



**HAL**  
open science

**Vers une démarche d'intégration de la sécurité à la  
conception des machines à bois semi-automatisées :  
Application au développement d'un système de captage  
des poussières pour défonceuse à commande numérique**

Damien Jouffroy

► **To cite this version:**

Damien Jouffroy. Vers une démarche d'intégration de la sécurité à la conception des machines à bois semi-automatisées : Application au développement d'un système de captage des poussières pour défonceuse à commande numérique. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 1999. Français. NNT : 1999NAN10014 . tel-01747555

**HAL Id: tel-01747555**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01747555>**

Submitted on 29 Mar 2018

**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.



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

SEN 99 / 14 B

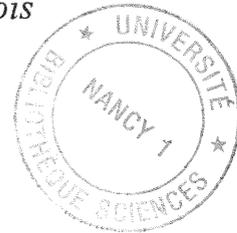
**Thèse**

présentée pour l'obtention du titre de

*Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy I*

*Spécialité Technologies Industrielles - Sciences du Bois*

par **Damien JOUFFROY**  
*Ingénieur ENSTIB*



*Vers une démarche d'intégration de la sécurité à la conception  
des machines à bois semi-automatisées.*

*Application au développement d'un système de captage  
des poussières pour défonceuse à commande numérique.*

Date de soutenance : *1 mars 1999*

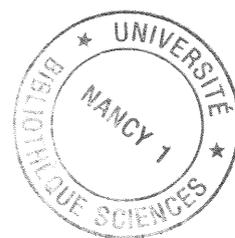
Composition du jury :

- |                      |                     |  |
|----------------------|---------------------|--|
| Président du jury :  | <b>F. LEPAGE</b>    | Professeur, Directeur du CRAN, Nancy             |
| Rapporteurs :        | <b>O. GARRO</b>     | Professeur, UTBM, Belfort                        |
|                      | <b>P. MILLOT</b>    | Professeur, LAMIH, Valenciennes                  |
| Examineurs :         | <b>R. BENOIT</b>    | Ingénieur de recherche, IRSST, Québec            |
|                      | <b>G. GUGLIELMO</b> | Directeur CSR / SCM Group, Italie                |
| Directeur de thèse : |                     | INRS, Directeur de Recherche Associé CNRS, Nancy |
|                      |                     | Professeur, ENSAM, Metz                          |

BIBLIOTHEQUE SCIENCES



D 095 113549 7



# REMERCIEMENTS

---

Je souhaiterais transmettre mes plus sincères remerciements et ma plus vive reconnaissance aux personnes suivantes pour leur collaboration et leur soutien durant toute la préparation de cette thèse.

Je remercie Monsieur F. LEPAGE, Directeur du CRAN, pour l'estime qu'il me manifeste en acceptant la présidence du jury de cette thèse.

Que Messieurs P. MILLOT et O. GARRO soient assurés de ma gratitude pour la reconnaissance qu'ils me témoignent en ayant accepté d'examiner attentivement ce mémoire.

Je tiens à remercier Messieurs R. BENOIT et G. GUGLIELMO pour l'honneur qu'ils me font en participant à ce jury.

Ma reconnaissance et mes remerciements les plus sincères vont à Monsieur Joseph CICCOTELLI pour m'avoir accueilli au sein de la section EADP de l'INRS et pour avoir dirigé ma thèse. Nos nombreuses discussions auront été déterminantes dans les différentes orientations de ce mémoire. Il est pour moi un exemple et je suis fier d'avoir travaillé sous sa direction.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance et mes remerciements les plus sincères à Monsieur Patrick MARTIN pour l'aide qu'il m'a apporté, pour la grande confiance qu'il m'a témoigné. Ses conseils et son soutien durant la thèse m'ont été précieux et déterminants.

Que Mademoiselle Stéphanie DEMOR soit assurée de mes profonds remerciements pour son aide indispensable dans l'analyse ergonomique effectuée. Ouverte et disponible, elle m'a permis d'acquérir une vision nouvelle du travail humain. Qu'au travers d'elle soit remercié Monsieur E. FADIER pour son aide à ce travail.

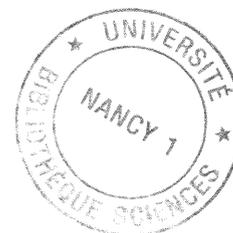
Que Messieurs M. JACQMIN, B. JANNIN, P. KUNTZ, J.-C. L'HUILLIER, J. MARSOT, P.-J. MEAUSOONE, J.-P. MÜLLER et B. THIRION soient remerciés pour leur participation dans le groupe de travail de conception. Que ce mémoire puisse être une forme de reconnaissance des efforts collectifs qu'ils ont effectués.

J'adresse également mes hommages à Messieurs P. BROUTE, DE BAILLENCOURT, J.-M. DESSAGNE, J.-Y. MONNEUSE, OSTERNAUD, J.-L. REGNIER, afin qu'ils soient associés à ce mémoire par leur travail au sein du groupe de ventilation 12 Bis sur la conception de systèmes de captage efficaces.

Que l'ensemble de l'équipe ICF du CRAN soit remercié pour les remarques constructives qu'ils ont pu formuler sur mes travaux.

Qu'il me soit permis d'exprimer mes remerciements à l'ensemble du personnel du service MDP, tout particulièrement Monsieur Alain MAYER pour m'avoir accueilli au sein de son service, A. MONTEAU, J. SILISTRIE, C. TISSERAND, P. BERTRAND, J.-P. BUCHWEILLER, M. FAUCONNET, M. JACQUES, P. LAMOUREUX, B. OTTER, E. PARISOT, J.-Y. TRIVIN, ... pour l'ambiance de travail et de bonne humeur qu'ils savent faire régner dans le service. Que Jean-Christophe BLAISE soit tout particulièrement remercié pour sa bonne humeur toujours constante et pour les longues discussions philosophiques que nous avons pu avoir.

Enfin, merci à mes parents et à Nadège qui m'ont toujours soutenu et encouragé.



# TABLE DES MATIERES

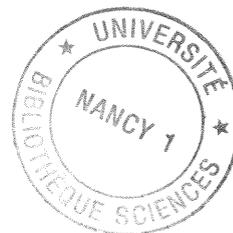
---

<b>AVANT-PROPOS</b>	<b>5</b>
<b>A. INTRODUCTION</b>	<b>9</b>
<b>I. MACHINES À BOIS SEMI-AUTOMATISÉES</b>	<b>10</b>
1. L'INDUSTRIE DU BOIS	10
2. LES DÉFONCEUSES À COMMANDE NUMÉRIQUE	12
<b>II. STATISTIQUES D'ACCIDENTS</b>	<b>16</b>
1. NATURE DES LÉSIONS	17
2. SIÈGE DES LÉSIONS	17
3. RISQUE MACHINES	18
4. MALADIES PROFESSIONNELLES	22
5. ACCIDENTS DU TRAJET	23
6. DÉCÈS	23
7. COÛT DES ACCIDENTS DU TRAVAIL	24
8. EN RÉSUMÉ	24
<b>III. CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE</b>	<b>25</b>
1. INTÉGRATION DE LA SÉCURITÉ À LA CONCEPTION	25
2. RÈGLES PARTICULIÈRES EN MATIÈRE DE VENTILATION	28
<b>IV. APPROCHES SOCIO-TECHNIQUES</b>	<b>29</b>
1. APPROCHE TECHNOCENTRÉE	30
2. APPROCHE ANTHROPOCENTRÉE	31
3. APPROCHE SYSTÈME : COOPÉRATION HOMME-MACHINE	32

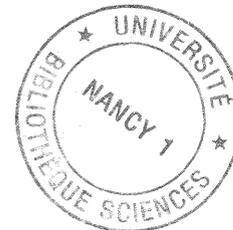
---

<b>B. IDENTIFICATION ANALYSE</b>	<b>37</b>
<b>I. PROCESSUS ACCIDENTEL</b>	<b>39</b>
1. VERS UN MODÈLE DU PROCESSUS ACCIDENTEL	39
2. HIÉRARCHIE DES MESURES DE SÉCURITÉ	49
<b>II. MÉTHODES D'ANALYSE DE LA SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT</b>	<b>51</b>
<b>III. ANALYSE ERGONOMIQUE TERRAIN</b>	<b>54</b>
1. LIMITE DE L'INTERVENTION	54
2. LA SITUATION DE TRAVAIL	55
3. ETUDE DES ACCIDENTS ET INCIDENTS	56
4. DONNÉES RECUEILLIES	59
5. ELÉMENTS DE DIAGNOSTIC ERGONOMIQUE	60
6. BILAN	65
<b>IV. MODÉLISATION FONCTIONNELLE HOMME-MACHINE</b>	<b>67</b>
1. FORMALISME DE MODÉLISATION	67
2. ELÉMENTS MODÉLISÉS	68
3. BILAN	74
<b>C. INTÉGRATION</b>	<b>77</b>
<b>I. CONCEPTION</b>	<b>78</b>
1. INGÉNIERIE SÉQUENTIELLE	79
2. INGÉNIERIE SIMULTANÉE	81
<b>II. FONDEMENTS DU MCD</b>	<b>84</b>
<b>III. EXPÉRIENCE MENÉE</b>	<b>87</b>
1. OBJECTIFS VISÉS	87
2. PROPRIÉTÉS DES MODULES MCD	88
3. ANALYSE DES ÉCHANGES ENTRE ACTEURS	94
4. BILAN DE L'EXPÉRIENCE	109

<b>D. VALIDATION</b>	<b>111</b>
<b>I. PROBLÉMATIQUE DU CAPTAGE</b>	<b>112</b>
1. INFLUENCE DU TYPE D'USINAGE	112
2. SOURCE D'ÉMISSION DES PARTICULES	113
3. DIRECTION DE PROJECTION DES PARTICULES	115
4. AMPLITUDES DE PROJECTION	116
5. INFLUENCE DES PARAMÈTRES D'ÉMISSION SUR LE DISPOSITIF DE CAPTAGE	118
<b>II. AMÉLIORATIONS DU SYSTÈME DE CAPTAGE</b>	<b>120</b>
1. MACHINE ÉTUDIÉE	120
2. LIMITES DU SYSTÈME ACTUEL	121
3. VOIES DE SOLUTIONS	123
4. SYSTÈME DÉVELOPPÉ	123
<b>III. TESTS ET MESURES EFFECTUÉS</b>	<b>127</b>
1. RÉSULTATS AVEC LA CONFIGURATION D'ORIGINE	130
2. RÉSULTATS AVEC LA NOUVELLE CONFIGURATION	131
3. COMPARAISON DES RÉSULTATS :	134
4. AMÉLIORATIONS POSSIBLES	135
<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b>	<b>137</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>143</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>157</b>







# AVANT-PROPOS

---

Les machines sont à l'origine ou contribuent de façon significative aux accidents du travail. Certains secteurs industriels, comme l'industrie du bois, sont plus particulièrement concernés. Ces accidents trouvent une explication dans la mauvaise adaptation des machines aux besoins des utilisateurs et à leur utilisation en sécurité ; cette mauvaise adaptation s'expliquant en partie par la conception inadéquate des machines par rapport aux besoins spécifiques des utilisateurs. Pour prendre en compte l'aspect sécuritaire d'une machine lors de son exploitation, les constructeurs s'appuient principalement sur des textes réglementaires et normatifs les contraignant à développer des solutions techniques spécifiques à la sécurité. Malgré ces exigences sécuritaires fortes, les machines occasionnent encore de nombreux accidents lors de leur utilisation.

La réglementation ayant évolué tant au niveau national qu'europpéen, elle a eu pour effet d'accroître considérablement la responsabilité des concepteurs et des fabricants mais aussi celle des entreprises utilisatrices face aux machines produites. Cette évolution législative vise à intégrer les aspects sécurité à la conception. Or même s'il n'est pas possible de douter de la sensibilisation et de l'intérêt fort des concepteurs à ce principe d'intégration, le fait est que la majorité de ceux-ci ne savent pas comment faire cette intégration efficacement. Pour preuve le nombre d'accidents sur les machines neuves est sensiblement égal à celui existant avant la "nouvelle approche".

La raison principale de cette carence de résultat est que les constructeurs manquent d'une approche méthodologique efficace pour prendre en compte la sécurité dès la conception. Ils disposent certes de normes, de textes réglementaires pour les guider, de divers outils d'analyse de la sûreté de fonctionnement, mais ne possèdent pas d'approche méthodologique pragmatique pour d'une part analyser les risques, les causes et conséquences de ces risques sur la santé de l'opérateur et d'autre part intégrer les résultats de ces analyses et les exigences essentielles de sécurité dans leur processus de conception.

Pour les aider, nous avons centré nos travaux vers une proposition de démarche méthodologique de prise en compte, d'intégration et de réduction des risques.

Résultant d'une demande de la part des utilisateurs et des "préventeurs" de Caisse Régionale d'Assurance Maladie, notre travail s'est orienté sur les machines semi-automatisées du secteur bois. Ces machines font largement appel à l'homme pour les régler, les alimenter en

pièces brutes, les conduire et les superviser dans leurs tâches d'usinage, récupérer les déviations et dysfonctionnements pouvant survenir, ... Les opérateurs travaillant sur ces machines, sont exposés à de nombreux risques qu'il paraît difficile de réduire par une simple intégration des exigences réglementaires.

Dans l'objectif de proposer une démarche méthodologique aux concepteurs de machines à bois semi-automatisées, afin qu'ils améliorent les conditions de travail sur ces machines, nous avons structuré notre travail en quatre étapes :

Etape A : Identification du besoin sur ces machines compte tenu du contexte réglementaire, normatif, mais aussi et surtout de l'utilisation effective ;

Etape B : Identification et analyse des risques sur ces machines en utilisation effective puis modélisation de l'interaction entre l'opérateur et la machine d'un point de vue sécuritaire ;

Etape C : Elaboration d'une méthodologie d'intégration de la sécurité à la conception ;

Etape D : Validation de la méthodologie de conception par le développement d'une partie de la machine occasionnant certains risques pour les opérateurs.

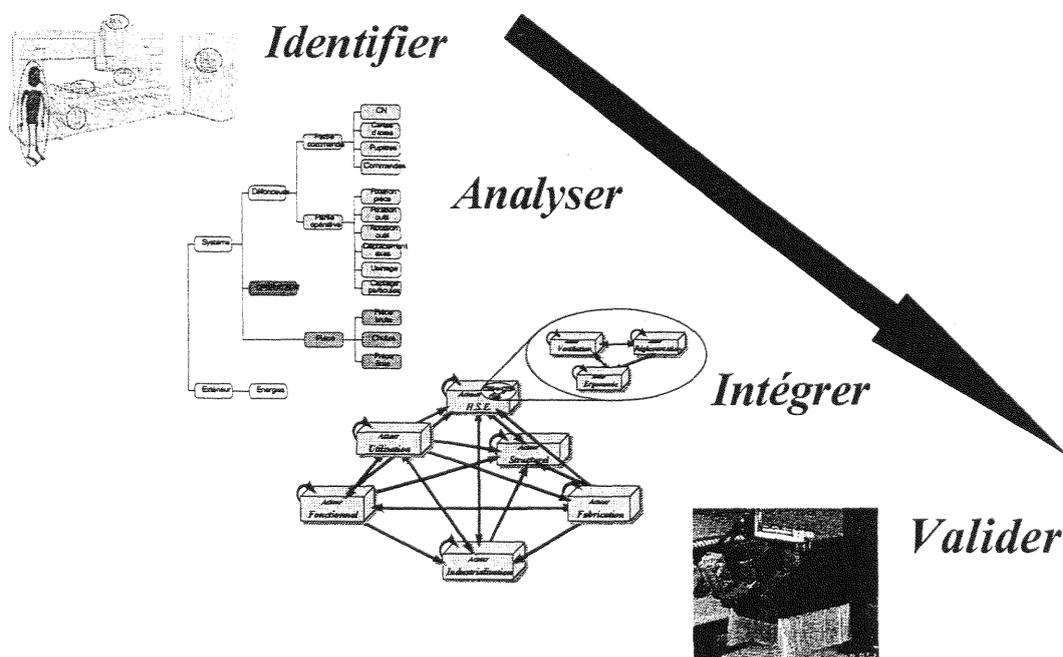


Figure 1 : Démarche méthodologique proposée.

Ces quatre étapes seront présentées dans ce mémoire selon quatre parties distinctes.

La *première partie*, précise, dans un premier chapitre, ce que sont les machines à bois semi-automatisées et plus particulièrement les défonceuses à commande numérique. Pour cela, quelques caractéristiques de l'industrie du bois seront rapidement introduites avant de présenter les machines semi-automatisées par la description de leurs caractéristiques techniques.

Le chapitre suivant est consacré à la présentation des données statistiques concernant les accidents survenus dans le secteur bois et plus particulièrement les accidents imputables aux machines. Les données seront explicitées en terme d'accident, de maladies professionnelles et de décès. Nous pourrions voir, en particulier, le type et le siège des lésions que l'opérateur peut subir ainsi que les conditions de fonctionnement du système lors de l'accident.

La description du cadre réglementaire et normatif dans lequel les industriels conçoivent et utilisent les défonceuses à commande numérique, permettra, à la suite, de fixer quelques notions quant à l'intégration de la sécurité à la conception.

Le dernier chapitre de cette partie, présente différentes approches socio-techniques, puis situe la place de l'opérateur dans de telles approches. Une démarche sera proposée pour permettre l'analyse conjointe des aspects techniques de la fiabilité de la machine et des spécificités de l'activité de l'opérateur, analysant ainsi l'homme au même niveau que la machine et prenant en compte les interactions importantes qu'ils peuvent avoir.

Après cette présentation du cadre de travail qui est celui des constructeurs de machines, nous aborderons la démarche méthodologique proprement dite au travers des trois autres parties constituant ce mémoire.

Afin de pouvoir identifier et analyser les risques liés aux défonceuses et à leur utilisation, il nous a paru intéressant de cadrer le processus accidentel. Pour cela, la *deuxième partie* débute par une description des divers éléments et phénomènes qui interviennent dans l'accident. Ce processus sera construit au fur et à mesure que ces éléments seront définis. Cette description du processus accidentel sert au final, à l'identification des mesures de sécurité qui peuvent être prises, les hiérarchisant en fonction de leur efficacité en terme de sécurité pour l'opérateur et d'intégration au plus tôt dans le processus accidentel.

Un rappel succinct des différentes méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement existantes, permet ensuite de différencier les méthodes d'analyse déductives des méthodes inductives. Cette partie illustre également le manque de connaissance et d'utilisation de ces méthodes pour analyser les données de fiabilité, maintenabilité, disponibilité et surtout de sécurité.

Le troisième chapitre de cette partie est consacré à la présentation de l'analyse terrain qui a été effectuée. Cette analyse s'est opérée dans le double but d'identifier les caractéristiques techniques des défonceuses dans leur exploitation réelle et d'identifier les caractéristiques de l'activité des opérateurs conduisant ces machines. Cette partie présente tout d'abord le cadre du terrain analysé, puis les accidents survenus dans l'entreprise. Ensuite, sont présentés les résultats de l'analyse ergonomique en termes de compétences et de savoir-faire identifiés chez les opérateurs, de risques inhérents à la machine et issus de l'organisation, par phase de travail.

Pour terminer cette partie est présentée une modélisation intégrant l'opérateur et la machine dans un cadre d'analyse identifiant le fonctionnement normal et anormal (sous défaillances) de ce couple d'interacteurs. Tout d'abord seront décrits les objectifs visés par cette modélisation, avant de présenter la structure de l'outil informatique utilisé et de décrire le processus de modélisation mis en œuvre. Une conclusion apportera quelques perspectives à la fin de ce chapitre.

La *troisième partie* est entièrement consacrée à la conception. Dans l'optique d'intégrer les aspects sécurité à la conception, afin d'améliorer la sécurité des systèmes dès les premières étapes de leur cycle de vie, nous avons travaillé à partir d'un modèle de conception distribuée. Avant de présenter le modèle utilisé, nous rappellerons quelques notions du processus de

conception, dans la distinction entre ingénierie séquentielle et ingénierie simultanée. Cette partie nous conduisant ensuite à présenter le modèle de conception distribuée.

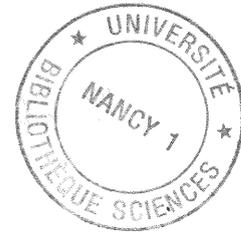
L'expérience de conception que nous avons menée est alors présentée, d'un point de vue des objectifs visés, des acteurs intégrés et des résultats obtenus. Nous montrerons, au travers de divers indicateurs, comment les acteurs garants de la sécurité se sont intégrés dans l'expérience, quels rôles ils ont pu jouer et quelles données ils ont manipulé durant l'expérience. Ceci permettant de démontrer qu'il est possible d'intégrer des acteurs garants de la sécurité non intégrés habituellement dans le processus de conception.

Enfin, la *quatrième partie*, présente l'application qui a émergé de l'expérience de conception, permettant d'améliorer l'efficacité de captage sur une défonceuse. Cette partie débute par une description des caractéristiques de l'émission de particules de bois générées lors d'un usinage. Par cette description, la problématique du captage est abordée, afin de pouvoir analyser l'émission des particules sur une défonceuse et d'en extrapoler les quelques données nécessaire à la compréhension du phénomène.

Ensuite, la description du système développé commence par une description simple de la machine étudiée. Est alors analysé le système actuel de captage présent sur la machine d'étude, montrant un certain nombre de limites dans son efficacité.

