.00sec
Cycle Time	0.00sec	Cycle Time	0.00sec
Weight:		Weight:	
Actual Weight	0.00Kg	Actual Weight	0.00Kg
GARG Energy:		GARG Energy:	
Total energy rate	6.78Kcal/min	Total energy rate	8.12Kcal/min
General work energy rate	xxxKcal/min	General work energy rate	xxxKcal/min
##### Action raise_hands_stand_point #####		##### Action raise_hands_stand_point #####	
Action Type:		Action Type:	
Walk		Walk	
Location:		Location:	
raise_hands_[602.3,4292.2,450.0,0.0,0.0,176.6]		raise_hands_[602.3,4292.2,450.0,0.0,0.0,176.6]	
Time:		Time:	
Motion Time	1.75sec	Motion Time	1.75sec
Idle Time	0.00sec	Idle Time	0.00sec
Cycle Time	1.75sec	Cycle Time	1.75sec

<p>Weight:</p> <p>Actual Weight 0.00Kg</p> <p>GARG Energy:</p> <p>Total energy rate 6.78Kcal/min General work energy rate xxxKcal/min</p> <p>##### Action get_part_stand_point #####</p> <p>Action Type:</p> <p>Walk</p> <p>Location:</p> <p>get_part_sta[834.5,4263.9,450.0,0.0,0.0,180.0]</p> <p>Time:</p> <p>Motion Time 1.21sec Idle Time 0.00sec Cycle Time 2.96sec</p> <p>Weight:</p> <p>Actual Weight 0.00Kg</p> <p>GARG Energy:</p> <p>Total energy rate 6.78Kcal/min General work energy rate xxxKcal/min</p> <p>##### Action get_part_1_r #####</p> <p>Action Type:</p> <p>Get</p> <p>Location:</p> <p>get_part_1_r[1307.7,4483.6,1575.5,179.5,2.3,176.4]  get_part_1_l[1309.4,4023.1,1572.3,177.6,5.3,174.4]</p> <p>Time:</p> <p>Motion Time 0.60sec Idle Time 0.00sec Cycle Time 3.56sec</p>	<p>Weight:</p> <p>Actual Weight 0.00Kg</p> <p>GARG Energy:</p> <p>Total energy rate 8.12Kcal/min General work energy rate xxxKcal/min</p> <p>##### Action get_part_stand_point #####</p> <p>Action Type:</p> <p>Walk</p> <p>Location:</p> <p>get_part_sta[834.5,4263.9,450.0,0.0,0.0,180.0]</p> <p>Time:</p> <p>Motion Time 1.21sec Idle Time 0.00sec Cycle Time 2.96sec</p> <p>Weight:</p> <p>Actual Weight 0.00Kg</p> <p>GARG Energy:</p> <p>Total energy rate 8.12Kcal/min General work energy rate xxxKcal/min</p> <p>##### Action get_part_1_r #####</p> <p>Action Type:</p> <p>Get</p> <p>Location:</p> <p>get_part_1_r[1307.7,4483.6,1575.5,179.5,2.3,176.4]  get_part_1_l[1309.4,4023.1,1572.3,177.6,5.3,174.4]</p> <p>Time:</p> <p>Motion Time 0.60sec Idle Time 0.00sec Cycle Time 3.56sec</p>
--	--

<p>Weight:</p> <p>Actual Weight 0.00Kg</p> <p>GARG Energy:</p> <p>Total energy rate 1.82Kcal/min General work energy rate xxxKcal/min</p> <p>##### Action put_fix_stand_point #####</p> <p>Action Type:</p> <p>Walk</p> <p>Location:</p> <p>put_fix_stan[70.0,1047.3,450.0,0.0,0.0,92.4]</p> <p>Time:</p> <p>Motion Time 5.38sec Idle Time 0.00sec Cycle Time 8.94sec</p> <p>Weight:</p> <p>Actual Weight 15.00Kg</p> <p>GARG Energy:</p> <p>Total energy rate 7.60Kcal/min General work energy rate xxxKcal/min</p> <p>##### Action put_part_1_r #####</p> <p>Action Type:</p> <p>Put</p> <p>Location:</p> <p>put_part_1_r[331.5,438.6,1379.6,176.3,22.9,95.1]  put_part_1_l[128.7,433.9,1362.5,177.3,15.5,85.2]</p> <p>Time:</p> <p>Motion Time 0.50sec Idle Time 0.00sec Cycle Time 9.44sec</p>	<p>Weight:</p> <p>Actual Weight 0.00Kg</p> <p>GARG Energy:</p> <p>Total energy rate 2.19Kcal/min General work energy rate xxxKcal/min</p> <p>##### Action put_fix_stand_point #####</p> <p>Action Type:</p> <p>Walk</p> <p>Location:</p> <p>put_fix_stan[70.0,1047.3,450.0,0.0,0.0,92.4]</p> <p>Time:</p> <p>Motion Time 5.38sec Idle Time 0.00sec Cycle Time 8.94sec</p> <p>Weight:</p> <p>Actual Weight 15.00Kg</p> <p>GARG Energy:</p> <p>Total energy rate 8.52Kcal/min General work energy rate xxxKcal/min</p> <p>##### Action put_part_1_r #####</p> <p>Action Type:</p> <p>Put</p> <p>Location:</p> <p>put_part_1_r[331.5,438.6,1379.6,176.3,22.9,95.1]  put_part_1_l[128.7,433.9,1362.5,177.3,15.5,85.2]</p> <p>Time:</p> <p>Motion Time 0.50sec Idle Time 0.00sec Cycle Time 9.44sec</p>
--	--