Diverses voies de solutions possibles pour améliorer l'efficacité du système de captage sont décrites, pour finalement n'en retenir qu'une seule développée au travers d'un prototype. Ce prototype sera décrit techniquement, permettant de s'assurer de l'amélioration apportée, puis les différents tests réalisés par mesures de concentrations de particules au poste de travail, sont présentés, permettant de valider la solution retenue dans le développement du nouveau système de captage.

Une conclusion est alors donnée ainsi qu'une description des diverses perspectives envisageables tant au niveau de l'identification, de l'analyse, de l'intégration, que de l'amélioration du nouveau système de captage.



# A. INTRODUCTION

---

<b>I. MACHINES À BOIS SEMI-AUTOMATISÉES</b>	<b>10</b>
1. L'INDUSTRIE DU BOIS	10
2. LES DÉFONCEUSES À COMMANDE NUMÉRIQUE	12
<b>II. STATISTIQUES D'ACCIDENTS</b>	<b>16</b>
1. NATURE DES LÉSIONS	17
2. SIÈGE DES LÉSIONS	17
3. RISQUE MACHINES	18
4. MALADIES PROFESSIONNELLES	22
5. ACCIDENTS DU TRAJET	23
6. DÉCÈS	23
7. COÛT DES ACCIDENTS DU TRAVAIL	24
8. EN RÉSUMÉ	24
<b>III. CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE</b>	<b>25</b>
1. INTÉGRATION DE LA SÉCURITÉ À LA CONCEPTION	25
2. RÈGLES PARTICULIÈRES EN MATIÈRE DE VENTILATION	28
<b>IV. APPROCHES SOCIO-TECHNIQUES</b>	<b>29</b>
1. APPROCHE TECHNOCENTRÉE	30
2. APPROCHE ANTHROPOCENTRÉE	31
3. APPROCHE SYSTÈME : COOPÉRATION HOMME-MACHINE	32

# **I. MACHINES A BOIS SEMI-AUTOMATISEES**

## **1. L'INDUSTRIE DU BOIS**

Lors de sa mise en œuvre industrielle, le bois subit un grand nombre de transformations depuis la grume jusqu'au produit fini. La nature du matériau vivant, le contexte industriel, les procédés de fabrication, constituent un ensemble de contraintes qui conduisent à une approche spécifique des problèmes d'automatisation et un frein à son développement.

Durant les années 80, la mécanisation s'est intéressée à l'intervention humaine en désirant la supprimer en particulier dans les tâches purement physiques [Martin\_89]. Avec l'augmentation de leur automatisation, seulement certaines machines ont vu, en partie, leurs tâches décisionnelles confiées, non plus à l'homme exclusivement, mais également à des moyens informatiques.

Comme dans les autres secteurs industriels, l'automatisation a permis d'augmenter la productivité et de répondre aux impératifs de la cadence de production. Par cette augmentation des performances, la taille des séries, des en-cours, des stocks et des délais a diminué, la production a vu sa flexibilité augmenter tout en abaissant les temps de fabrication, la phase de conception a augmenté en liberté.

Les temps d'usinage du bois, très courts, les vitesses de coupe et d'aménagement étant élevées par rapport à l'usinage des métaux, l'augmentation de la productivité dans l'industrie du bois ne peut se faire principalement que par une diminution des temps de réglage, des temps de transfert de pièces, tout en supprimant les gabarits et en réduisant les délais techniques. Lorsque l'on visite les entreprises de la filière bois, on est toujours frappé par la quantité énorme de pièces en attente, en cours de fabrication ou en stocks intermédiaires. Le temps d'usinage étant très court et les vitesses d'aménagement pouvant aller jusqu'à 80 m.mn<sup>-1</sup>, le temps moyen de travail d'une pièce de bois sera de l'ordre de quelques dizaines de secondes dans la majorité des cas à l'exception de certaines machines réalisant plusieurs opérations traditionnelles en un seul passage : ainsi une défonceuse peut aussi bien réaliser un défonçage, qu'une rainure, une mortaise, un chanfrein, une plate-bande, ... le tout sur une même pièce. On estime que les deux tiers du temps nécessaire pour fabriquer un produit se passent en manutention ou en stockage. D'autre part, il est à noter que les pièces sont souvent de grandes dimensions, de formes variées, fragiles et à manipuler avec précaution.

Mais cette augmentation ne peut et ne doit se faire au détriment d'une diminution du rendement matière (le CTBA<sup>1</sup> estimait en 1989 qu'un gain de 10% de productivité ne compensait pas une perte de 2% de rendement matière dans le secteur bois).

Un gain matière non négligeable peut toutefois découler d'une augmentation de l'automatisation. Ce facteur est très important dans la filière bois : on estime que la part matière première est de l'ordre de 30% du coût de revient dans l'industrie du meuble, de 60% environ pour les scieries. Il faut toutefois noter que la notion de rendement matière dans les industries du bois recouvre l'aspect purement géométrique, mais également la valeur liée à la

---

<sup>1</sup> CTBA : Centre Technique du Bois et de l'Ameublement.

qualité, à la rareté, à la dimension des pièces débitées, à l'adéquation à l'emploi (en particulier dans la construction). Tous ces points permettant de juger du rendement matière bois, sont pris en compte par les opérateurs tout au long de la chaîne de transformation d'une façon plus ou moins subjective. En effet, l'évaluation rapide et précise des pièces de bois s'effectue par rapport à des critères souvent visuels. Des études ont montré une certaine variabilité inter et intra-individuelle dans le classement des pièces de bois effectué par différents opérateurs. Ce classement aujourd'hui s'effectue de façon automatique dans certains cas, permettant de s'affranchir des variations de jugement des hommes. Ce classement automatisé, utilisant différents types de systèmes de mesure (caméra, rayonnement électromagnétique, ultrasons, ...), couplé à une optimisation en fonction du rendement matière, de la qualité, des prix des produits, de la demande, est maintenant fiable et rapide.

De plus, les données utilisées par les systèmes de contrôle en cours de fabrication sur les machines automatiques peuvent être exploitées à des fins autres que pour la production. Elles peuvent servir la gestion et le suivi de la production, la maintenance des équipements, l'aide à la détection de défaillances.

L'automatisation permet également de mieux optimiser la production. Par le développement de prises d'informations et de contrôles en cours de fabrication ou sur les machines, l'automatisation permet d'améliorer les performances des machines réduisant ainsi les rebuts, homogénéisant la qualité, améliorant la précision. De plus, seuls les moyens de production automatiques permettent d'assurer un usinage régulier, avec une reproductivité importante d'une pièce à l'autre, tout en conservant une flexibilité nécessairement importante en regard du nombre de pièces important, des usinages différents d'une série à l'autre et des vitesses de fabrication élevées.

Ainsi depuis les années 80, les constructeurs ont développé de nouvelles machines permettant soit d'usiner de grandes quantités de pièces identiques en minimisant les manutentions humaines (corroyeuses, perceuses multibroches, ...), soit, au contraire, des machines modulaires s'intégrant dans une production associant grande série et pièces quasi unitaires le tout avec une variabilité tant dimensionnelle que de forme (défonceuses à commande numérique, centre d'usinage CN, ...).

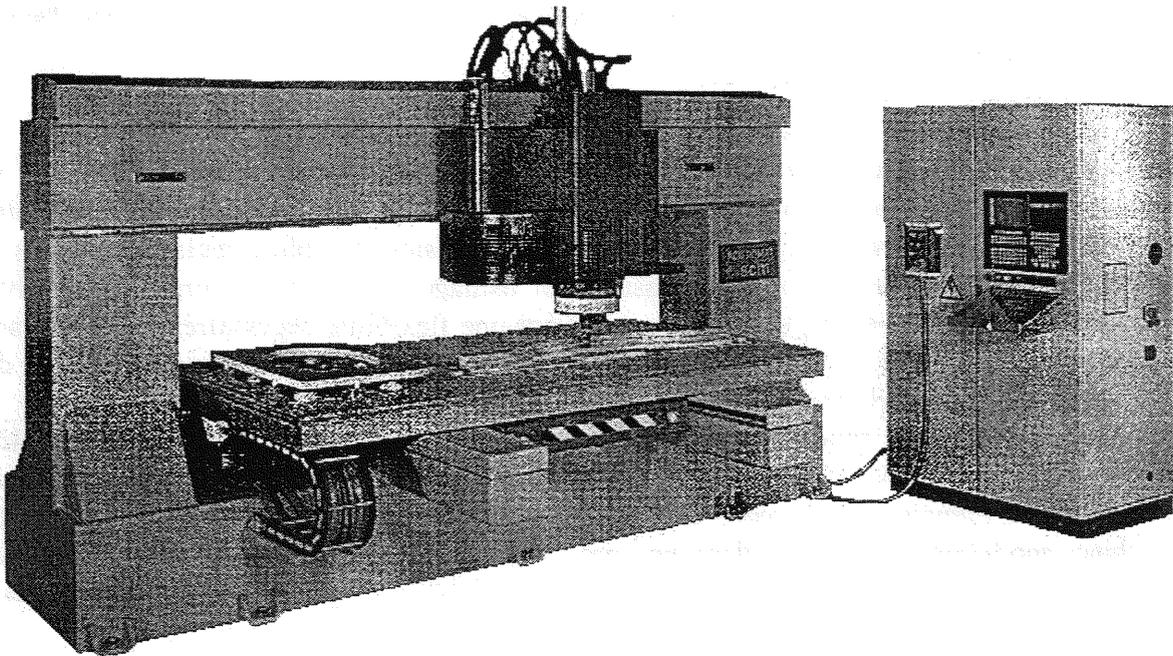
Au niveau de la seconde transformation la mécanisation des produits est plus importante afin de réduire les en-cours, d'assurer une plus grande souplesse de production et de diminuer les postes répétitifs. Les machines élémentaires corroyeuses, moulurières, tenonneuses utilisent généralement deux opérateurs (un au chargement et un au déchargement, au tri et à l'empilage) alors que sur une défonceuse l'opérateur est seul à travailler. Les pièces subissant, dans l'ameublement, selon leur complexité, de 5 à 20 usinages différents, les machines qui permettent d'effectuer un, deux ou trois de ces usinages sans manutention intermédiaire de pièces, sont nécessairement intéressantes pour l'industriel. Ceci peut être une des raisons de l'essor des machines semi-automatisées du type des défonceuses à CN, dans les industries de l'ameublement et plus généralement de seconde transformation du bois.

## 2. LES DÉFONCEUSES À COMMANDE NUMÉRIQUE

Les défonceuses à commande numérique (Figure 2) sont maintenant classiques dans la filière bois.

Une définition du terme de défonceuse à commande numérique nous est donnée par le projet de norme 848-3 [prEN 848-3] :

*une défonceuse est une "machine à avance intégrée conçue pour l'usinage de pièces au moyen d'outils de fraisage et/ou de forets. La machine doit avoir au moins deux axes orthogonaux numérisés (X, Y) pour le positionnement et/ou l'usinage. Les mouvements d'axes doivent être réalisés conformément au programme numérique."*



**Figure 2 : Défonceuse à commande numérique (doc. SCM).**

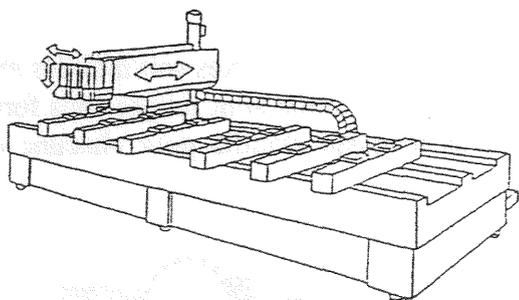
La machine peut comporter :

- des unités de sciage, ponçage, etc.,
- un support de pièce fixe ou mobile,
- un bridage de pièces mécanique, hydraulique, pneumatique ou à dépression,
- une possibilité de changement automatique d'outil.

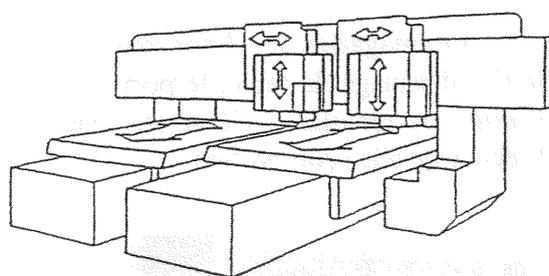
D'un point de vue architecture, les défonceuses à commande numérique possèdent soit un col de cygne, soit un portique pour supporter la tête d'usinage. Pour assurer la mobilité des pièces à usiner, il est possible de mouvoir soit le support de la tête d'usinage, soit la tête d'usinage elle-même, soit la table sur laquelle sont maintenues les pièces, soit une combinaison de deux ou trois de ces éléments.

Nous avons ainsi reproduit ci-dessous, différentes architectures de défonceuses à commande numérique :

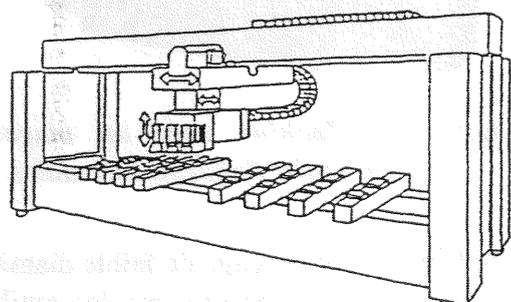
- Figure 3 : une machine à col de cygne mobile et à table fixe possédant une mobilité au niveau de la tête d'usinage,
- Figure 4 : une machine à portique fixe, à tables et à têtes d'usinage mobiles. Les deux tables peuvent se déplacer indépendamment l'une de l'autre ou alors coupées.
- Figure 5 : machine à portique et table fixes. La mobilité étant assurée par la tête d'usinage.
- Figure 6 : machine à portique et tête d'usinage mobile, la table étant fixe.



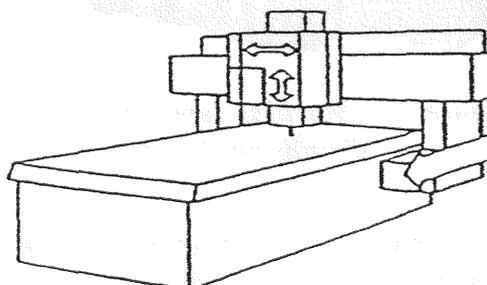
*Figure 3 : Machine à bâti en col de cygne mobile et table fixe.*



*Figure 4 : Machine à portique fixe à tables mobiles.*



*Figure 5 : Machine à portique et table fixes.*



*Figure 6 : Machine à portique mobile et table fixe.*

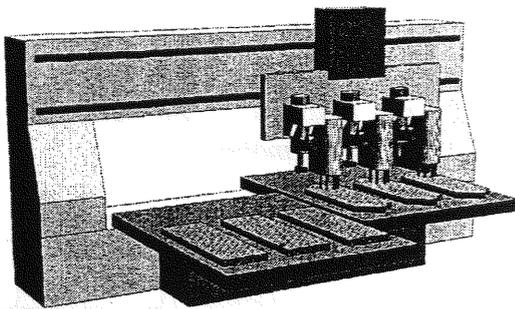
Toutes ces architectures sont employées par les constructeurs de machines, cependant leurs préférences semblent être portées sur les machines à col de cygne et tête d'usinage mobiles avec table fixe, et aux machines à portique fixe à tables et têtes d'usinage mobiles.

De part leur conception, les défonceuses à CN et les centres d'usinage à CN possèdent une grande flexibilité de production, une précision importante dans l'usinage et limitent les manutentions manuelles. Les temps de réglage réduits permettent de travailler aussi bien les petites que les grandes séries de pièces.

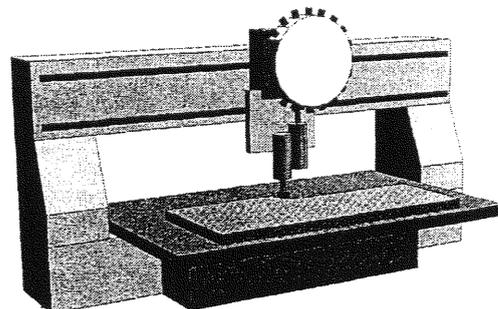
De plus, par rapport aux machines de la mécanique de même type architectural, elles présentent les particularités liées aux performances recherchées dans l'usinage du bois :

- 3 à 5 axes d'usinage (quelques fois 6 ou 7),
- broches à grande vitesse (18 000 à 25 000 tr.mn<sup>-1</sup>),
- une ou plusieurs broches de capacités différentes, avec parfois des systèmes de renvois d'angles propres,
- vitesse de déplacement importante (de 12m.mn<sup>-1</sup> à plus de 20 m.mn<sup>-1</sup>),
- système de maintien des pièces par dépression,
- magasin d'une dizaine d'outils à parfois plus de 20.

Les magasins des défonceuses à commande numériques sont soit fixes soit mobiles avec la tête d'usinage, la table, le portique (ou le col de cygne). Les outils sont rangés sous forme linéaire ou circulaire. Certaines machines possèdent un magasin d'outils pour chacune des broches qu'elles comportent.



*Figure 7 : Machine avec un magasin d'outils par broche.*



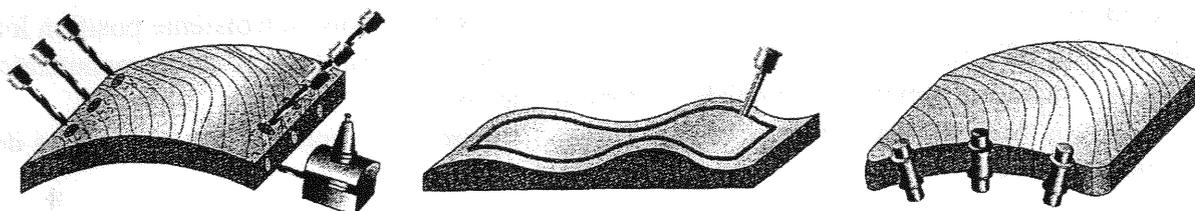
*Figure 8 : Machine avec un magasin d'outils de forme circulaire.*

La gamme d'outils utilisés est très vaste allant de la mèche de perçage de faible diamètre (5 à 20 mm) à la roue de ponçage profilée ( $\varnothing$  200 à 250 mm) en passant par les outils à défonceur ( $\varnothing$  25 à 30 mm, longueur 100 à 150 mm) et éventuellement les scies circulaires ( $\varnothing$  300 à 350 mm) associées à un système de renvoi d'angle indexé augmentant d'autant leur champ de compétences.

Les courbes et surfaces réalisées ayant un caractère esthétique important, la programmation à l'aide de droites et cercles n'est pas toujours adaptée, aussi, des systèmes de digitalisation et d'interpolations de fonctions polynomiales sont nécessaires.

Malheureusement, certaines de ces machines sont dérivées du secteur de la mécanique [Heye\_94] ou alors sont souvent adaptées aux méthodes étrangères de travail ou à des essences particulières et ne correspondant pas toujours aux structures, essences ou applications françaises. Il faut donc nécessairement, avant tout achat, s'assurer que l'adaptation de ces machines correspond bien aux spécificités de l'entreprise, que ces outils soient intégrables dans le système de production et que le maximum de possibilités soit effectivement utilisé. Après s'être assuré de la concordance entre les spécifications de la demande et les possibilités offertes, il sera nécessaire de vérifier les bonnes performances des automatismes et de la mécanique qui constituent une part importante des investissements.

Les meubles modernes de rangement ou de cuisine possèdent des formes parallélépipédiques ; l'élément décoratif se situant au niveau de la porte, les dessins d'ensemble sont constitués généralement de variantes et les pièces sont normalisées par l'entreprise. Par contre, le fabricant est souvent amené à proposer une combinaison infinie de dimensions, d'agencements, d'habillages, de teintes, d'accessoires, ... et le dessin assisté par ordinateur a pour but de créer rapidement le meuble ou l'ensemble de cuisine à la demande du client parmi un échantillonnage proposé. Le système de CAO a donc d'abord une vocation d'aide à la commercialisation, à la réalisation rapide de plans d'ensemble et de devis. Le rôle de la CAO est ensuite essentiel au cours de la fabrication. En effet, elle permet, à partir des plans d'ensemble réalisés, de créer, automatiquement ou non selon le degré d'automatisation du système, l'ensemble de plans de chacune des pièces constituant le meuble ou l'ensemble de cuisine. Se trouvant confronté à des commandes toutes différentes les unes des autres, et même si certains éléments sont communs, il faut être capable de produire des éléments spécifiques en petites séries régulièrement sans que cela n'affecte l'ensemble de la production. Il est donc demandé une souplesse importante aux machines permettant de travailler les pièces de formes en particulier aux défonceuses et autres centres d'usinage.



*Figure 9 : Différentes pièces usinées avec une défonceuse à commande numérique.*

Couplée à un programme spécifique, la CAO permet de générer directement à partir d'un dessin de pièce, le programme d'usinage exploitable par une commande numérique. Ainsi, à partir d'un plan d'ensemble constitué d'éléments de base définis par l'entreprise, il est possible de programmer une défonceuse à commande numérique pour exécuter des pièces de formes variées (aussi bien les éléments de bases que les portes d'un ensemble de cuisine, les différents éléments des meubles de style ancien). Le couplage CAO/Commande Numérique permet aux entreprises de travailler des pièces qu'il serait très difficile, long et non rentable d'usiner par un moyen classique ne faisant pas appel à l'informatique.

De plus, la CAO apporte des données techniques et commerciales nécessaires à la gestion de production.

Les entreprises de seconde transformation sont comparables aux industries manufacturières tout en présentant certaines particularités. La valeur ajoutée est réalisée par la main-d'œuvre et les entreprises possèdent un niveau relativement faible de mécanisation. Aussi, compte tenu des temps de réglages des machines, les produits semi-finis sont fabriqués sur prévision et par campagnes alors que l'assemblage et la finition se réalisent à la commande. La gestion de production a donc pour objectif essentiel une gestion du flux matière et de suivi de la productivité de la main-d'œuvre. On recherche également à réduire le niveau moyen de stocks, à calculer au mieux les délais de livraison et à les respecter, à limiter les nomenclatures et les gammes. Les difficultés particulières à l'utilisation d'une gestion de production sont liées à l'existence de nombreuses variantes en dimension et coloris, au caractère aléatoire du processus de fabrication lié au matériau et au faible degré de mécanisation qui entraîne une dispersion des temps opératoires.

## II. STATISTIQUES D'ACCIDENTS

Les entreprises du secteur bois sont confrontées à de nombreux accidents. En effet, ce secteur compte parmi les plus importants au nombre d'accidents survenus chaque année. Les statistiques technologiques de la CNAMTS<sup>2</sup> pour l'année 1996, révèlent 15 433 accidents avec arrêts soit un taux de fréquence<sup>3</sup> de 50,8 ; alors que le taux de fréquence de l'ensemble des comités techniques est de 24,4. Ce qui place le CTn<sup>4</sup> Bois au second rang derrière celui du BTP (TF : 58,9).

Pour la seule année 1996, 518 389 journées de travail ont été perdues par incapacités temporaires. Le taux de gravité<sup>5</sup> est le troisième avec une valeur de 1,71 derrière le BTP et le comité technique du transport et de la manutention ; le taux de gravité tous comités confondus étant de 0,94.

Pour cette même année, 1 244 accidents ont entraîné une incapacité permanente de l'accidenté. Soit un indice de gravité<sup>6</sup> de 38,2 plaçant le secteur bois en troisième position loin derrière le BTP (63,3) mais proche du comité technique du transport et de la manutention (39,6) ; l'indice de gravité tous comités confondus étant de 21,1.

Nous pouvons voir sur le graphique suivant (Figure 10) l'évolution des indicateurs des accidents du secteur bois sur les 40 dernières années.

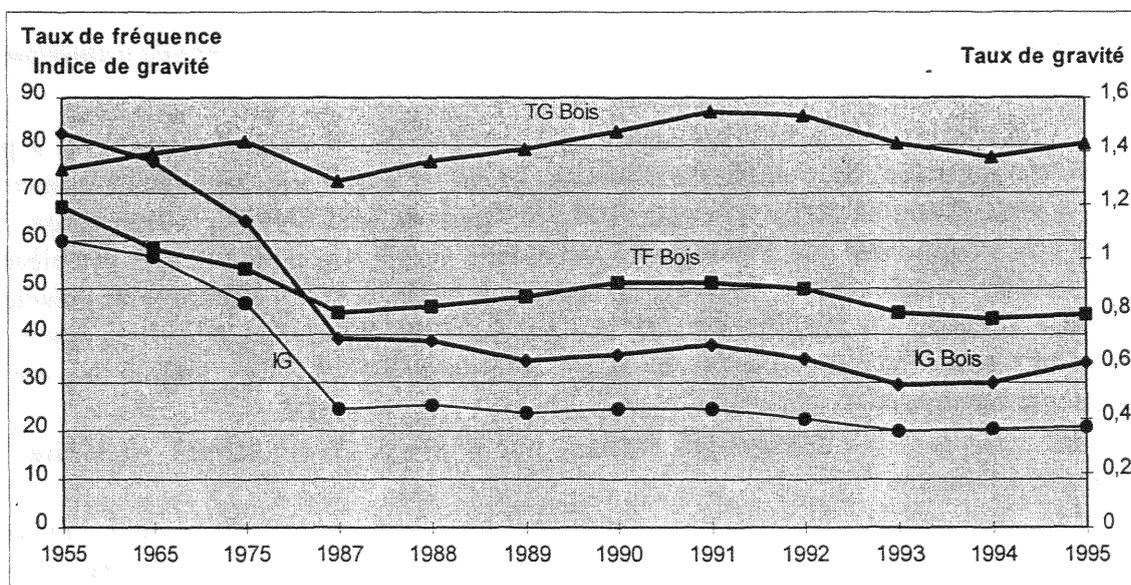


Figure 10 : Variations des indicateurs d'accidents du secteur bois.

<sup>2</sup> CNAMTS : Caisse Nationale de l'Assurance Maladie des Travailleurs Salariés.

<sup>3</sup> Taux de fréquence (TF) : rapport du nombre des accidents avec arrêts au temps de travail en million d'heures.

<sup>4</sup> CTn : Comité Technique national

<sup>5</sup> Taux de Gravité (TG) : rapport du nombre de journées perdues par incapacité temporaire (IT) pour mille heures travaillées.

<sup>6</sup> Indice de Gravité (IG) : rapport entre la somme des taux d'incapacités permanentes (IP) (en %) attribuées au titre des séquelles subsistantes et la durée d'exposition au risque en million d'heures travaillées.

Nous allons maintenant présenter plus en détails les données statistiques du secteur bois. Pour cela nous parlerons d'abord des statistiques d'accidents selon la nature puis le siège des lésions, ensuite de l'importance du risque lié aux machines par rapport aux autres risques, puis des maladies professionnelles, des accidents du trajet, et enfin des accidents s'étant soldés par le décès de l'accidenté. Nous concluons alors avec quelques chiffres présentant les coûts liés aux accidents.

## 1. NATURE DES LESIONS

En 1993, les accidents survenus dans le secteur bois étaient caractérisés par des plaies dans 30% des cas, des contusions dans 22% des cas et des lombagos dans plus de 15% des cas (Figure 11). Les journées perdues, les incapacités permanentes ainsi que les taux d'IP, sont principalement la conséquence de lésions de type plaies et contusions.

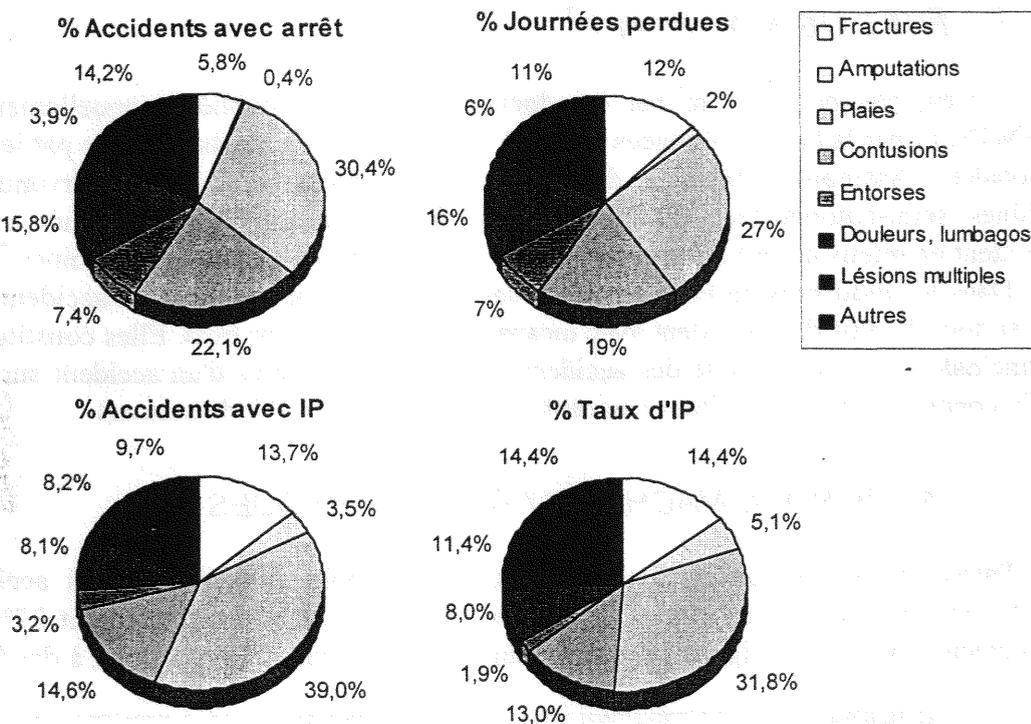


Figure 11 : Répartition des accidents du CTn Bois selon la nature des lésions.

## 2. SIEGE DES LESIONS

Les personnes travaillant dans le secteur bois, sont principalement accidentées au niveau des mains (41% des accidents avec arrêts (Figure 12) et 58% des accidents avec IP); beaucoup d'opérations étant effectuées manuellement tant en manutention qu'en usinage. Le tronc et les membres (inférieurs et supérieurs) semblent être les autres parties du corps touchées chez les opérateurs du secteur bois.

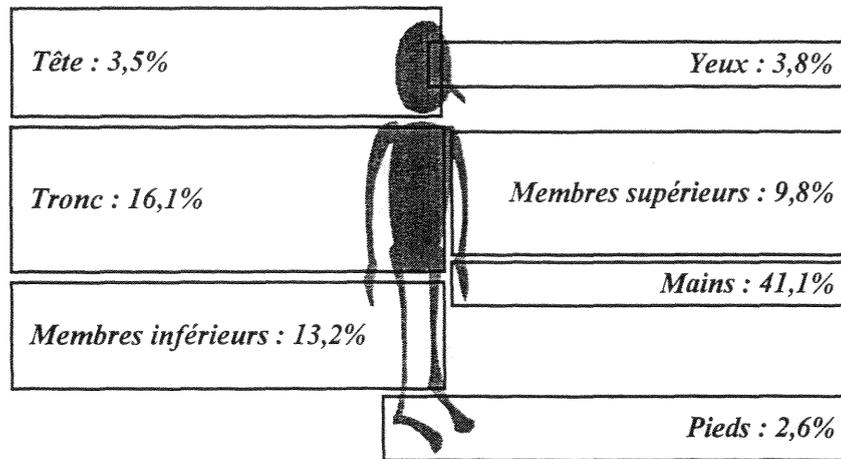


Figure 12 : Répartition des accidents du CTn Bois selon le siège des lésions.

### 3. RISQUE MACHINES<sup>7</sup>

Il n'est pas possible, ni par les données statistiques publiées annuellement par la CNAMTS, ni par la base de données EPICEA recensant les accidents analysés par les Caisses Régionales d'Assurance Maladies, de connaître précisément les accidents survenus sur les machines semi-automatisées du secteur bois. Toutefois, les chiffres donnés ci-dessous permettent de mieux cerner les problèmes à un niveau supérieur, celui des machines.

Dans les industries du bois, les machines sont à l'origine de plus d'un accident sur sept, mais surtout de plus d'un accident avec incapacité permanente sur trois. Elles constituent donc la principale source de gravité des accidents pour le secteur (plus d'un accident sur machine sur six conduit à une incapacité permanente, soit 36% du taux d'IP du secteur).

#### a) RISQUE MACHINES / AUTRES RISQUES

Parmi les autres causes d'accidents du secteur bois, il faut noter les accidents de manutention manuelle et de chutes de hauteur qui représentent respectivement 37% et 18% des accidents avec arrêt (Figure 13) qui conduisent, dans environ 18% des cas, à des IP.

	TOTAL	Chutes de plain pied	Chutes de hauteur	Manutention manuelle	Masse en mouvement	Manutention mécanique	Véhicules	Machines	Engins TP	Outils	Appareils divers	Electricité	Autres
AT - Arrêt	26125	4 617	1 596	9 586	2 240	1 035	258	3 800	12	2 149	509	30	293
AT - IP	1961	239	144	528	100	75	42	674	1	107	19	3	29
Décès	18		2		1	1	6	4				1	3
Jours IT	825897	146 437	79 636	271 379	50 741	36 785	14 778	162 585	577	42 531	10 773	710	8 965
Taux IP	17250	1 602	1 551	3 640	819	594	1 178	8 190	10	679	199	113	675

Figure 13 : Principales causes des accidents du secteur bois en 1993.

<sup>7</sup> Le "risque machine" est un abus de langage nous permettant de réduire volontairement l'intitulé normal : "risque imputables aux machines" afin de simplifier la rédaction.

Par comparaison, le risque machine de l'ensemble des comités techniques en 1991, se situe au 4<sup>ème</sup> rang des causes d'accidents ayant entraîné une incapacité permanente derrière les manutentions manuelles, les chutes de hauteur et les chutes de plain pied.

### b) CTN BOIS / ENSEMBLE DES CTN

Par comparaison, le nombre des accidents survenus à cause des machines est beaucoup plus important dans le secteur bois que dans l'ensemble des secteurs industriels confondus. Cela s'illustre par le graphique suivant (Figure 14) qui positionne le nombre d'accidents (en milliers) recensés de 1990 à 1995 survenues sur machines par rapport au nombre total d'accidents survenus (qu'elles qu'en soient les causes) à la fois dans le secteur bois et dans l'ensemble des CTn.

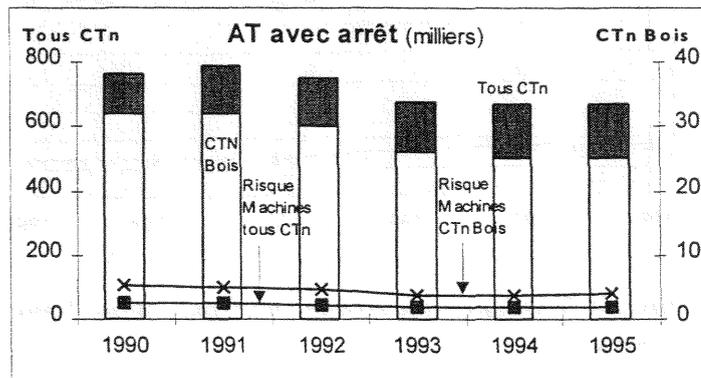


Figure 14 : Nombres (en milliers) d'accidents, liés au risque machines pour l'ensemble des CTn et le CTn Bois.

Cette différence est encore plus importante lorsque l'on visionne sur un même graphique (Figure 15) les sommes des taux des incapacités permanentes des accidents survenus de 1990 à 1995 à la fois pour le CTn Bois et l'ensemble des CTn, en distinguant les taux d'incapacités permanentes liés aux accidents survenus sur machines.

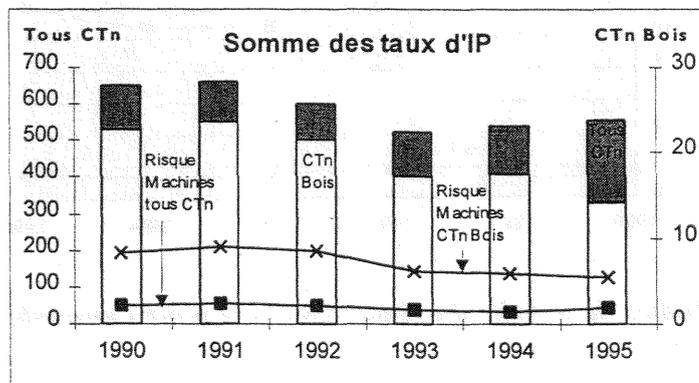


Figure 15 : Sommes (en milliers) des IP des accidents, liés au risque machines pour l'ensemble des CTn et le CTn Bois.

### c) EVOLUTION DU RISQUE MACHINE

Il faut tout de même relever l'évolution de ce risque machine tous comités techniques confondus, qui n'a cessé de diminuer durant ces 25 dernières années. Pour ce qui est du taux de fréquence machine<sup>8</sup> pour le CTn Bois, la tendance est la même. Il est difficile de comparer les valeurs plus anciennes avec celles de l'année 1995, en effet, cette année là certaines catégories du CTn Bois ont été affectées au CTn "Caoutchouc Papier Carton", ce qui modifie considérablement les données (notamment le nombre de salariés concernés).

Nous pouvons tout de même voir sur le graphique suivant (Figure 16), que le CTn Bois possède un taux de fréquence machine très élevé par rapport à celui de l'ensemble des CTn.

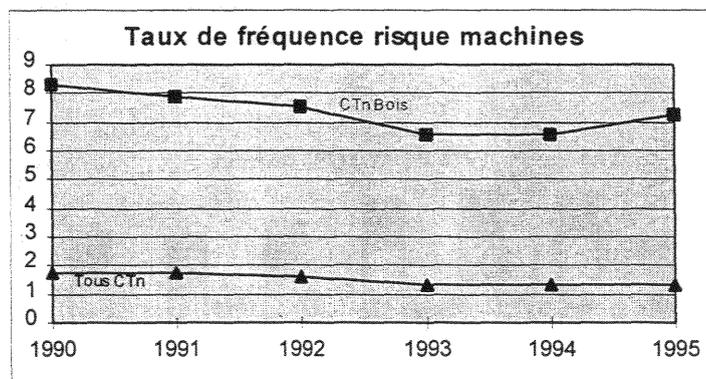


Figure 16 : Taux de fréquence du risque machines pour l'ensemble des CTn et le CTn Bois.

L'indice de gravité machine<sup>9</sup> bois, tout comme le taux de fréquence machine bois, est élevé comparativement à l'ensemble des CTn (Figure 17).

La même remarque que pour le taux de fréquence est à effectuer pour l'année 1995 concernant le CTn Bois.

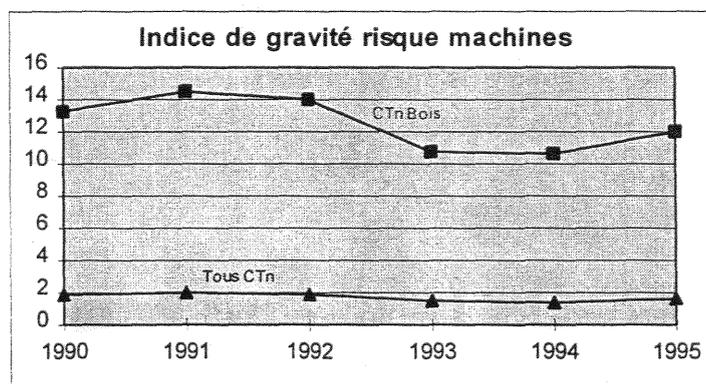


Figure 17 : Indice de gravité du risque machine pour l'ensemble des CTn et le CTn Bois.

<sup>8</sup> **Taux de fréquence machine** : rapport du nombre d'accidents dus aux machines sur le nombre d'heures travaillées en million.

<sup>9</sup> **Indice de gravité machine** : rapport entre la somme des taux d'IP attribuée au titre des séquelles subsistantes suite à un accident survenu sur machines, et la durée d'exposition au risque (million d'heures travaillées)

### d) ACCIDENTS SURVENUS SUR SITES AUTOMATISES

Comme nous l'avons dit en introduction de ce chapitre, il n'est pas possible, à partir des données statistiques de la CNAMTS, d'identifier précisément les accidents survenus sur les machines semi-automatisées (et donc sur les défonceuses à commande numérique) du secteur bois. Cependant, une étude menée à l'INRS par le service ESS<sup>10</sup> en 1989 [VAUTRIN\_89], portant sur 54 cas d'accidents survenus sur systèmes automatisés et semi-automatisés, permet de mettre en évidence le type d'accidents qui surviennent particulièrement sur ces machines. Parmi les conclusions de cette étude, "qu'il est nécessaire d'appréhender d'une façon qualitative en s'attachant aux tendances plutôt qu'aux valeurs numériques", il est à noter que (Figure 18) :

- les accidents mettant en cause les systèmes automatisés ou semi-automatisés sont généralement très graves (voir fatals),
- les accidents surviennent principalement lors d'une intervention suite à un incident,
- la victime était principalement d'une part l'opérateur et d'autre part les intervenants lors d'opérations d'installation, de réglage et de maintenance.

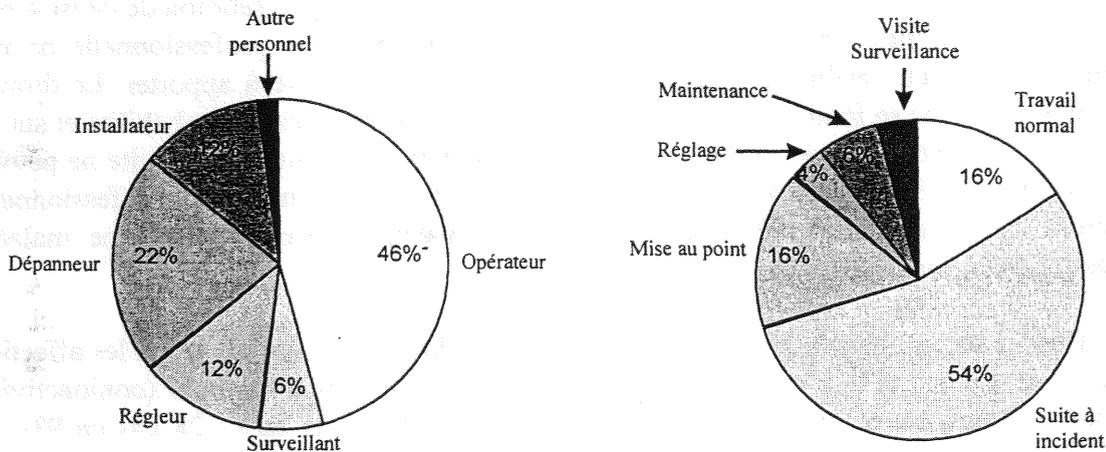


Figure 18 : Répartition des accidents selon l'accidenté et son activité.