Weight:	Weight:
Actual Weight 15.00Kg	Actual Weight 15.00Kg
GARG Energy:	GARG Energy:
Total energy rate 2.12Kcal/min General work energy rate xxxKcal/min	Total energy rate 2.50Kcal/min General work energy rate xxxKcal/min
##### Action retract_r #####	##### Action retract_r #####
Action Type:	Action Type:
Reachhand	Reachhand
Location:	Location:
retract_r[313.9,745.4,1469.4,176.6,7.6,94.1]	retract_r[313.9,745.4,1469.4,176.6,7.6,94.1]
retract_l[145.7,726.0,1469.4,179.6,0.4,84.6]	retract_l[145.7,726.0,1469.4,179.6,0.4,84.6]
Time:	Time:
Motion Time 0.51sec Idle Time 0.00sec Cycle Time 9.95sec	Motion Time 0.51sec Idle Time 0.00sec Cycle Time 9.95sec
Weight:	Weight:
Actual Weight 0.00Kg	Actual Weight 0.00Kg
GARG Energy:	GARG Energy:
Total energy rate 1.77Kcal/min General work energy rate xxxKcal/min	Total energy rate 2.14Kcal/min General work energy rate xxxKcal/min
##### Action walk_back #####	##### Action walk_back #####
Action Type:	Action Type:
Walk	Walk
Location:	Location:
walk_back[49.0,1331.9,450.0,0.0,0.0,90.0]	walk_back[49.0,1331.9,450.0,0.0,0.0,90.0]
Time:	Time:
Motion Time 1.21sec Idle Time 0.00sec Cycle Time 11.16sec	Motion Time 1.21sec Idle Time 0.00sec Cycle Time 11.16sec
Weight:	Weight:

Actual Weight	0.00Kg	Actual Weight	0.00Kg
GARG Energy:		GARG Energy:	
Total energy rate	6.78Kcal/min	Total energy rate	8.12Kcal/min
General work energy rate	xxxKcal/min	General work energy rate	xxxKcal/min
##### Actio nmark_stand_point #####		##### Action mark_stand_point #####	
Action Type:		Action Type:	
Walk		Walk	
Location:		Location:	
mark_stand_p[682.0,1121.7,450.0,0.0,0.0,136.3]		mark_stand_p[682.0,1121.7,450.0,0.0,0.0,136.3]	
Time:		Time:	
Motion Time	1.21sec	Motion Time	1.21sec
Idle Time	0.00sec	Idle Time	0.00sec
Cycle Time	12.37sec	Cycle Time	12.37sec
Weight:		Weight:	
Actual Weight	0.00Kg	Actual Weight	0.00Kg
GARG Energy:		GARG Energy:	
Total energy rate	6.78Kcal/min	Total energy rate	8.12Kcal/min
General work energy rate	xxxKcal/min	General work energy rate	xxxKcal/min
##### Action via_press #####		##### Action via_press #####	
Action Type:		Action Type:	
Reach hand		Reach hand	
Location:		Location:	
via_press[990.8,1144.0,1406.1,57.6,41.7,114.5]		via_press[990.8,1144.0,1406.1,57.6,41.7,114.5]	
Time:		Time:	
Motion Time	0.45sec	Motion Time	0.45sec
Idle Time	0.00sec	Idle Time	0.00sec
Cycle Time	12.81sec	Cycle Time	12.81sec
Weight:		Weight:	
Actual Weight	0.00Kg	Actual Weight	0.00Kg
GARG Energy:		GARG Energy:	

<p>Total energy rate 1.76Kcal/min General work energy rate xxxKcal/min</p> <p>##### Action press #####</p> <p>Action Type:  Reach hand</p> <p>Location:  press[954.2,998.7,1387.5,57.6,41.7,114.5]</p> <p>Time: Motion Time 0.33sec Idle Time 0.00sec Cycle Time 13.14sec</p> <p>Weight:  Actual Weight 0.00Kg</p> <p>GARG Energy:  Total energy rate 1.79Kcal/min General work energy rate xxxKcal/min</p> <p>##### Task Summary #####</p> <p>Time Summary:  Total cycle Time 13.14 sec Total MTM Time 13.14 sec Total Idle Time 0.00 sec</p> <p>Energy Summary:  Per Task 1.54 Kcal Per Shift 3382.72 Kcal Rate 7.05 Kcal/min</p>	<p>Total energy rate 2.12Kcal/min General work energy rate xxxKcal/min</p> <p>##### Action press #####</p> <p>Action Type:  Reach hand</p> <p>Location:  press[954.2,998.7,1387.5,57.6,41.7,114.5]</p> <p>Time: Motion Time 0.33sec Idle Time 0.00sec Cycle Time 13.14sec</p> <p>Weight:  Actual Weight 0.00Kg</p> <p>GARG Energy:  Total energy rate 2.16Kcal/min General work energy rate xxxKcal/min</p> <p>##### Task Summary #####</p> <p>Time Summary:  Total cycle Time 13.14 sec Total MTM Time 13.14 sec Total Idle Time 0.00 sec</p> <p>Energy Summary:  Per Task 1.77 Kcal Per Shift 3887.02 Kcal Rate 8.10 Kcal/min</p>
---	---