La conclusion la plus importante de cette étude est qu'il aurait été possible, selon les auteurs, d'éviter l'accident par une meilleure conception du système dans 80% des cas. Se pose déjà la question de comment améliorer la conception et surtout la prise en compte de la sécurité dans cette conception ?

Comme nous l'indique les auteurs, nous relativiserons fortement ces résultats, tout en nous rappelant leurs conclusions facilement transposables à notre étude des défonceuses à commande numérique.

<sup>10</sup> ESS : Electronique - Sécurité des Systèmes.

## 4. MALADIES PROFESSIONNELLES

L'accident du travail est un fait matériel fortuit provoquant une lésion corporelle généralement simple à constater. C'est un événement qui s'est passé à un endroit précis et à un moment connu. Ainsi, la preuve de la relation entre le dommage corporel subi et le fait qui l'a provoqué, c'est-à-dire la relation "de cause à effet", est le plus souvent facile à apporter.

Une maladie professionnelle est la conséquence de l'exposition plus ou moins prolongée à un risque qui existe lors de l'exercice habituel de la profession. Ce peut être, par exemple, l'inhalation quotidienne de petites doses de poussières ou de vapeurs toxiques, l'exposition répétée à des agents physiques (bruit, vibrations, ...), la répétition à une cadence plus ou moins élevée de mouvements toujours identiques, couplée à un port de charge plus ou moins important entraînant des affections périarticulaires.

Il est presque toujours impossible de fixer exactement le point de départ de la maladie, d'autant plus que certaines maladies professionnelles peuvent ne se manifester que des années après le début de l'exposition au risque et même parfois très longtemps après que le travailleur ait cessé d'exercer le travail incriminé. De plus, la cause professionnelle de la maladie est rarement évidente et il est parfois très difficile de retrouver parmi les multiples produits manipulés, celui ou ceux qui peuvent être responsables des troubles constatés.

Dans ces conditions, les données concernant le lieu, la date et la relation de cause à effet sont souvent difficiles à préciser et la "matérialité" d'une maladie professionnelle ne peut généralement pas être établie par la preuve qui est toujours difficile à apporter. Le droit de réparation doit donc se fonder sur des critères médicaux et techniques de probabilité et sur des critères administratifs de présomption. Les chiffres qui vont être donnés à la suite ne peuvent donc refléter un état précis à un moment donné de toutes les maladies professionnelles déclarées chez les salariés : ils correspondent aux maladies reconnues comme maladies professionnelles lors de l'année citée.

Dans le secteur bois, outre les affections périarticulaires (142 cas en 93) et les affections causées par les bruits (31 cas en 93), des affections causées par les bois (conjonctivites, rhinites, asthmes, cancer primitif de l'ethmoïde et des sinus de la face : 28 cas en 93), des dermatites dues aux résines époxydiques (15 cas en 93), des affections dues aux isocyanates organiques (11 cas en 93) plus quelques autres cas (41 en 93), sont reconnus chaque année comme maladies professionnelles.

Nous trouvons sur le graphique ci-après (Figure 19) l'évolution du nombre de ces maladies professionnelles. L'année 1995 ayant subi une répartition différente des activités du CTn bois, ne permet pas d'avoir des chiffres comparables avec les années précédentes.

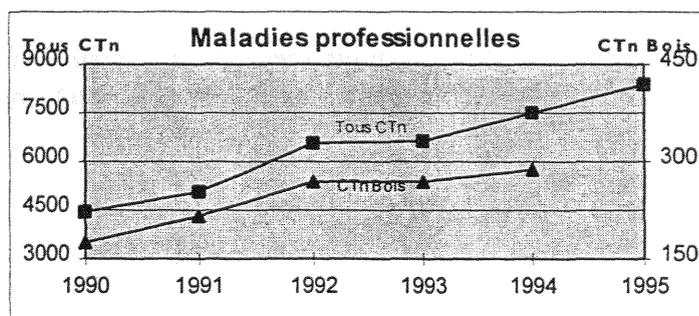


Figure 19 : Evolution du nombre de maladies professionnelles de l'ensemble des CTn et du CTn Bois.

L'augmentation du nombre des maladies professionnelles du secteur bois est comparable à celle de l'ensemble des CTn. Cette tendance s'explique notamment par l'augmentation du nombre de maladies reconnues professionnelles liées aux affections périarticulaires (plus de la moitié des cas de maladies professionnelles de l'ensemble des CTn et en augmentation de plus de 1 000 nouveaux cas en 1996). En effet, auparavant, ces maladies professionnelles, liées principalement aux mouvements répétitifs, n'étaient pas aussi nombreuses. Cela peut s'expliquer par les mouvements qui deviennent de plus en plus rapides et nombreux au cours d'une même journée de travail, mais aussi par le fait que depuis quelques années, les salariés sont de plus en plus sensibilisés aux conséquences du non soin de telles affections.

## 5. ACCIDENTS DU TRAJET

Les accidents survenus pendant le trajet aller-retour entre le domicile et le lieu de travail, le lieu de travail et le lieu habituel des repas, sont des accidents du trajet. 75 611 accidents du trajet dont 571 décès étaient à dénombrer en 1995.

Etant donné que cette donnée statistique ne permet pas de distinguer le secteur bois des autres CTn, nous ne détaillerons pas plus ce point.

## 6. DECES

Le nombre des victimes décédées dans le cadre de leur activité professionnelle est décroissant depuis 1990. Il s'élève en 1995 à 1 696. Le secteur bois dénombre moins de 20 décès par année ceci depuis 1992 (Figure 20).

Le nombre de décès indiqué ici comprend les décès survenus avant et après consolidation pour ce qui est de l'ensemble des CTn alors que pour le CTn Bois, le nombre correspond aux décès avant consolidation suite à accidents ou à maladie professionnelle (les accidents du trajet se concluant par un décès ne sont pas dénombrés dans les données du CTn Bois ni les décès après consolidation).

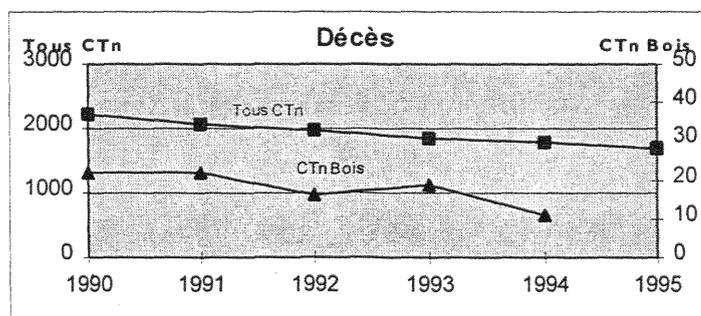


Figure 20 : Variation du nombre de décès pour l'ensemble des CTn et du CTn Bois.

## **7. COUT DES ACCIDENTS DU TRAVAIL**

Dans les industries du bois, la masse des prestations inscrites au titre des incapacités temporaires, des indemnités en capital et des capitaux représentatifs des rentes s'élève à 536 millions de francs pour l'année 1993. Ces prestations déterminent le coût direct des accidents du travail et des maladies professionnelles dont sont redevables les employeurs soit 777 millions de francs pour l'année 1993.

Le coût moyen brut d'accident selon sa conséquence s'élève, pour l'année 1993, à 10 500 F pour une incapacité temporaire, à 9 140 F pour une incapacité permanente inférieure à 10% et à 426 800 F pour une incapacité permanente supérieure à 10 %.

Les décès réglés en 1995 sont représentés statistiquement par un capital égal à 26 fois le salaire annuel minimum en vigueur à la date de l'accident, soit un montant moyen pour l'ensemble des CTn de 2 333 939 F par accident.

## **8. EN RESUME**

En résumé, nous pouvons donner comme chiffres clés à retenir concernant le comité technique bois, les valeurs suivantes :

- un salarié sur onze a été accidenté du travail au cours de l'année 1996 (dernière année où les statistiques sont disponibles actuellement),
- dans 80% des cas d'accidents, l'opérateur a subi des lésions au niveau des membres et du tronc et dans 40% des cas, ces lésions étaient localisées au niveau des mains
- les machines à bois sont à l'origine d'un accident sur sept et d'un accident avec incapacité permanente sur trois du CTn bois,
- les maladies professionnelles du secteur bois sont principalement liées aux affections périarticulaires, au bruit et aux poussières de bois,
- en 1993, le coût direct à la profession bois des accidents du travail, des maladies professionnelles et des accidents du trajet s'élevait à 777 millions de francs,
- en 1995, un décès aura coûté en moyenne plus de 2 million de francs.

### **III. CONTEXTE REGLEMENTAIRE**

#### **1. INTEGRATION DE LA SECURITE A LA CONCEPTION**

Ce concept d'intégration des exigences de sécurité à la conception des systèmes de production s'est d'abord matérialisé en France. Auparavant, les mesures prises par les états afin d'assurer la sécurité des personnes travaillant avec des machines, faisaient principalement appel à des adjonctions, des améliorations de la part de l'utilisateur. C'est seulement vers les années 80, que les exigences réglementaires françaises s'adressent non plus à l'utilisateur mais aux concepteurs et constructeurs. Par les décrets de 80, le principe d'intégration de la sécurité dans la conception de l'ensemble des machines était alors consacré par des mesures législatives et réglementaires [Lacore\_93].

En vue d'arriver à un marché unique au niveau européen, la commission des communautés a, au début de l'année 1986 [Van Gheluwe\_93], commencé à travailler à l'élaboration de la directive relative aux machines 89/392/CEE [Dir\_89/392/CEE]. Cette directive, adoptée par le conseil des ministres le 14 juin 1989, concernant le rapprochement des législations des états membres relative aux machines, s'appuie totalement sur le concept d'intégration de la sécurité à la conception des machines que l'on nomme communément "la nouvelle approche". Ce texte, concernant les machines fixes et les machines portatives, a été modifié et complété une première fois en 1991 par la directive 91/368/CEE [Dir\_91/368/CEE] élargissant le champ d'application aux machines destinées aux levages des charges et une seconde fois en 1993 par la directive 93/44/CEE [Dir\_93/44/CEE] y adjoignant les machines destinées aux levages des personnes. En 1998 a été procédé à une codification de ladite directive au travers de la directive 98/37/CE [Dir\_98/37/CE].

La "directive machines" est maintenant en application dans tous les états membres qui l'ont transposée en droit national depuis 1995 et il incombe, depuis cette date, aux concepteurs d'appliquer les exigences essentielles de sécurité listées dans cette directive. Respectant ces exigences, ils ont alors la possibilité de vendre librement leurs machines dans l'ensemble de l'union européenne.

La "directive machines" tout comme la réglementation française de juillet 1980, énonce des objectifs sans donner les moyens de les atteindre. Pour illustrer cette double évolution, Lacore [Lacore\_93] compare les titres de deux éditions (1975 et 1988) d'un document normatif britannique (code of practice BS 5304) considéré pendant longtemps au royaume Uni comme la référence la plus importante pour les concepteurs de machines en soulignant que le titre de 1975, "Safeguarding of machinery", correspond strictement à la notion de "mesures de sécurité", alors que le titre de l'édition révisée en 1988, "Safety of machinery", est beaucoup moins restrictif et prend en compte l'idée d'intégration de la sécurité à la conception des machines.

Depuis le début de ce paragraphe, nous employons le terme de machine sans l'avoir défini. La directive machines apporte une définition :

*"Une machine est un ensemble de pièces ou d'organes liés entre eux dont au moins un est mobile et, le cas échéant, d'actionneurs, de circuits de commande et de puissance, etc., réunis de façon solidaire en vue d'une application définie, notamment pour la transformation, le traitement, le déplacement et le conditionnement d'un matériau.*

*Est également considéré comme "machine" un ensemble de machines qui, afin de concourir à un même résultat, sont disposées et commandées de manière à être solidaires dans leur fonctionnement.*

*Est également considéré comme "machine" un équipement interchangeable modifiant la fonction d'une machine, qui est mis sur le marché dans le but d'être assemblé à une machine ou à une série de machines différentes ou à un tracteur par l'opérateur lui-même, dans la mesure où cet équipement n'est pas une pièce de rechange ou un outil."*

Sous ce terme de "machines" sont donc regroupés aussi bien les machines à aménagement manuel (toupies, dégauchisseuses) que les machines semi-automatiques (défonceuses à CN, sculpeuses automatiques), les machines unitaires que les ensembles flexibles de production.

Les machines relevant de cette directive doivent donc satisfaire à une liste d'exigences essentielles de sécurité et de santé dans l'esprit d'intégration de la sécurité à la conception. Elles "doivent par construction être aptes à assurer leur fonction, à être réglées, entretenues sans que les personnes soient exposées à un risque lorsque ces opérations sont effectuées dans les conditions prévues par le fabricant." Le fabricant, pour prendre des mesures supprimant les risques d'accidents pouvant survenir durant toute la vie de la machine (y compris les phases de montage et démontage), doit appliquer les principes suivants dans l'ordre indiqué :

- éliminer ou réduire les risques,
- prendre les mesures de protection nécessaires vis à vis des risques ne pouvant être éliminés,
- informer les utilisateurs des risques résiduels, des formations particulières et des équipements de protection individuel nécessaires.

Pour aider les fabricants à concevoir des machines conformes aux exigences de ces directives européennes, divers groupes de travail (comprenant des fabricants, des utilisateurs, des centres de recherche et de prévention) élaborent, au sein d'instances de normalisation, des textes formulant des spécifications techniques applicables aux diverses machines ou composants de machines visés par une directive européenne.

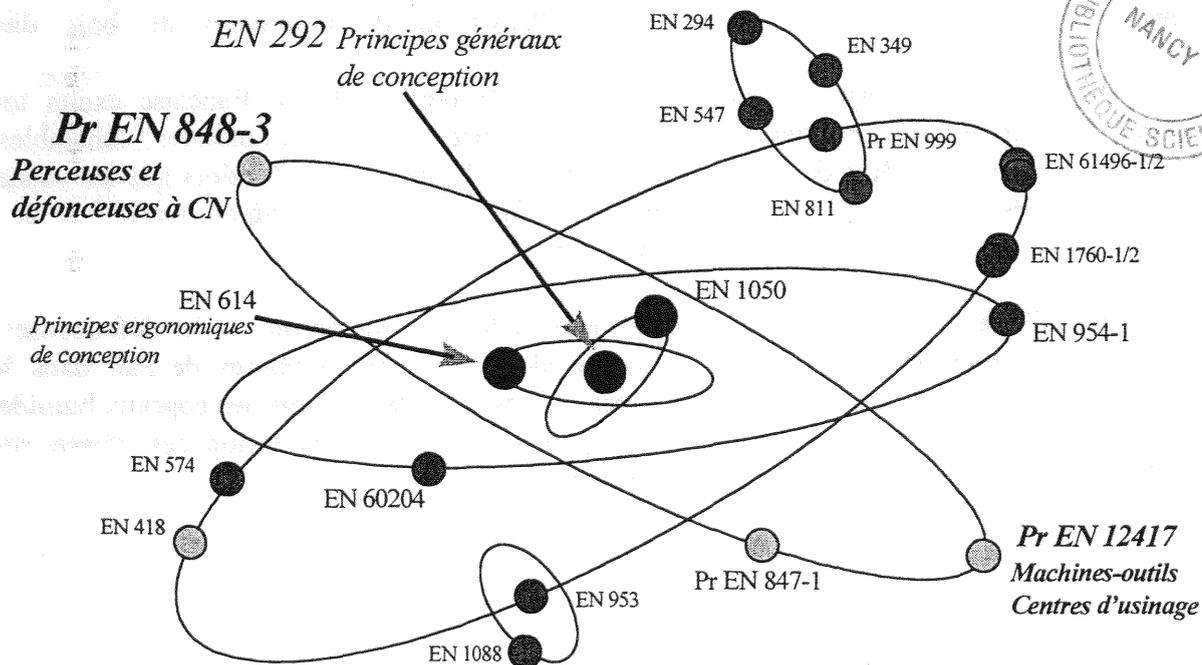
Les normes produites par ces groupes de travail, sont classées en trois catégories selon leur portée :

- **normes de type A** : normes donnant des spécifications relatives à des concepts fondamentaux, notamment de sécurité, s'appliquant à tous types de machines de la même façon (*normes de base*),
- **normes de type B** : groupe de normes (*normes d'ensemble*) divisé en deux sous-groupe :
  - normes de type B1** : normes donnant des spécificités techniques relatives à des aspects spécifiques de sécurité applicables à un grand nombre de machines,

**normes de type B2** : normes donnant des spécifications techniques relatives à des composants de systèmes de sécurité pouvant être utilisés pour différents types de machines,

- **normes de type C** : normes donnant des spécifications techniques relatives à des prescriptions de sécurité applicables à une machine ou à un groupe de machines elles sont cohérentes avec les normes de types A, B1 et B2 applicables à cette machine ou à ce groupe de machines, et elles incluent la liste des risques traités (*normes produit*).

C'est ainsi, qu'un groupe de travail a élaboré un projet de norme, de type C, spécifiquement pour les défonceuses à commande numérique [*pr EN 848-3*]. Ce projet de norme prend en compte des risques de nature diverse tels que les risques mécaniques, électriques, thermiques, les risques engendrés par le bruit, les vibrations, et les émissions de particules. Il fait référence à d'autres normes plus génériques s'appliquant à tous types de machines (ex : *EN 292 : Notions fondamentales, principes généraux de conception des machines*), ainsi qu'à des normes plus spécifiques à une partie de machine (ex : *EN 60204-1 : équipement électrique pour les machines industrielles*), s'appliquant, en particulier, aux défonceuses. Ainsi, le concepteur de défonceuses, se trouve, par références successives, dans un *univers* normatif (Figure 21), lui prescrivant diverses solutions techniques en réponse aux problèmes qui sont les siens lors de la conception.



**Figure 21 : Normes européennes relatives à la sécurité des défonceuses<sup>11</sup>**

Cet univers est constitué d'un certain nombre de normes applicables selon la machine visée. Ces normes gravitent autour d'une norme unique de type A, fondamentale, décrivant les "*principes généraux de conception*". Ensuite, viennent différentes normes de type B, à

<sup>11</sup> : Les références bibliographiques des normes présentes sur ce schéma, sont toutes données dans un paragraphe particulier de la bibliographie.

proximité de cette norme fondamentale (EN 292) pour définir "les principes pour l'appréciation du risque" (EN 1050), "les principes ergonomiques de conception" (EN 614). Une troisième orbite est constituée des normes portant sur les "parties des systèmes de commande relatifs à la sécurité" (EN 954) et les "équipements électriques des machines" (EN 60204). La quatrième orbite rassemble des normes de type B relatives aux composants de sécurité utilisables sur les défonceuses à commande numérique. Nous trouvons ainsi, les normes sur les dispositifs de détection d'intrusion de personne (EN 1760 : Tapis et planchers sensibles, EN 61496 : Barrages immatériels), sur les distances de sécurité (EN 999 avec ses satellites), sur les boutons d'arrêt d'urgence (EN 418), les commandes bimanuelles (EN 574), sur les protecteurs mécaniques (EN 953 et EN 1088). La dernière orbite, la plus éloignée du "soleil" (EN 292), positionne les normes de type C plus spécifiques au secteur bois avec la norme sur les défonceuses (EN 848-3), une norme sur les centres d'usinage (prEN 12417) et une norme sur les outils à fraiser (prEN 847-1).

## 2. REGLES PARTICULIERES EN MATIERE DE VENTILATION

Parmi les risques spécifiques à l'industrie du bois, nous pouvons, dès à présent parler de celui lié aux poussières de bois. L'ensemble des machines à bois set pourvu de système de captage propre leur permettant de limiter l'émission de poussières de bois dans l'environnement de travail.

En terme de captage des particules de bois, la réglementation française exclut tout système de captage ne permettant pas d'abaisser les concentrations de poussières<sup>12</sup> inhalables<sup>13</sup> au poste de travail en deçà de  $1 \text{ mg/m}^3$  (ceci depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1997), alors que les valeurs réglementaires européennes demeurent de  $10 \text{ mg/m}^3$  pour les poussières totales<sup>14</sup> et de  $5 \text{ mg/m}^3$  pour les poussières alvéolaires<sup>15</sup> [Circulaire\_91-14].

Afin d'évacuer au mieux les particules de bois, le projet de norme sur les défonceuses à commande numérique [pr EN 848-3] recommande des vitesses linéaires de l'air dans les conduits d'évacuation de 20 m/s pour les copeaux secs et de 28 m/s pour les copeaux humides. Pour un système captant les particules au plus près de leur source d'émission, ces vitesses sont suffisantes pour assurer l'évacuation des particules.

---

<sup>12</sup> : Est considérée comme *poussière* toute particule solide dont le diamètre aérodynamique est au plus égal à  $100 \mu\text{m}$  ou dont la vitesse limite de chute, dans les conditions normales de température, de pression et d'humidité relative est au plus égale à 0,25 m/s.

<sup>13</sup> : *Fraction inhalable* : Fraction massique des particules totales en suspension dans l'air, inhalées par le nez et la bouche.

<sup>14</sup> : Les *poussières totales* sont l'ensemble des particules en suspension dans l'air.

<sup>15</sup> : La *fraction alvéolaire* correspond aux poussières pouvant pénétrer dans la région alvéolaire où ont lieu les échanges gazeux.

## IV. APPROCHES SOCIO-TECHNIQUES

Comme nous venons de le voir, les risques liés aux machines et à leur exploitation sont à prendre en compte au plus tôt de leur conception. Tout comme l'accident qui est à considérer à partir du moment où une personne est impliquée dans une chaîne d'événements particuliers (cet aspect théorique de l'accident sera présenté au chapitre "*Processus accidentel*" dans la seconde partie de ce mémoire), un système aussi automatisé qu'il soit comporte une part de son exploitation qui est confiée à un ou plusieurs hommes. Nous allons, dans cette partie appréhender la part dédiée à l'homme, aborder son évolution dans le temps et quelles approches ont été employées pour prendre en compte cet aspect dans les systèmes de production.

Dans le passé, l'efficacité passait nécessairement par la productivité du travail s'appuyant sur des principes de coordination et de contrôles verticaux.

Suite à une diversification des gammes de produits dans les années 20, une compétition tournée vers la nécessaire flexibilité et l'innovation dans les années 70 (ère de la commande numérique), une robotisation et une automatisation dans les années 80, l'informatisation des moyens de production est apparue. Les progrès spectaculaires enregistrés ces dernières années de la part des capacités des automatismes n'ont pas permis, tout comme dans le passé, d'écarter totalement l'homme de l'exploitation ni de la conception des systèmes opérationnels. Durant chacune de ces étapes qui ont vu l'augmentation de la technologie, des potentialités des machines et systèmes automatisés, l'homme s'est affranchi des tâches les plus ingrates, mais il est resté acteur du système en accédant à un niveau supérieur de décision. Un nouvel équilibre est chaque fois apparu se traduisant par la promotion des capacités humaines.

Aujourd'hui, face à une concurrence accrue et mondialisée, pour être compétitives, les entreprises doivent privilégier des organisations facilitant la réactivité et la flexibilité, la diminution de la taille des séries, le travail en juste à temps, la personnalisation des produits, ... Cela exige des modes de coopération et de communication plus ouverts, une hiérarchie plus réduite, et une valorisation plus importante du travail humain et des savoir-faire mis en oeuvre.

Nous allons présenter deux approches totalement différentes qui ont été la base de nombre de développements et de méthodes d'exploitation, mais qui, excessives, ne permettent pas de prendre en compte correctement les aspects spécifiques des systèmes automatisés et des hommes travaillant sur ces systèmes.

On s'apercevra plus tard que l'optimisation et la fiabilisation de ces nouvelles technologies dépend énormément de la qualité des démarches d'ingénierie, mais aussi de l'organisation, de l'exploitation et de la prise en compte du facteur humain dans la conception de tels systèmes.

L'élément nouveau dans la confrontation actuelle entre l'homme et la machine, est l'accès de cette dernière à une capacité de calcul prodigieuse, à un embryon de raisonnement et à l'assimilation d'un très grand nombre de données en un temps infiniment court. En un

temps quasi-réel elle est maintenant capable d'effectuer des recoupements, des vérifications. Cela renforce la conviction selon laquelle, sous prétexte de rechercher une efficacité toujours plus importante, la machine apparaît l'emporter sur l'homme. Cependant, dans de nombreux cas, l'homme, par sa capacité d'initiative, sa faculté de réaction à une situation inattendue, s'est avéré déterminant pour maintenir la performance, assurer la disponibilité et prévenir l'incident. On n'a pas la même visibilité des catastrophes évitées par l'homme que de celles pour lesquelles il est mis en cause. C'est dommage car il serait alors possible de montrer la place importante qu'a l'homme dans les systèmes automatisés.

## 1. APPROCHE TECHNOCENTREE

Comme nous l'avons vu précédemment, l'avance technologique pour chaque entreprise représente un enjeu stratégique et parfois une condition de survie. Les nouvelles technologies sont d'excellents *"arguments marketing qui montrent l'ouverture d'une entreprise, sa foi en l'avenir, son dynamisme, sa compétence dans les technologies sophistiquées, en même temps que sa santé financière"* [Béranger\_87]. Une inévitable complexification des systèmes accompagne cette performance toujours croissante.

Cette approche *"centrée sur la technologie"* a pendant de nombreuses années privilégié des solutions technologiques à première vue plus efficaces et plus "porteuses", même si la mise en place n'en était pas toujours facile en raison des problèmes techniques de mise au point, des longs délais de montée en cadence, de questions de fiabilisation et de maintenance [Micaelli\_90].

Cette nécessité d'augmenter sans cesse les rendements est bien une constante de la culture industrielle. Irion [Irion\_90] prétendait que *"l'entreprise industrielle du futur est d'abord l'entreprise qui sait suivre et anticiper l'évolution des besoins et des attentes des marchés"*. Pour ce faire elle doit valoriser les possibilités offertes par les nouvelles technologies.

Les entreprises voient en l'augmentation de leur automatisation un moyen de répondre à cette logique. Elles se jettent toutes entières dans une complexification de leurs systèmes de production et d'organisation afin d'être encore compétitive demain sur les marchés mondiaux.

L'amélioration du rendement, tant recherchée par les entreprises, est principalement faite à travers [Lhote\_93] :

- > l'intensification des temps unitaires,
- > toujours plus de fonctions dans les systèmes techniques,
- > le choix de solutions intégrées et interconnectées (CIM, réseaux, ...),
- > la réduction des opérations effectuées par des hommes (considérées comme une source majeure d'aléas),
- > des dispositifs automatiques d'alarme remplacent les opérateurs qui assuraient la surveillance de l'installation.

Pour l'opérateur, cette complexification se traduit par un accroissement de sa charge mentale lors de l'exécution des tâches qui lui sont allouées. Dans cette complexification, il voit son rôle se modifier : de contrôleur, manipulateur, son activité évolue vers des tâches de supervision, de régulation, de récupération, de fiabilisation toujours croissante. Par cette complexification, l'homme voit son activité s'alléger des tâches les plus ingrates.

Cependant, l'exploitation révèle souvent un comportement réel de ces installations différent de celui attendu. La complexification de l'installation provoque une baisse de la disponibilité des moyens de production et des résultats en quantité et en qualité. En fait, de tels systèmes, conçus comme une association de systèmes automatiques intégrés, réclament une attention, une prévention et une vigilance humaines importantes. Les considérations technologiques ayant été prises en considération en priorité, les fonctions assurées par les ressources humaines sont sous-estimées. Cette approche technocentrée recherche dans une augmentation encore plus importante de son automatisation à réduire encore le rôle de l'homme sans même vouloir le comprendre et l'intégrer.

De ce constat où l'on s'accorde à dire que les systèmes construits dans une perspective technocentrée sont coûteux en études, vulnérables, souvent rigides et manquant d'autonomie et de réactivité, de nouveaux paradigmes se développent prônant des solutions allégées ("*Lean Manufacturing*") ou centrées sur l'homme ("*Anthropocentric Production Systems*").

## 2. APPROCHE ANTHROPOCENTREE

Cette démarche "*centrée sur l'homme*" est présentée comme une approche interdisciplinaire où la technologie est conçue à partir des attentes des personnels et des organisations qui ont à l'utiliser, s'appliquant à tout le processus de production et concernant tous les aspects de l'entreprise depuis le management stratégique jusqu'à l'organisation du poste de travail en passant par les interactions homme-machine [Ortiz-Hernandez\_95].

Cette démarche considère le système de production comme un système ouvert donnant aux opérateurs une grande marge de liberté pour définir les modes de fonctionnement et les formes d'interactions du système avec son environnement [Wobbe\_92][Lehner\_92].

Ces principes induisent de nouveaux modes d'organisation aux différents niveaux de l'entreprise :

- **au niveau de l'usine** : éclatement de l'usine en unités de production organisées autour d'un type de produit et dotées de ressources humaines et techniques propres,
- **au niveau des services** : organisation caractérisée d'une part, par le décloisonnement des services (coopération et interactivité entre les services), d'autre part, par la délégation d'une partie des responsabilités et des décisions aux niveaux inférieurs de la hiérarchie,
- **au niveau de l'atelier** : organisation en îlots de production avec des équipes semi-autonomes possédant une large part d'initiative dans la gestion de la production,
- **au niveau du poste** : les fonctions de l'opérateur ne sont pas seulement des fonctions exécutrices, mais également des fonctions conceptuelles : planification de son activité, aménagement du poste de travail, programmation des automatismes, maintenance, etc.

Cette approche qui "installe" le savoir-faire de l'opérateur et l'initiative humaine au centre de la conception et de l'exploitation des systèmes techniques, apparaît comme particulièrement séduisante. Cependant, la distribution du pouvoir décisionnel préconisé par cette approche ne va pas sans poser quelques problèmes. En effet, une décision prise en un point du système (en conception par exemple) peut engendrer des contraintes en un autre

point (en production). Chaque entreprise est un système dans lequel sont intégrés des intérêts divergents : techniques, humains et organisationnels. La prise en compte simultanée et coordonnée de ces trois dimensions devient aujourd'hui un enjeu crucial.

### 3. APPROCHE SYSTEME<sup>16</sup> : COOPERATION HOMME-MACHINE

Entre l'approche technologique et l'approche humaine, l'approche système veut se situer à un juste milieu et se centre sur l'interaction entre l'homme et la machine en prenant en compte tant l'aspect technique que l'aspect humain mais également organisationnel et opérationnel de ce couplage entre l'homme et la machine [Iribarne\_96].

Pour faire apparaître complètement les exigences de l'exploitation d'un système par rapport à celles de l'ingénierie, il faut nécessairement travailler selon une démarche socio-technique consistant à :

- analyser les problèmes et les besoins de la production avec les exploitants pour obtenir un diagnostic précis de l'existant,
- utiliser les savoirs et savoir-faire des utilisateurs en les associant à la conception du système automatisé afin d'anticiper au maximum les aléas,
- associer les approches technologiques et opérationnelles afin de créer un système hybride de production constitué d'automatismes et d'hommes.

Aujourd'hui, la technologie permet d'associer efficacement automatismes et opérateurs en répartissant les tâches de chacun : les ressources technologiques assurant les tâches répétitives et routinières ou pénibles, les acteurs humains intervenant pour surveiller et maintenir le régime nominal. Pour cela, ils peuvent mettre en œuvre de formidables capacités :

- d'innovation et de récupération des défauts de manière originale et fiable faisant preuve de créativité pour compenser les limites techniques du système
- d'adaptabilité aux situations contraignantes, aux changements rapides de travail, en sélectionnant les prises d'informations,
- de raisonnement rapide en opérant des "courts-circuits" dans leurs recherches de solutions, ne raisonnant pas de manière systématique mais heuristique,
- de discernement et d'appréciation pour juger qualitativement d'une situation,
- de synthèse et d'interprétation des tendances pour anticiper des dérives dans une réflexion globale sur le système.

Cette association coopérative nécessite toutefois de la part de l'homme, une compréhension plus complète de ce qu'il a à faire, une perception précise et claire de son environnement socio-technique. Les hommes ont besoin de représentations cohérentes et pertinentes concernant les procédés, les produits, les équipements, les systèmes de conduite, ainsi que l'organisation de la production. ainsi il est possible de distinguer la *tâche prescrite*

---

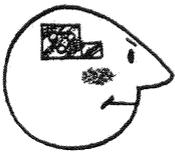
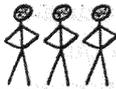
<sup>16</sup> : Nous appelons *système* l'ensemble constituée de l'homme et la machine (ou d'un ensemble de machines ou systèmes techniques).

définie par celui qui en commande l'exécution de la *tâche effective* correspondant à ce qui est effectivement fait par l'opérateur. Les opérateurs se représentant la tâche qu'ils ont à effectuer à partir des situations connues, de leurs propres représentations fonctionnelles, stratégiques et par des critères de réussite. Il y aura donc un tâche effective (ou appropriée [Poyet\_91]) par opérateur qui diffère d'un opérateur à l'autre qu'il faut distinguer au travers :

- de la variabilité inter-individuelle : liée à la personnalité, la qualification, l'expérience, l'état psychologique, la motivation, ... des opérateurs,
- de la variabilité intra-individuelle : suivant l'âge, la motivation (ou plus exactement la démotivation), l'expérience, les attitudes changeant selon la responsabilité, le risque, ...,
- l'état psychologique : fatigue, maladie, préoccupation, ...,
- les facteurs inhérents à la situation : les contraintes temporelles, le stress, l'évolution des capacités au cours d'une journée, les réactions à l'exposition aux risques, ...

Il faut donc intégrer ces notions dans l'analyse de la tâche ("ce qui est à faire") et de l'activité ("ce qui a été réellement fait") [Ortiz-Hernandez\_95], pour tenir compte des facteurs inhérents à la situation et à l'opérateur, afin de pouvoir extrapoler l'analyse vers une situation générique de référence.

Le Tableau 1 permet de comparer les trois approches décrites ci-dessus.

Approche	Types de connaissances	Modes d'actions
<i>Approche technocentrée : approche exclusivement technique</i>	Technique, science de l'ingénieur, technologie des machines et installations 	Sur les machines et installations 
<i>Approche anthropocentrée : approche exclusivement sciences humaines</i>	Sur l'homme, notamment psychologie, sociologie 	Sur l'organisation humaine : management, formation, communication, gestion des ressources humaines 
<i>Approche système : approche ergonomique</i>	Sur l'homme (notamment physiologie et psychologie) et sur son fonctionnement en situation réelle de travail 	Sur les machines, installations, organisation (matérielle, temporelle et spatiale) et systèmes de travail 

**Tableau 1 : Approches technocentrée, anthropocentrée et système.**

Dans les années passées, l'INRS a développé une méthode intitulée MAFERGO<sup>17</sup> se situant entre l'approche technocentrée et l'approche anthropocentrée. MAFERGO propose une démarche méthodologique intégrant les aspects suivants [Neboit\_93] :

- la dimension systémique de l'analyse (par opposition à l'analyse unique du poste de travail),
- l'analyse des dysfonctionnements qui sont et/ou seront de plus en plus objets de l'intervention des opérateurs,
- la dimension cognitive du travail liée à l'utilisation croissante d'outils informatiques et à la complexification des installations automatiques conduites par les opérateurs.

L'objectif de MAFERGO, décrit dans le cadre de "l'analyse et intervention ergonomique sur les systèmes complexes automatisés" [Neboit\_90], est d'améliorer la fiabilité et la sécurité de systèmes socio-techniques en cherchant à réduire les dysfonctionnements du couplage homme-système technique. Cette démarche repose sur deux bases générales : l'analyse système et l'analyse de l'interaction entre l'homme et le système technique. L'ensemble du cadre de principe de la démarche peut être résumé dans le Tableau 2.

- **La première étape d'analyse fonctionnelle** a pour objectifs de décrire le fonctionnement normal du système analysé et de situer la place des différents éléments par rapport à la mission globale. Dans cette étape, l'analyse fonctionnelle de fiabilité permet de décrire le système et le processus de fabrication. L'analyse ergonomique permet de décrire les tâches prescrites et de connaître l'activité réelle. Cette étape sert généralement de cadre de référence pour les étapes suivantes.
- **La deuxième étape d'analyse opérationnelle** vise à évaluer qualitativement (et éventuellement quantitativement) le taux de disponibilité du système. Parallèlement, l'analyse ergonomique décrit les activités spatio-temporelles des opérateurs et permet d'évaluer les taux d'occupations ainsi que les problèmes de planification temporelle liés à la disponibilité du système technique.
- **La troisième étape d'identification et de classement des défaillances** permet de dresser une liste hiérarchisée des dysfonctionnements techniques dont l'impact sur les activités des opérateurs sera mise en évidence par l'analyse ergonomique des activités de récupération.
- **La quatrième étape d'analyse causale des dysfonctionnements** a pour but la mise en graphes causales de scénarios de dysfonctionnements en intégrant, grâce à l'analyse ergonomique parallèle, l'ensemble des événements techniques, humains et organisationnels. La simulation in situ de certains dysfonctionnements permet d'approfondir les activités de récupération mises en jeu.
- **La dernière phase de proposition d'améliorations** et de validation donne des modifications (ou projets de reconception), aussi bien au plan technique, qu'au plan ergonomique et organisationnel. Ces différentes propositions font l'objet de simulations prédictives permettant de les décrire et d'en évaluer l'impact selon les différentes dimensions : efficacité, sécurité, conditions de travail, ...

---

<sup>17</sup> **MAFERGO** : Méthode d'Analyse de Fiabilité et ERGonomique Opérationnelle.

	<i>Analyse fonctionnelle</i>	<i>Analyse opérationnelle</i>	<i>Identification des dysfonctionnements</i>	<i>Analyse causale des dysfonctionnements</i>	<i>Proposition d'améliorations</i>
<i>O b j e c t i f</i>	Analyse structuro-fonctionnelle du système (missions, fonctions, variables, interactions)	Décrire les modes d'exploitation et de fonctionnement du système Taux de disponibilité	Identification des classes de conséquence d'événements initiateurs	Degré de fragilité du système Scénarios générateurs d'événements	Amélioration de la fiabilité et de la disponibilité
<i>E r g o n o m i e</i>	Place de l'opérateur dans le système Tâches prescrites	Planification spatio-temporelle des tâches, Exigences des tâches, contraintes d'environnement	Conséquences des dysfonctionnements sur l'activité	Analyse des scénarios générateurs de contraintes Analyse psycho-ergonomique des erreurs	Amélioration du couplage homme-tâche
<i>F i a b i l i t é</i>	Diagramme bloc Graphe de fluence SADT Arbre fonctionnel	Arbre d'événements Graphe de Markov	Arbre d'événements AMDEC	Arbre de défaillances	Analyse de sensibilité
<i>E r g o n o m i e</i>	Analyse sur documents et interviews Analyse de l'activité	Graphes d'ordonnement Observations Mesures	Analyse des dysfonctionnements du système homme-tâche Observation des activités de récupération	Expérimentation Arbre de défaillances Simulation Verbalisation	Analyse de sensibilité

Tableau 2 : MAFERGO : Méthode d'Analyse de Fiabilité et ERGonomie Opérationnelle (d'après [Fadier\_94]).

Cette méthode, appliquée sur six terrains différents, a été validée selon une grille établie à partir de la méthodologie du "Benchmarking" [Camp\_92]. Parmi les conclusions de cette validation [Fadier\_97], il est impératif, lorsque l'on désire appliquer MAFEGRO, de mettre en oeuvre une double compétence technique et ergonomique avec une importante articulation entre elles, supportée par une approche méthodologique.

Dans la suite de notre travail, et plus particulièrement dans les deux premières étapes d'identification et d'analyse de notre démarche, nous allons travailler dans l'esprit de MAFERGO. Sans appliquer cette démarche de A à Z, les dernières étapes étant mises en oeuvre dans un cadre d'ingénierie concourante, sans utiliser la totalité des outils listés, nous conserverons toujours à l'esprit cette vue méthodologique.

# ***B. IDENTIFICATION ANALYSE***

<b>I. PROCESSUS ACCIDENTEL</b>	<b>39</b>
1. VERS UN MODÈLE DU PROCESSUS ACCIDENTEL	39
a) Phénomène dangereux	39
b) Entité dangereuse	40
c) Risque	41
d) Zone dangereuse	42
e) Zone protégée	44
f) Distance de sécurité	44
g) Situation dangereuse	46
h) Situation potentiellement dangereuse	47
i) Événement critique	48
2. HIÉRARCHIE DES MESURES DE SÉCURITÉ	49
<b>II. MÉTHODES D'ANALYSE DE LA SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT</b>	<b>51</b>
<b>III. ANALYSE ERGONOMIQUE TERRAIN</b>	<b>54</b>
1. LIMITE DE L'INTERVENTION	54
2. LA SITUATION DE TRAVAIL	55
3. ETUDE DES ACCIDENTS ET INCIDENTS	56
a) Accidents déclarés	56
b) Incidents ou dysfonctionnements observés	56
c) Synthèse	59
4. DONNÉES RECUEILLIES	59
5. ELÉMENTS DE DIAGNOSTIC ERGONOMIQUE	60
a) Compétences et savoir-faire des régleurs	60

b) Activités de prévention mises en oeuvre par les opérateurs	61
c) Difficultés ou risques issus de la machine	63
d) Difficultés ou risques issus de l'organisation	64
6. BILAN	65

**IV. MODÉLISATION FONCTIONNELLE HOMME-MACHINE** \_\_\_\_\_ **67**

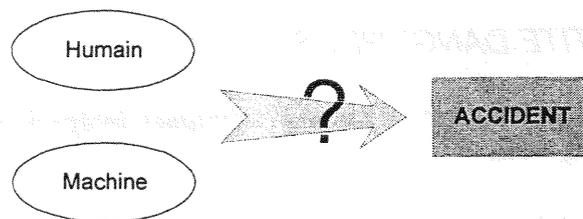
1. FORMALISME DE MODÉLISATION	67
2. ELÉMENTS MODÉLISÉS	68
3. BILAN	74

# I. PROCESSUS ACCIDENTEL

Après avoir parlé d'accidents et avoir donné quelques éléments permettant de dénombrer les accidents survenus dans le secteur bois, il nous paraît nécessaire d'analyser les différentes étapes, génériques, qui conduisent à un accident. Cette analyse est effectuée dans le principal but d'identifier, pour chacune des étapes, des actions que le concepteur ou l'utilisateur peut mettre en œuvre pour éviter l'accident.

## 1. VERS UN MODELE DU PROCESSUS ACCIDENTEL

Un modèle théorique d'enchaînement d'événements conduisant à l'accident peut mettre en évidence la multicausalité des accidents (Figure 22).



*Figure 22 : Vers un modèle théorique d'accident.*

Nombre de modèles existent [Gauthier\_97] mais sont souvent complexes et ne présentent pas simplement l'enchaînement conduisant à l'accident.

Pour palier à ces inconvénients, nous allons analyser à la fois les éléments à l'origine des accidents et l'enchaînement possible conduisant des risques à l'accident<sup>18</sup>. Nous allons, pour ce faire, définir quelques notions particulières que l'on va illustrer par des exemples qui nous l'espérons, pourront éclairer les définitions.

### a) PHENOMENE DANGEREUX

*Cause capable de provoquer une lésion ou une atteinte à la santé [EN 292-1§3.5].*

Les phénomènes dangereux sont de nature physique, associés à des matières, des énergies, des vibrations, des radiations, des mouvements, des actions. Ce sont les causes à l'origine des risques.

*Exemple de phénomènes dangereux :*

- ~ Mouvement d'une table de travail,
- ~ Mauvaise fixation d'une pièce sur son montage,

<sup>18</sup> Les notions qui seront présentées dans cette partie, ont émergé suite à l'exposé de C. MERLAUD en octobre 1995 au séminaire des spécialistes électromécaniciens au centre de formation de l'INRS à Neuves-Maisons.

- ~ Auto-inflammabilité des poussières de bois sous certaines conditions,
- ~ Nature "corrosive" de certains produits chimiques.

Il est possible d'identifier sur la machine à bois à CN plusieurs phénomènes dangereux : mouvement de table (Figure 23), déplacement de l'outil, rotation de l'outil, fluide sous pression, ...

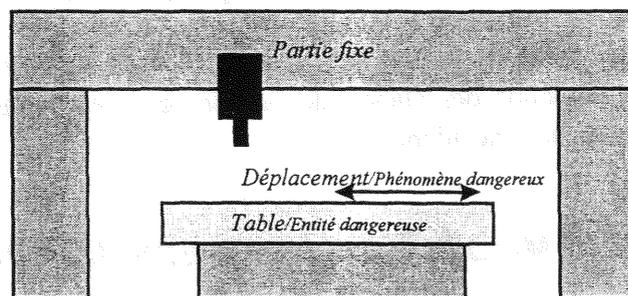


Figure 23 : Phénomène dangereux lié au déplacement de la table de la MOCN<sup>19</sup>.

## b) ENTITE DANGEREUSE

Les entités dangereuses sont les éléments techniques intégrant une, ou plusieurs source(s) de phénomènes dangereux.

### Exemple d'entité dangereuse :

- ~ Machine,
- ~ Axe d'une machine (pouvant être à l'origine de risque de type mécanique),
- ~ Conteneur de matières dangereuses (par exemple un réservoir de fluide sous pression),
- ~ Actionneurs.

Une entité peut être placée/mise dans un état non dangereux par suppression du phénomène dangereux.

### Exemple d'entité dangereuse dans un état non dangereux :

- ~ Elévateur verrouillé et condamné,
- ~ Machine consignée et déconnectée de toutes ses sources d'énergies (en particulier l'apesanteur), ...

Nous pouvons ainsi décrire les machines outils à commande numérique (MOCN) comme étant des entités dangereuses. Il est possible, à un niveau plus détaillé, de caractériser d'entité dangereuse la table (Figure 24), l'outil, la pièce, ... Dans l'exemple de la table, celle-ci est à l'origine de risques bien particuliers, tels que les risques liés aux mouvements (risque d'écrasement, de coincement) et à la forme (risque de coupure sur les arêtes) de cette table.

<sup>19</sup> MOCN : Machine Outil à Commande Numérique.

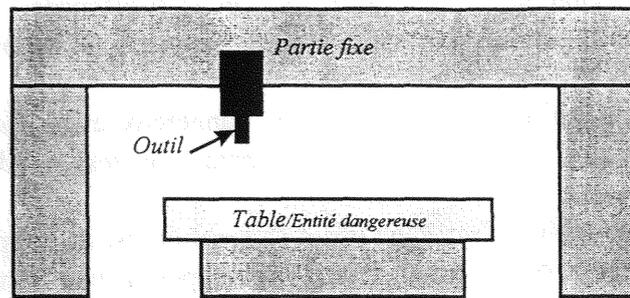


Figure 24 : Identification de l'entité dangereuse "Table".

### c) RISQUE

Combinaison de la probabilité et de la gravité d'une lésion ou d'une atteinte à la santé pouvant survenir dans une situation dangereuse [EN 292-1 §3.7].

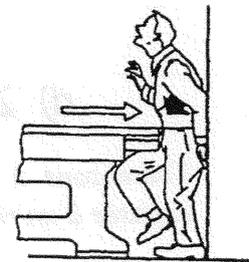
Les risques sont en général associés aux origines et/ou aux effets potentiels des phénomènes dangereux sur les personnes, sur les biens ou sur l'environnement. Dans la norme européenne NF EN 292-1 une liste présente une typologie des risques selon les phénomènes associant une origine (mécanique, électrique, pneumatique, ...) à un effet physiologique sur la personne (cette liste est illustrée ci-dessous).

#### Liste de risques [NF EN 292-1] :

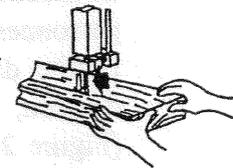
~ Risques mécaniques :

- risque d'écrasement

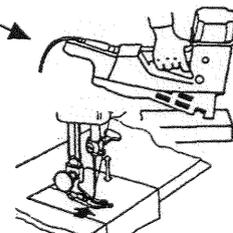
Le risque d'écrasement est un risque d'origine mécanique qui peut conduire à un écrasement d'une partie du corps d'une personne.



- risque de cisaillement,
- risque de coupure ou de sectionnement,
- risque d'entraînement ou d'emprisonnement,
- risque de choc,
- risque de perforation ou de piqûre,
- risque d'abrasion,
- risque d'éjection de fluide sous pression.



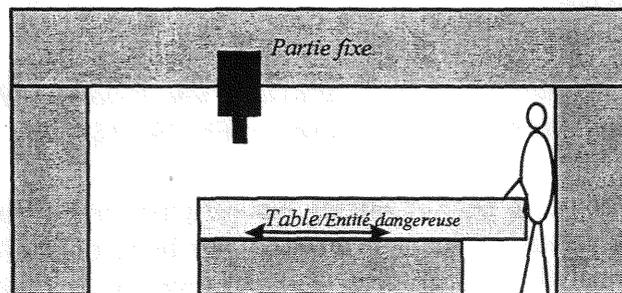
- ~ Risques électriques,
- ~ Risques thermiques (brûlure, ...),
- ~ Risques engendrés par le bruit,
- ~ Risques engendrés par les vibrations,
- ~ Risques engendrés par les rayonnements,



- ~ Risques engendrés par les matériaux et les substances,
- ~ Risques engendrés par le non-respect des principes ergonomiques.

Ainsi, avec les définitions de phénomènes dangereux et de risque, il est possible de mieux cerner l'origine ainsi que les conséquences (nature des lésions) des accidents.

Par exemple, une table de machine (dont la fonction est de supporter les pièces lors de leur usinage), lors de son déplacement relatif par rapport à une partie fixe (supportant par exemple l'outil), peut créer un risque de type mécanique, ayant pour conséquence un coincement de l'opérateur (ou d'une partie de son corps) entre la table et la partie fixe (Figure 25).

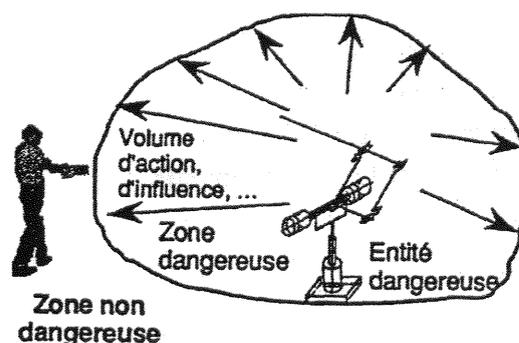


**Figure 25 : Coincement de l'opérateur entre la table (mobile) et une partie fixe de la machine.**

#### d) ZONE DANGEREUSE

Toute zone à l'intérieur et/ou autour d'une machine, dans laquelle une personne est exposée à un risque de lésion ou d'atteinte à sa santé [NF EN 292-1§3.10].

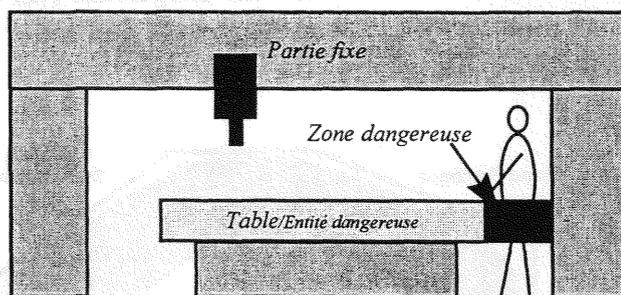
La zone dangereuse définit la délimitation topographique de la zone d'effet ou d'influence potentielle d'un (ou d'un ensemble de) phénomène(s) dangereux sur les personnes, les biens ou l'environnement. Sa délimitation prend donc en compte tant l'entité dangereuse que son environnement pour intégrer les distances et volumes d'action, d'influence, d'atténuation ou de dissémination des phénomènes dangereux (Figure 26). Pour une machine, la zone dangereuse prend en compte l'ensemble des phénomènes dangereux. Elle est la réunion de l'ensemble des zones dangereuses élémentaires liées à chacun des phénomènes dangereux identifiés sur cette machine.



**Figure 26 : Zone dangereuse autour d'un robot.****Exemple de zone dangereuse :**

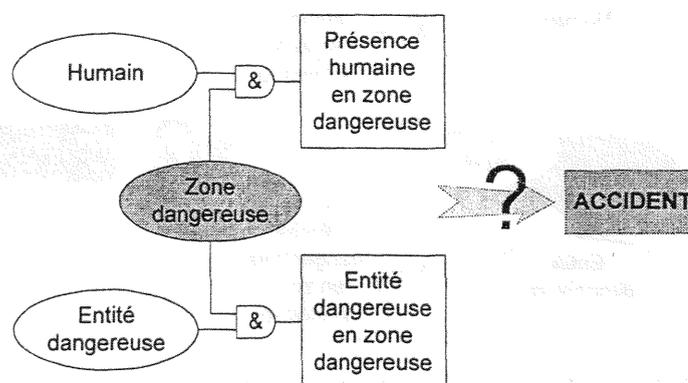
- ~ Volume capable d'un robot, d'un mobile,
- ~ Volume de déplacement d'une table de travail, d'un axe de déplacement d'une machine,
- ~ Zone potentielle de projection ou de chute d'un solide ou d'une partie d'un solide,
- ~ Distance de dissémination des particules de bois, ...

La zone dangereuse liée à l'entité dangereuse "table" et au phénomène dangereux "déplacement de la table par rapport à une partie fixe", correspond à la zone de déplacement de la table située entre celle-ci et la partie fixe (Figure 27). Il est bien entendu que si l'homme ne peut accéder à cette zone par la totalité ou seulement par une partie de son corps, celle-ci ne sera pas considérée comme dangereuse.



**Figure 27 : Zone dangereuse liée au phénomène dangereux "déplacement de l'entité dangereuse table".**

Il est possible, à ce stade, de comprendre que si l'homme et la machine se trouvent simultanément dans la zone dangereuse, cette situation peut conduire à un accident, mais n'y conduit pas nécessairement (Figure 28).



**Figure 28 : Présence humaine (ou de l'entité dangereuse) dans la zone dangereuse.**

La zone dangereuse étant définie, l'obtention de la sécurité consiste en pratique à éloigner les personnes de cette zone lorsque l'entité dangereuse y est dans un état dangereux. Il est ainsi possible de définir cette zone d'éloignement comme zone protégée.

### e) ZONE PROTEGEE

La zone protégée est définie par la zone dangereuse augmentée d'une distance de sécurité.

### f) DISTANCE DE SECURITE

Distance minimale entre une personne et la zone dangereuse d'une machine telle que, en cas de déplacement de la personne vers la zone dangereuse de la machine, ou inversement de la machine vers la personne, les phénomènes dangereux puissent être annihilés avant que la personne ne soit en zone dangereuse (le déplacement de la personne ou de la machine étant alors supposé détecté) (Figure 29).

#### Exemple de protection de zone :

- ~ Zone autour d'une machine délimitée par des éléments matériels permettant d'assurer une limite d'accès à la zone dangereuse (les éléments matériels étant placés aux frontières de la zone dangereuse de l'entité dangereuse : la machine dans notre exemple).

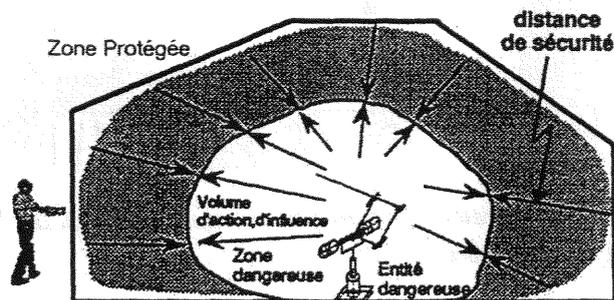


Figure 29 : Zone protégée autour de la zone dangereuse de ce robot.

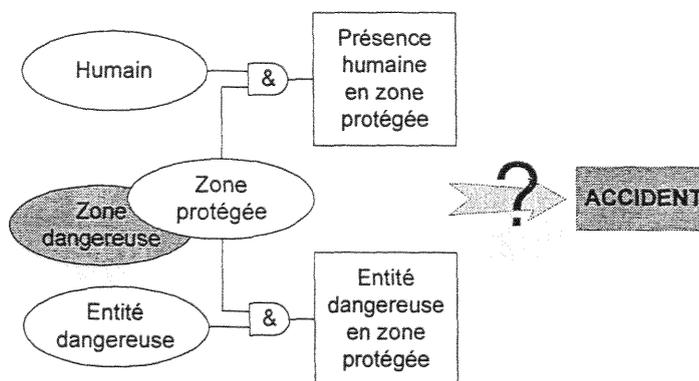


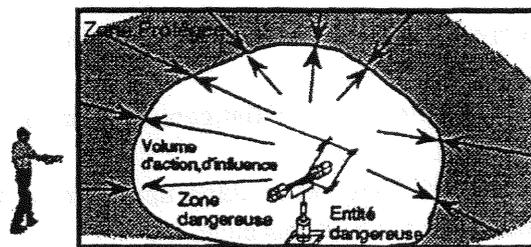
Figure 30 : Présence humaine (ou de l'entité dangereuse) dans la zone protégée.

Pour beaucoup d'installations, l'étendue de la zone protégée est incompatible avec la production souhaitée et particulièrement le temps de cycle visé ou la surface au sol disponible.

Par exemple, lorsque, sur une machine travaillant le métal, il est nécessaire d'utiliser du lubrifiant sous pression pour assurer un bon usinage (ce lubrifiant pouvant occasionner des

allergies aux personnes exposées). Cette pression, nécessairement importante, permet au lubrifiant d'atteindre une distance de plusieurs mètres au delà de la machine. La zone dangereuse liée au phénomène dangereux résultant de la pression élevée du lubrifiant, est donc beaucoup plus importante que le seul volume de la machine. Il paraît illusoire d'éloigner l'opérateur de cette distance de la machine (incompatibilité avec les temps de cycle, les interventions nécessaires pour le bridage des pièces, la taille des ateliers, ...). Il en résulte alors la nécessité de réduire au maximum la zone protégée par l'installation de barrière(s) matérielle(s) de protection de zone (Figure 31). Ces barrières permettent d'encager la machine et d'éloigner physiquement les personnes de la zone dangereuse. Par des écrans de protection, les jets de lubrifiant seront stoppés avant qu'il n'atteignent les personnes travaillant sur cette machine ou se déplaçant à proximité de celle-ci.

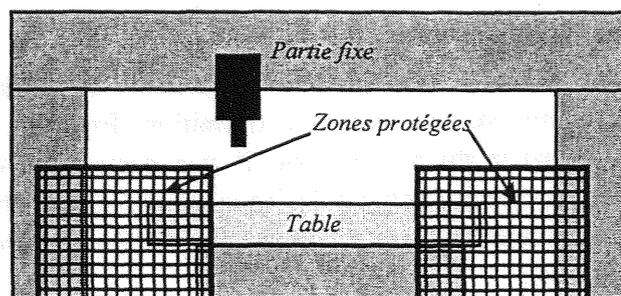
De plus, les barrières matérielles utilisées pour réduire la zone protégée, doivent disposer de systèmes de sécurité contraignants afin de retarder l'accès à la zone dangereuse par des dispositions techniques appropriées (par exemple : utilisation de système d'interverrouillage afin de s'assurer que l'accès par l'opérateur n'est autorisé que si la machine est effectivement arrêtée).



*Figure 31 : Limitation de la zone protégée par des barrières matérielles.*

Sur notre exemple de machine à CN, la zone dangereuse est étendue par le simple fait que cette machine possède des phénomènes dangereux qui peuvent atteindre une personne éloignée de cette machine de plusieurs mètres. En effet, il est possible qu'un outil éclate alors qu'il se trouve entraîné à une vitesse de rotation trop élevée. Ainsi, un fragment de cet outil peut venir en contact direct avec une personne se trouvant à une dizaine de mètres de la machine. Il est donc nécessaire de pouvoir tenir l'opérateur éloigné de cette zone dangereuse ou alors de réduire cette zone dangereuse en encageant l'outil par des protecteurs matériels limitant la zone dangereuse liée à cette entité dangereuse (l'outil).

De même, par l'utilisation de barrières grillagées, il est possible de délimiter une zone protégée afin d'interdire (ou de limiter) l'accès aux opérateurs à la zone dangereuse liée au déplacement de la table de travail (Figure 32).



*Figure 32 : Délimitation des zones protégées par installation de grillages.*

## g) SITUATION DANGEREUSE

Toute situation dans laquelle une personne est exposée à un ou plusieurs phénomènes dangereux [NF EN 292-1 §3.6].

Une situation dangereuse correspond donc à la présence simultanée en zone dangereuse d'une personne ou d'une partie du corps d'une personne et de l'entité dangereuse dans son état dangereux.

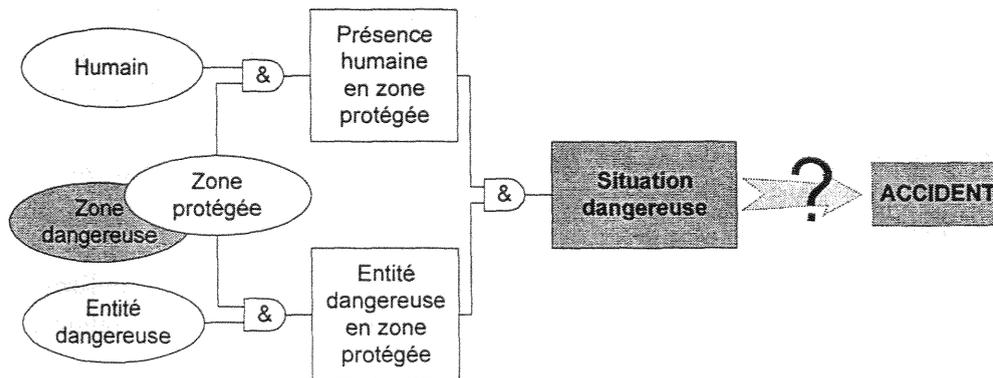
### Exemple de situation dangereuse :

- ~ Un opérateur se trouvant dans une enceinte délimitée matériellement par des protecteurs, alors qu'un robot se trouve en fonctionnement,
- ~ Bras de l'opérateur dans la zone dangereuse d'une presse (zone de travail, monte et baisse de la presse) alors que la presse est en train de descendre vers la pièce à travailler.

Une situation dangereuse résulte donc de l'occurrence de l'un ou l'autre des deux événements dangereux suivants :

- ~ l'entrée d'une personne en zone dangereuse alors qu'une entité dangereuse y est en fonctionnement,
- ~ l'entrée d'une entité dangereuse dans une zone où une personne est présente, rendant de fait cette zone dangereuse.

Finalement, ce qui est détecté, et donc à proscrire, c'est la situation dans laquelle l'homme et la machine se trouvent dans la zone protégée alors que le machine est dangereuse (Figure 33).



**Figure 33 : Situation dangereuse.**

Il faut maintenant préciser nos propos concernant la définition de la situation dangereuse, en la complétant par une nouvelle définition. En effet, il ne peut y avoir de situation dangereuse qu'à partir du moment où il y a occurrence des deux actions vues ci-dessus. Si nous supposons que ces actions de "rencontre" peuvent être détectées, il est alors envisageable de rendre rapidement l'entité concernée non dangereuse. Nous pouvons alors définir la situation dangereuse.

## h) SITUATION POTENTIELLEMENT DANGEREUSE

Toute situation dans laquelle une personne sera exposée, à brève échéance, à un ou plusieurs phénomènes dangereux si aucune disposition de sécurité n'est mise en œuvre dans un délai adéquat.

Une situation potentiellement dangereuse correspond donc à la présence simultanée en zone protégée de personnes ou d'une partie du corps d'une personne et de l'entité dangereuse dans son état dangereux avant que le phénomène dangereux ne soit annihilé.

La non-annihilation des phénomènes dangereux peut être dû à un contournement de la sécurité, à un non-déclenchement du dispositif de sécurité (suite à une défaillance par exemple) ou à une action trop tardive de celui-ci.

La mise dans un état non dangereux de l'entité dangereuse dès l'entrée de l'opérateur dans la zone protégée (ou l'entrée de la machine dans la zone protégée), rend la situation sûre. Le contraire conduit nécessairement à la situation dangereuse (Figure 34).

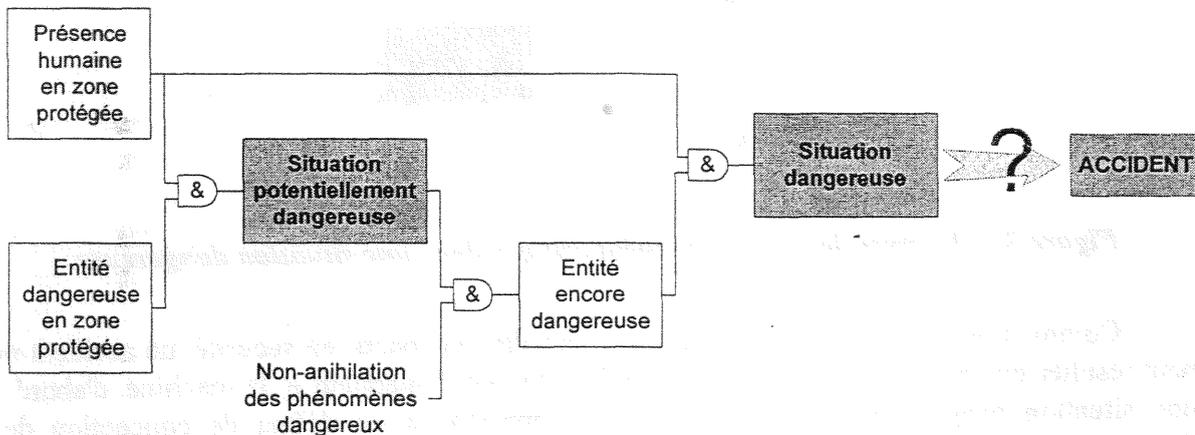


Figure 34 : Situation potentiellement dangereuse et situation dangereuse.

Dans notre exemple de MOCN, il est possible de définir une zone protégée autour de la machine dans laquelle le phénomène dangereux lié au déplacement de la table peut survenir. Si l'opérateur, pour une raison ou une autre, réussit à pénétrer dans cette zone protégée, l'opérateur et la machine se trouvent dans une situation potentiellement dangereuse. Pour que cette situation ne devienne pas dangereuse, il est nécessaire que la machine reçoive un ordre dès que l'opérateur franchit la limite de la zone protégée et puisse ainsi s'arrêter. Si cela n'est pas effectué, suite à une défaillance d'un composant par exemple, l'opérateur et la machine se trouvent alors dans une situation dangereuse.

L'homme se trouvant dans une situation dangereuse, que faut-il pour que l'accident survienne ? L'opérateur se trouvant dans la zone entre la table et la partie fixe de la machine, ne faut-il pas qu'un déplacement de la table survienne et que l'opérateur ne s'éloigne à temps de cette zone pour que la table ne vienne l'écraser et que l'on puisse parler d'accident ?

Cet instant où survient l'accident, ou il se déclenche dans ses conséquences en termes de lésion pour l'homme, nous pouvons le définir comme étant un événement critique.

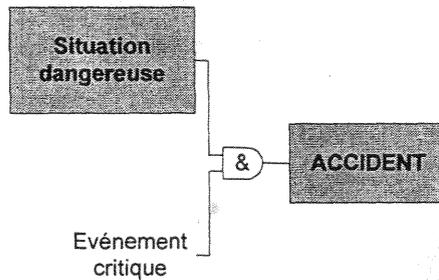
i) **EVENEMENT CRITIQUE**

*Evénement qui, dans une situation dangereuse, conduit à l'accident.*

Il peut avoir comme source une personne (action ou comportement inopportun), l'entité dangereuse (défaillance critique), ou une influence extérieure.

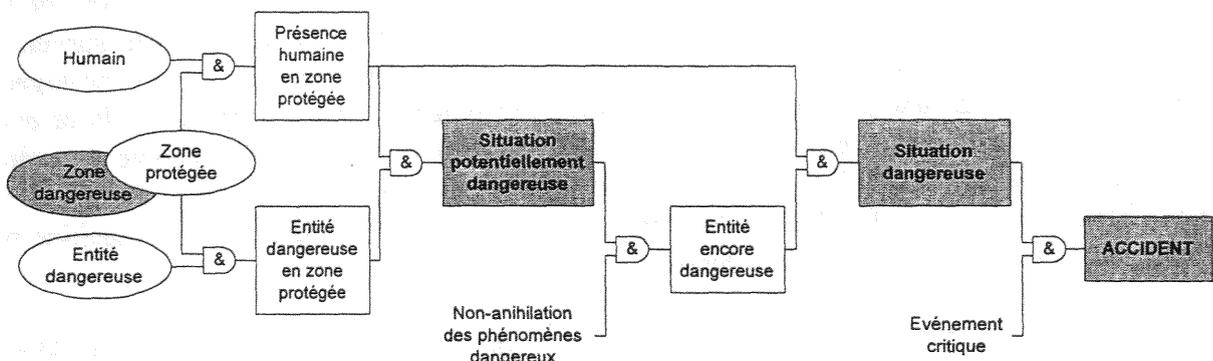
**Exemple d'événements critiques :**

- ~ L'opérateur se trouvant dans une enceinte d'évolution normale d'un robot, donc dans une situation dangereuse, il ne peut éviter le déplacement de ce robot. L'événement critique est donc le non évitement du déplacement d'un bras du robot.
- ~ Si un outil d'une MOCN se rompt (cette situation correspond à une défaillance technique) et que l'opérateur se trouve sur la trajectoire de projection des fragments de cet outil, il n'a pas le temps de les éviter.



**Figure 35 : Intervention de l'événement critique dans une situation dangereuse.**

Comme nous venons de le voir, pour une installation conçue en sécurité, un accident ne peut résulter que d'une cascade d'événements, conduisant, l'opérateur et la machine, d'abord à une situation dangereuse, suite à un dysfonctionnement, à un défaut de conception des dispositifs de sécurité ou encore à un contournement volontaire de la sécurité (entraînant la non-annihilation des phénomènes dangereux), puis à l'accident, suite à un événement critique (Figure 36).



**Figure 36 : Processus accidentel.**

## 2. HIERARCHIE DES MESURES DE SECURITE

La structure de l'arbre des causes d'accidents fait apparaître la hiérarchie des niveaux d'action sur le risque pour l'obtention de la sécurité (Figure 37) :

- d'abord supprimer si possible l'une des sources de risques : *PREVENTION INTRINSEQUE*,
- à défaut, supprimer toute manifestation du risque : prévention intrinsèque par *EXCLUSION* (confinement de zone, consignation de l'entité dangereuse),
- à défaut, détecter l'occurrence d'une situation potentiellement dangereuse afin de se prémunir de l'apparition d'une situation dangereuse : *MISE EN SECURITE SUR EVENEMENT DANGEREUX*,
- à défaut, protéger l'homme des effets potentiels de la situation dangereuse : *PROTECTION HUMAINE*,
- à défaut, maîtriser la situation dangereuse pour que l'accident ne puisse apparaître : *INSTRUCTIONS, FORMATION*,
- et, en tout dernier recours, *SECOURIR* afin de guérir ou de limiter les lésions survenues par l'accident.

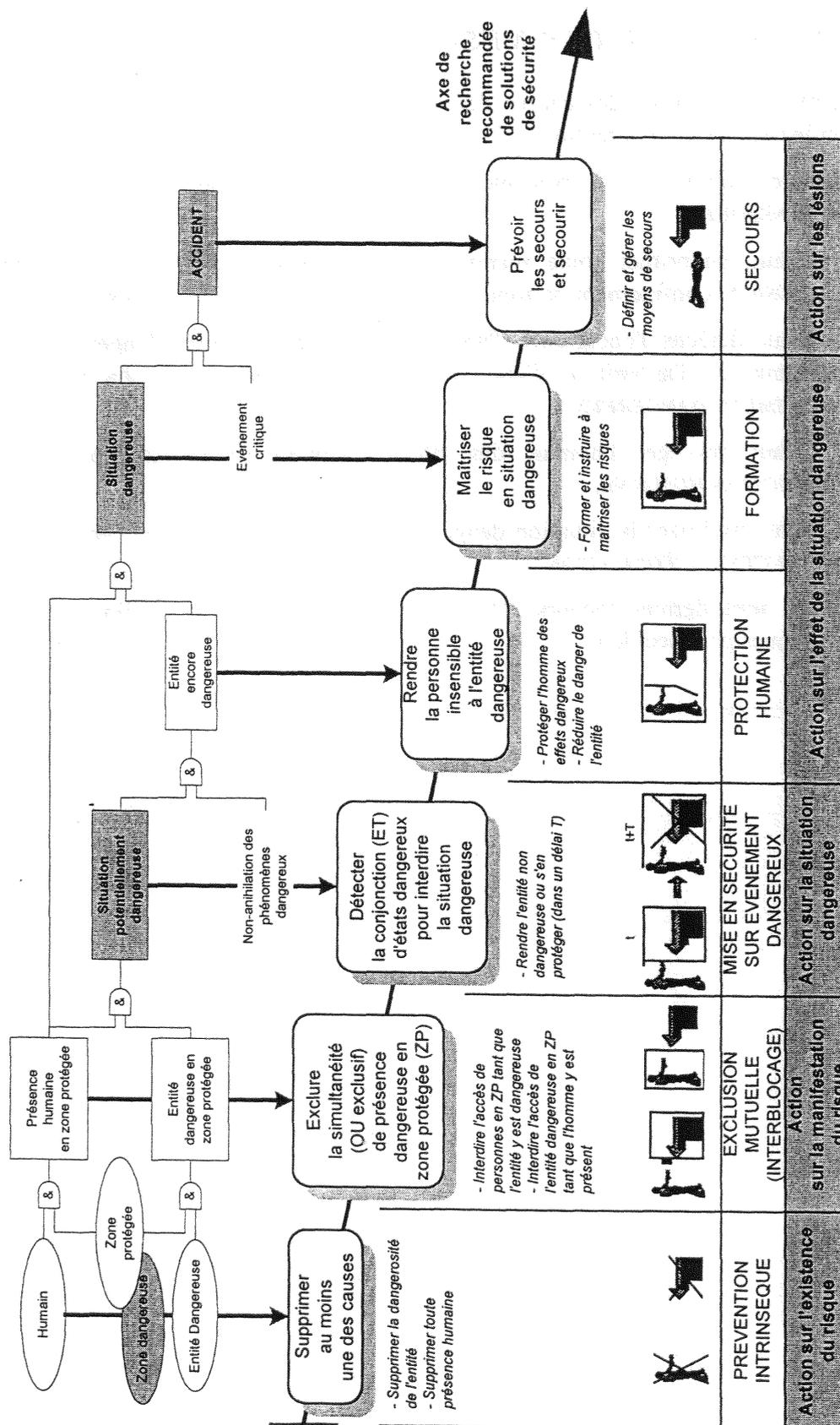


Figure 37 : Hiérarchie des mesures (ou dispositions) de sécurité

## II. METHODES D'ANALYSE DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT

Afin d'appliquer les principes hiérarchiques d'amélioration de la sécurité, il est nécessaire de savoir quoi améliorer. Pour cela il faut non seulement identifier les composants susceptibles de subir une ou plusieurs défaillances, mais également identifier les conséquences de ces défaillances sur l'ensemble du système. Par une analyse de l'existant, il est possible de travailler à l'identification des défaillances des composants (Cf. "*Analyse ergonomique terrain*"). Par l'utilisation de méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement, il est possible de prévoir les conséquences éventuelles des défaillances des composants et les causes d'incidents ou d'accidents survenus.

Nous allons maintenant décrire rapidement les différentes méthodes d'analyse de sûreté existantes au travers de leur classement en deux catégories ; l'objet de cette thèse n'étant pas de travailler à l'amélioration ou à l'enchaînement optimal des méthodes d'analyse existantes, mais au contraire à la prise en compte de l'activité humaine dans l'analyse de sûreté d'un système homme-machine (Cf. "*IV Modélisation fonctionnelle homme-machine*").

Il est possible de distinguer, parmi toutes les méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement, les méthodes d'analyse déductives (indirectes, descendantes), des méthodes d'analyse inductives (directes ascendantes) (Figure 38). Plusieurs auteurs précisent que certaines méthodes d'analyse fonctionnelle, décrivant le système dans son fonctionnement normal, peuvent servir à effectuer des analyses de sûreté. Ici nous ne nous intéresserons qu'aux méthodes dédiées à la sûreté sans toutefois préjuger de l'intérêt des méthodes non spécifiques à ce domaine.

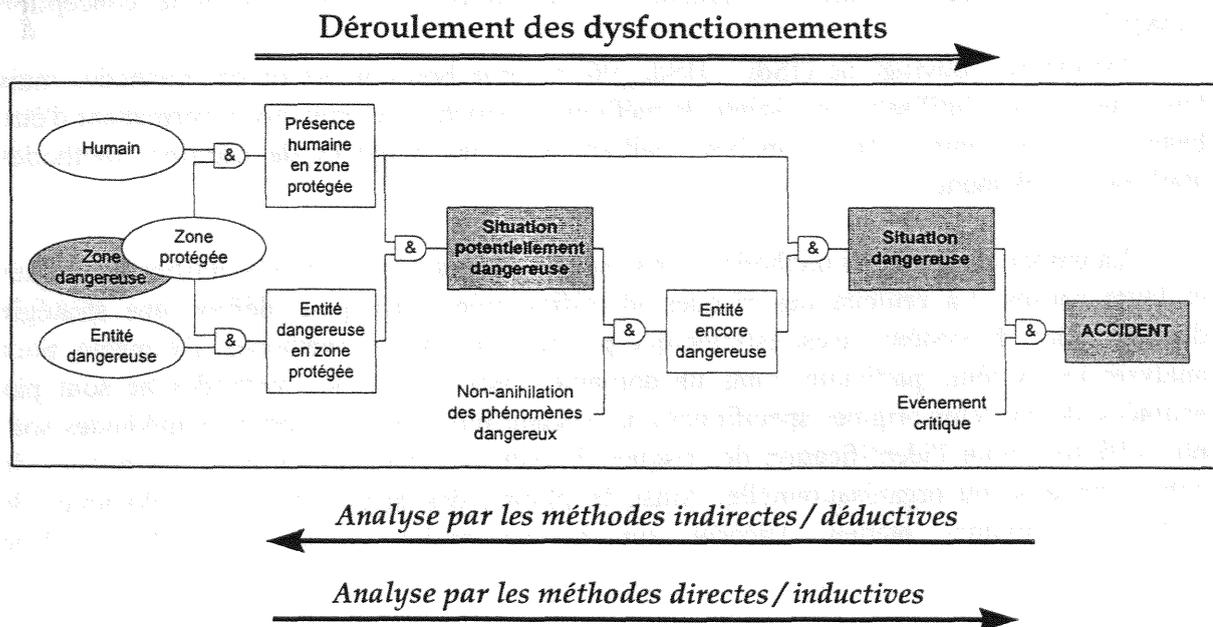


Figure 38 : Méthodes d'analyse déductives et inductives.

Les *méthodes déductives* sont des méthodes qui vont des dangers, des effets redoutés vers les causes. Partant d'un risque potentiel ou survenu d'accident, d'incident, de panne, les méthodes déductives en recherche les causes, la défaillance, l'entité défaillante, et dans la mesure du possible, la cause première : la faute. Parmi les méthodes rentrant dans cette catégorie, les méthodes d'analyse et d'enquête suite à un accident permettent de trouver la (les) défaillance(s) à partir des informations disponibles : les manifestations extérieures de(s) défaillance(s), le contexte de survenu de l'accident (environnement, conditions d'exploitation, humain et technique), bonne connaissance du système en terme d'historique, de données technologiques, d'effets antérieurs, ...

Les *méthodes inductives* sont des méthodes qui, elles, vont des causes connues ou potentielles vers leurs effets connus ou potentiels. L'exemple type de méthode inductive est l'AMDE qui peut s'appliquer tant à différents niveaux du système (aux fonctions, aux constituants, aux composants) qu'avec différents points de vue (produit, procédé, constituant de sous-système).

Une enquête de 1992 [Fadier\_92] ayant pour cible 220 experts des secteurs de l'industrie de production, de la recherche et développement, de l'ingénierie et du conseil, et des organismes publics, montre que parmi toutes les méthodes d'analyse existantes (40 identifiées dans l'étude), déductives et inductives, seules quelques unes étaient utilisées couramment. Parmi celles-ci, nous trouvons l'AdD<sup>20</sup>, l'AMDEC<sup>21</sup>, l'APR<sup>22</sup> méthodes reconnues comme quasi standard quel que soit le domaine d'application.

Gauthier [Gauthier\_97] décline trois classes de méthodes d'analyse : les méthodes "*rétrospectives*", "*prospectives inductives*" et "*prospectives déductives*". Il recense, dans ces trois classes, 93 méthodes d'analyse de sûreté qu'il analyse en mettant en évidence les flux d'informations entre méthodes de même classe et entre méthodes de classe différentes. Ensuite il n'en retient que 14 qu'il combine pour permettre de décrire une méthodologie d'analyse des risques lui apportant un moyen d'améliorer l'intégration de la sécurité à la conception d'OMP<sup>23</sup>.

De même, l'ouvrage de l'ISdF<sup>24</sup> [ISdF\_96] recense bon nombre de ces méthodes mais tend à privilégier l'utilisation conjointe de méthodes déductives et inductives permettant d'être beaucoup plus complet dans l'analyse, palliant ainsi les manques de certaines méthodes appliquées isolément.

La grande majorité des méthodes d'analyse des risques permettent d'identifier les risques et leurs causes. La criticité des risques identifiés, nécessaire pour définir une stratégie d'amélioration du système, n'est estimée que par certaines de ces méthodes. De même, pour analyser un système particulier dans un domaine précis, toutes les méthodes ne sont pas adaptées, de par leurs origines spécifiques à un secteur bien distinct. Certaines méthodes sont plus efficaces pour l'identification des risques de nature technique que pour des risques de nature humaine ou organisationnelle. Ainsi, la plupart des approches méthodologiques de Fiabilité Humaine, mettent l'accent sur la nécessaire connaissance du système

---

<sup>20</sup> *AdD* : Arbre de défaillance.

<sup>21</sup> *AMDEC* : Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur criticité.

<sup>22</sup> *APR* : Analyse Préliminaire des Risques.

<sup>23</sup> *OMP* : Outils, Machines et Procédés.

<sup>24</sup> *ISdF* : Institut de Sûreté de Fonctionnement.

homme-machine, afin de situer les interventions humaines dans le système global tout en analysant les données techniques de la machine.

Il apparaît donc nécessaire d'associer plusieurs méthodes d'analyse afin de tenir compte de l'ensemble des interacteurs présents dans le système étudié, tant technique qu'humain. Pour cela il est impératif d'effectuer un choix dans les méthodes d'analyse par la connaissance du système à étudier et par l'identification des interactions entre les différentes méthodes applicables pour l'analyse. Ainsi Gauthier [Gauthier\_97] étudie les liens communicationnels entre les méthodes d'analyse qu'il a préalablement identifiées.

Le choix de combinaisons de méthodes d'analyse de sûreté, en fonction des objectifs, du secteur industriel, des tâches, des moyens, des connaissances, est un domaine de travail pour la discipline de "Fiabilité Humaine" dans l'avenir. MAFERGO, que nous avons présenté rapidement auparavant, propose différentes méthodes d'analyse sans en définir précisément les interactions. Mais, utilisant des critères du même type que ceux qui ont permis d'apprécier la méthodologie MAFERGO [Fadier\_96], il serait possible d'évaluer les méthodes d'analyse et leurs interactions selon leur validité, leur adaptabilité, leur prédictivité, leur exhaustivité, leur acceptabilité, leur réputation et leur reconnaissance, ....

De plus, parmi les méthodes d'analyse, il est possible de distinguer celles qui analysent un système dans son fonctionnement normal de celles qui l'étudient dans son fonctionnement dégradé. Ainsi, parmi les méthodes les plus connues, la méthode "*Diagramme-Blocs*", rentrant dans la première catégorie, identifie les caractéristiques structurales du système, ses frontières, ses principaux composants ainsi que les liaisons entre sous-systèmes. Au contraire "*l'AMDEC*" et "*l'AdD*", ont pour objectif d'identifier les modes de défaillances possibles et réels, leurs combinaisons, leurs conséquences. Par conséquent, si l'on désire analyser un système à la fois dans son état normal et dans son état dégradé, il est nécessaire d'utiliser plusieurs méthodes d'analyse [Tourneur\_96].

### III. ANALYSE ERGONOMIQUE TERRAIN

Après avoir justifié de l'intérêt d'une démarche d'analyse associant une approche ergonomique à une analyse fonctionnelle, nous allons présenter maintenant l'application de ce principe.

Il nous fallait effectuer une intervention dans une entreprise possédant au moins une défonceuse à CN, afin d'intégrer dans notre analyse une dimension ergonomique comme préconisée par l'approche MAFERGO (Cf. "*Approche système : coopération homme-machine*").

L'objectif de notre intervention dans une entreprise d'ameublement possédant des défonceuses à commande numérique était de mieux connaître les risques et difficultés associés au travail sur ces machines en situation réelle d'exploitation.

Ce travail résulte d'une collaboration étroite entre le service EPI<sup>25</sup>, spécialisé en ergonomie et le service MDP<sup>26</sup> attaché à l'analyse fonctionnelle.

L'entreprise choisie pour l'intervention est une entreprise du Bas Rhin, fabriquant des meubles contemporains haut de gamme essentiellement en hêtre et orme massif. Cette entreprise familiale possède actuellement trois centres d'usinage (plus 2 perceuses multibroches à CN). Trois visites ont été menées dans l'entreprise, chacune avec des objectifs précis. Pour atteindre ces objectifs, nous avons procédé selon des méthodes axées principalement sur des entretiens directs avec huit personnes de l'entreprise (le directeur de l'entreprise, le responsable de la production, le chef d'atelier, en plus des cinq opérateurs travaillant sur les défonceuses) et sur des observations visuelles en partie filmées du poste de travail (d'une durée totale d'environ six heures).

#### 1. LIMITE DE L'INTERVENTION

L'entreprise concernée est une entreprise familiale ayant eut une expansion rapide depuis quelques années. Elle emploie aujourd'hui une centaine de personnes afin d'assurer la production de meubles contemporains haut de gamme en hêtre et orme massif. Malgré sa spécificité de fabricant de meubles, elle assure toutes les phases de première et seconde transformation, du débit de grumes à la commercialisation des produits, en passant par le séchage et les différentes étapes de l'usinage, la finition, l'emballage et la livraison. Réalisant une part importante de son CA à l'export (Allemagne et Suisse principalement), ses produits se doivent de respecter certaines contraintes tant esthétiques que de fabrication. Cela les conduit notamment à utiliser des produits de finition de type "biologique". Afin de se démarquer sur leur secteur de produits, l'entreprise possède une politique de renouvellement constante de sa gamme. Pour cela, elle fait appel à des designers en interne aussi bien qu'en externe. Le travail de ces designers nécessite ensuite un travail important de réalisation de prototypes afin de s'assurer et d'adopter de nouvelles solutions techniques, technologiques. La part belle est donc faite aux solutions associant des formes complexes et des techniques

<sup>25</sup> EPI : service Ergonomie et Psychologie Industrielle.

<sup>26</sup> MDP : service Machines et Dispositifs de Protection de l'INRS.

d'assemblage. Ceci conduit l'entreprise à utiliser au maximum les machines automatisées et plus particulièrement les C.U. qui leur permettent de réaliser les pièces complexes qui entrent dans la conception des meubles de leur gamme. Ainsi plus de 70% de pièces constituant les meubles produits par cette entreprise, sont en partie usinées sur les MOCN et plus particulièrement sur l'un des trois centres d'usinage.

## 2. LA SITUATION DE TRAVAIL

Les postes étudiés, trois défonceuses à commande numérique (dont deux analogues) se situent dans l'atelier de seconde transformation de l'entreprise (Figure 39).

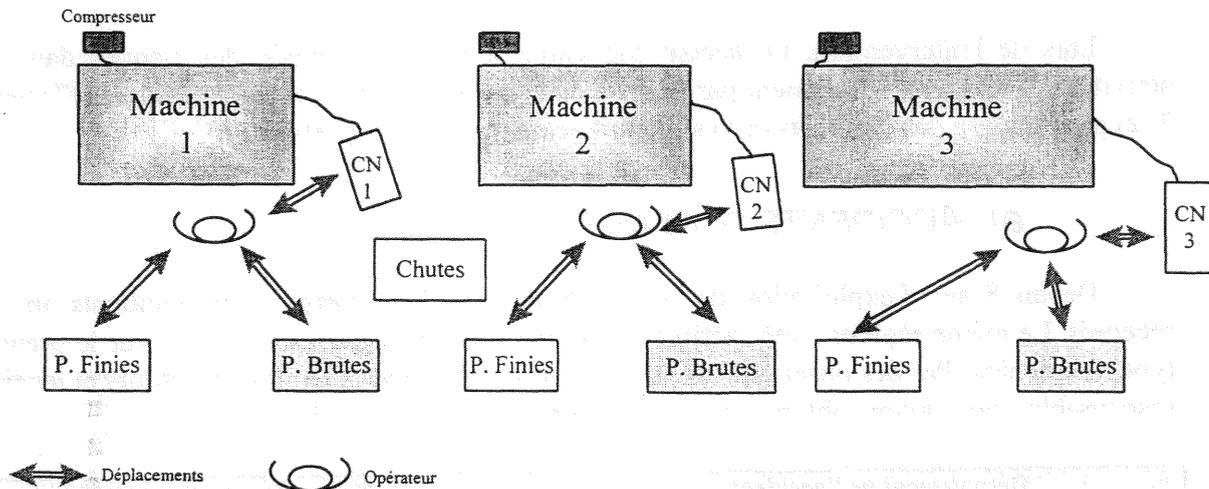


Figure 39 : Disposition des trois défonceuses dans l'atelier.

Les deux premières machines (1 et 2 sur la Figure 39) possèdent une seule table d'usinage nécessitant soit un montage d'usinage, soit des ventouses pour maintenir par dépression les pièces à usiner. Le travail qui est effectué sur ces deux machines s'effectue la plupart du temps sur des pièces de faibles dimensions permettant de travailler en pendulaire, en alternant l'usinage de la pièce de droite avec celle de gauche. Lorsque la machine usine la pièce de gauche, l'opérateur peut positionner la pièce à droite. La machine venant l'usiner lorsqu'elle a terminé celle de gauche. Et vice versa. Ces machines possèdent un magasin sous forme de tourelle de huit outils avec un moteur spécifique pour chacun des outils.

La troisième machine (3 sur la Figure 39) possède deux tables de travail indépendantes. Le travail est donc sur cette machine la plupart du temps pendulaire. Les deux tables peuvent cependant être accouplées et permettent alors de travailler des pièces de grandes dimensions. Le magasin de cette machine est lui aussi de forme circulaire mais la machine ne possède qu'un seul moteur. La plupart du temps cette machine, dans cette entreprise, usine des pièces de formes parallélépipédiques, sur les deux faces principales, par retournement des pièces.

Il existe deux catégories d'opérateurs dans cet atelier, les manoeuvres et les réglers, ces derniers étant chargés des changements de séries et des réglages associés. Sur ces machines, les opérateurs doivent réaliser la production de pièces de bois selon un ordre donné par la

GPAO<sup>27</sup> et qu'ils peuvent consulter par l'intermédiaire de consoles dans l'atelier. Lors de nos interventions, la GPAO n'avait été introduite et n'était exploitée que depuis environ 6 mois. Chaque pièce est usinée selon un programme CN élaboré par les services techniques. Les opérateurs doivent cependant vérifier, mettre au point et régler ce programme avant d'usiner les pièces. Ils doivent aussi, avant usinage, vérifier la qualité des pièces brutes qui leur sont fournies.

Les opérateurs sont donc responsables de la qualité et des quantités de pièces produites sur leur machine. Ils ont, pour cela, une autonomie relativement importante par rapport aux autres opérateurs de l'entreprise travaillant sur des machines plus traditionnelles.

### 3. ETUDE DES ACCIDENTS ET INCIDENTS

Lors de l'intervention, un accent particulier a porté sur l'étude des risques dans les activités des régleurs, notamment par la prise de connaissance des accidents déclarés (Tableau 3) et par l'analyse des incidents et dysfonctionnements observés (Tableau 4).

#### a) ACCIDENTS DECLARES

Depuis 8 ans d'exploitation de ces machines dans l'entreprise, deux accidents ont été recensés. Le même régleur a été victime de ces deux accidents, qui ont eu lieu sur le premier type de machine. Par des observations ouvertes et des entretiens avec les opérateurs et les tiers responsables, nous avons obtenu un premier aperçu de la situation de travail.

Déroulement de l'accident	Causes éventuelles
1991 : L'opérateur se trouvait debout, devant le poste de travail, une plaquette d'outil a cassé en cours d'usinage et a été projetée au visage de l'opérateur.	Il s'agissait d'anciens outils à fixation mécanique. Choix et état de l'outil.
1993 : Le mauvais outil a été sélectionné par la tourelle, il s'agissait de la roue de ponçage, non adaptée à la vitesse programmée. Lors de l'accélération, la roue de ponçage a éclaté. L'opérateur debout devant le poste en a reçu un morceau sur l'avant-bras.	Défaillance de la cartouche d'azote assurant le positionnement de la tourelle. L'opérateur n'a pas détecté le mauvais choix d'outil.

*Tableau 3 : Accidents du travail déclarés dans l'entreprise sur ces machines*

#### b) INCIDENTS OU DYSFONCTIONNEMENTS OBSERVES

Lors des journées d'observation, plusieurs incidents/dysfonctionnements ont pu être observés. Ils peuvent être considérés comme représentatifs des activités de récupération que les opérateurs doivent réaliser au quotidien. Ils sont présentés classés par niveau (N), correspondant à l'ordre croissant de gravité potentielle dans le Tableau 4 suivant. Ainsi le niveau 1 est supposé sans conséquence pour l'opérateur, le deux pouvant entraîner un accident si l'opérateur ne réagit pas suffisamment rapidement pour l'éviter à partir du moment où il s'est déclenché et le niveau 3 pour les incidents conduisant à l'accident sans que l'opérateur n'ait le temps de l'éviter.

<sup>27</sup> GPAO : Gestion de Production Assistée par Ordinateur.

Incident ou dysfonctionnement	N	Causes éventuelles	Activité et durée de récupération	Risques possibles	Préventions éventuelles
Arrêt pour problème de graissage : Une bulle d'air dans le circuit de graissage provoque l'arrêt de la machine par une "alarme graisse".	1	Défaillance technique du système de graissage automatique (incident quotidien!).	L'opérateur était en train de charger une pièce sur la table, pendant que la machine travaillait sur la pièce d'à côté (travail en pendulaire <sup>28</sup> ). La machine s'est arrêtée : l'opérateur a regardé la machine puis la console et a réarmé la machine qui est repartie. Durée : 30"	Éventuellement lors d'un usinage particulier si l'outil est engagé dans la matière, difficultés pour le ressortir.	Réparation de ce dysfonctionnement technique par changement du système de graissage.
Pièce trop courte : La pièce usinée est trop courte car la pièce brute n'était pas aux bonnes dimensions.	1	Mauvaise dimension des pièces brutes.	L'opérateur se rend compte que la pièce est trop courte en venant enlever la chute après le passage de l'ébauche. Il arrête la machine, change la pièce et recommence le programme depuis le début. Durée : 1' + temps de cycle d'ébauche	Augmentation du rythme de travail par augmentation des vitesses de coupe et de déplacement pour récupérer le temps perdu.	Contrôle systématique de la dimension des pièces avant usinage.
Projection de chute : La chute d'une pièce est projetée lorsque la mèche d'ébauche usine au coin de la pièce. L'usinage en contre fil provoque un éclat dans l'angle de la pièce.	2	Problème de considération des caractéristiques du matériau usiné (sens des fibres) lors de la programmation.	L'opérateur modifie la trajectoire d'usinage pour qu'elle corresponde au sens de travail du bois. Perte d'une pièce. Perte de temps correspondant à l'usinage d'une pièce. Durée : 15'	Lors de la projection de la chute, risque de choc avec l'opérateur.	Meilleure considération des caractéristiques du matériau lors de la programmation de l'usinage.

<sup>28</sup> Travail en pendulaire : l'opérateur travaille sur un côté de la table de la machine pendant que la machine usine une pièce sur l'autre côté.

<p><u>Projection d'une pièce :</u> Lors de l'usinage automatique, la pièce vibre au contact de l'outil et est projetée.</p>	<p>2</p>	<p>Déficience du maintien de la pièce par le montage (déficience de la pièce ou/et du montage).</p>	<p>L'opérateur a arrêté la machine, modifié le montage, rechargé une pièce et repris le travail normalement. Perte d'une pièce. Perte de temps correspondant à l'usinage d'une pièce. Durée : 5'</p>	<p>Lors de la projection de la pièce, risque de choc avec l'opérateur.</p>	<p>Revoir les montages pour les pièces galbées. Ne pas usiner de pièces déformées (notamment par des problèmes de séchage).</p>
<p><u>Outil en survitesse :</u> Lors du réglage d'un programme pour une pièce spéciale, l'opérateur fait une mauvaise manipulation qui entraîne la montée en vitesse d'un outil inadéquat, d'où une survitesse de l'outil.</p>	<p>3</p>	<p>Insertion d'un saut de bloc dans le programme sans réinitialisation avant usinage.</p>	<p>Arrêt en cours par l'opérateur. Durée : 10"</p>	<p>Eclatement de l'outil et donc risque de choc lors de la projection d'éclats.</p>	<p>Procédure de contrôle systématique à mettre en oeuvre par les opérateurs. Système automatique de vérification de la cohérence de l'outil sur la broche et de la vitesse programmée.</p>
<p><u>Eclatement d'une roue de ponçage :</u> Même incident que précédemment, cependant, l'outil appelé est une roue de ponçage, ne supportant pas la vitesse imposée, elle a éclaté.</p>	<p>3</p>	<p>Insertion d'un saut de bloc dans le programme sans réinitialisation avant usinage. Nature de l'outil.</p>	<p>Arrêt en cours par l'opérateur. Durée : 10"</p>	<p>Choc avec un éclat de l'outil dans une zone de projection d'une douzaine de mètres autour de la machine.</p>	<p>Procédure de contrôle systématique à mettre en oeuvre par les opérateurs. Système automatique de vérification de la cohérence de l'outil sur la broche et de la vitesse programmée.</p>

**Tableau 4 : Incidents et dysfonctionnements classés par niveau de gravité**

### c) SYNTHÈSE

L'analyse de ces différents accidents et incidents, et des activités de récupération qui y sont associées permet quelques remarques :

- une similitude apparaît entre les caractéristiques des accidents déclarés et celles des incidents observés.
- le caractère dangereux de certains incidents peut être souligné : choc par projection pouvant avoir comme conséquence une perforation d'un oeil, d'un membre, un traumatisme...
- après le déclenchement des incidents cités, les possibilités d'action des régleurs sont très réduites.

Ces éléments permettent de comprendre l'importance des *activités de prévention* (fonction et activité tendant à éviter la production de pannes, défaillances ou incidents divers, mettant en danger les opérateurs dans leur travail) [Demor\_96]. A travers les observations et entretiens, certaines de ces activités de prévention ont été soulignées, elles sont présentées dans la partie 5 : Eléments de diagnostic ergonomique.

Suite aux informations issues des accidents déclarés sur les trois machines de cette entreprise, nous avons pu élaborer un plan d'observations nous permettant d'identifier les phases de l'activité des opérateurs, les compétences et savoir faire des opérateurs, les activités de prévention qu'ils mettent en oeuvre régulièrement ainsi que les difficultés et risques liés à cette activité.

A la suite de ces premières observations, nous avons filmé plusieurs séquences d'activités, en les associant à des commentaires audio de l'observateur. Ces observations ont été immédiatement suivies de quelques questions posées à l'opérateur sur le poste de travail et en rapport avec la séquence observée.

## 4. DONNEES RECUEILLIES

A travers les observations, trois phases différentes de l'activité ont été identifiées :

- la réalisation des cycles de fabrication,
- les changements de série de produits,
- la mise au point de nouveaux programmes n'ayant jamais été exploités.

Chacune de ces phases mise en oeuvre par les opérateurs sur les trois machines a été individuellement observée et analysée. Le Tableau 5 liste les séquences observées.

	Type d'action	Opérateur	Machine	Type de travail	Pièces usinées
Cycles de fabrication	Manutention	Régleur	Machine 1	Pendulaire	Plateaux d'étagères
		Régleur	Machine 1		Pieds avant de lits
		Manoeuvre	Machine 3	Pendulaire	Portes d'armoires
Changements de série	Réglage	Régleur	Machine 3	Pendulaire	Portes d'armoires
		Régleur	Machine 2		Pièces spéciales
		Régleur	Machine 2		Supports penderies
Mise au point d'un nouveau programme	Réglage	Régleur	Machine 1		Tablettes halogènes

Tableau 5 : Séquences de travail observées.

Les résultats présentés ici ne sont qu'une synthèse issue d'une phase de dépouillement nécessaire, suite aux entretiens et relevés d'informations sur les postes de travail, pour en extraire un maximum d'informations sur l'activité réelle des opérateurs, sur les risques auxquels ils sont exposés et sur les pistes d'analyse des causes et conséquences de ces risques.

## 5. ELEMENTS DE DIAGNOSTIC ERGONOMIQUE

### a) COMPETENCES ET SAVOIR-FAIRE DES REGLEURS

Les observations du travail des régleurs mettent en évidence des compétences et savoir-faire aussi bien propres aux métiers du bois que des compétences liées au contrôle de machines à commande numérique.

- **Savoir-faire des métiers du bois :**

Les contrôles des "bruts" réalisés par les opérateurs avant le chargement des pièces sur la table de la machine mettent en jeu des connaissances particulières au matériau travaillé : qualité des pièces brutes, noeuds, sens des fibres, aspects esthétiques, couleurs, ...

De même, les différents contrôles et modifications réalisés lors des réglages de programme CN font appel à une connaissance importante de ce matériau : sens d'usinage, vitesses de travail, qualité de l'usinage, qualité des pièces usinées.

- **Compétences en commande numérique :**

L'observation de changements de série, met en évidence le fait que les régleurs sont amenés à effectuer divers réglages ou modifications, qui font appel à des compétences importantes en programmation CN, en plus de leurs savoir-faire de spécialistes du bois. Ces remarques sont notamment illustrées par les modifications faites lors de la mise au point d'un nouveau programme (Tableau 6) : dans ce changement de série, des modifications ont été réalisées lors de la production des cinq premières pièces, avant d'obtenir une version stabilisée du programme permettant de produire des pièces conformes.

Modifications	Raisons de la modification	Natures de la régulation
Augmentation d'une vitesse par changement d'un G1 en GO	Vitesse jugée trop lente	Optimisation de la durée du cycle
Changement de la profondeur d'un perçage	Mauvaise dimension du perçage	Correction d'une erreur de programme
Ajout d'une trajectoire circulaire	Le périmètre de la <i>poche</i> <sup>29</sup> n'est pas terminé	Modification du programme, à cause d'un problème qualité
Ajout d'une translation dans le cycle de <i>poche</i>	A l'issue de l'usinage, il reste de la matière dans la poche	Modification du programme, à cause d'un problème qualité
Modification du sens d'usinage de l'ébauche	Eclat sur la pièce : le bois est travaillé dans le sens contraire des fibres	Modification du programme par rapport à la nature du matériau travaillé

**Tableau 6 : Modifications réalisées lors de la mise au point du nouveau programme.**

En plus des savoir-faire spécifiques à ces machines et à l'usinage du bois que doivent posséder les opérateurs, ceux-ci mettent en oeuvre des actions de prévention. Ces actions ayant pour but de les prévenir des risques bien spécifiques, elles sont présentées selon deux phases : la phase de réglage/changement de série (la phase de "mise au point de nouveaux programmes" ayant une partie commune avec celle "du changement de série", elle sont regroupées) et la phase d'usinage normale.

## b) ACTIVITES DE PREVENTION MISES EN OEUVRE PAR LES OPERATEURS

### i. Lors des changements de série

Lors de la mise au point du nouveau programme qui a été observée, différentes vérifications ont été faites avant l'exécution :

- simulation à l'écran permettant de vérifier les trajectoires en X et Y (mais pas en Z sur les machines observées),
- lecture du programme avec éventuellement correction des vitesses de rotation et de déplacement.

Lors de la mise au point de ce nouveau programme et lors des trois changements de séries, d'autres activités de prévention ont été soulignées :

- la **préparation des outils** est réalisée consciencieusement : le serrage, l'affûtage et la fixation des outils apparaissent nécessaires pour assurer leur bon fonctionnement en sécurité,

<sup>29</sup> *Poche* : trou d'un diamètre plus grand que celui qu'il est possible de réaliser avec une mèche à percer. Il est alors nécessaire d'induire un mouvement de déplacement circulaire à l'outil pour usiner cette poche.

- le **réglage des "correcteurs d'outil"** (marge entre le diamètre et longueur théoriques et réels des outils) est selon les opérateurs, parfois réalisé :
  - ~ en donnant d'office des correcteurs d'outil inférieurs ou supérieurs et qui sont ajustés progressivement (un opérateur observé),
  - ~ en ajoutant d'office au programme des numéros de ligne pour faire des "sauts de bloc" de programme pour ne passer au bloc suivant que lorsque le bloc de programme correspondant sera au point (un opérateur observé).
- de nombreux **contrôles visuels, tactiles** (toucher de la surface après passage de l'outil), **sonores** (arrêt de la machine lors d'un bruit anormal), et **par mesures dimensionnelles** sont réalisés sur la pièce lors des réglages. Ces contrôles sont plus accentués lors du passage de l'outil à profiler et de la roue de ponçage, ainsi que lors de l'usinage des trous et poches.
- lors des réglages, les opérateurs font **varier la vitesse d'avance** des outils directement dans le programme ou/et manuellement, et travaillent ainsi au coup par coup pour anticiper les éventuelles erreurs de programme.
- pour **contrôler la profondeur** des perçages, un des opérateurs arrête l'outil à flanc de la pièce, et vérifie sur l'écran de commande la distance restant à parcourir.

## ii. Dans l'exécution de cycles de production

Les résultats suivants sont issus de l'observation de tous les opérateurs réalisant des cycles. Les trois machines ont été considérées, ainsi que différents types de fabrication (travail en pendulaire, avec montage de fixation, ...).

Nous avons observés des activités de préventions concernant :

- le **positionnement et la fixation des "bruts"** sur la table :
  - ~ la fixation des pièces sur la table est renforcée par les coups de mains donnés par l'opérateur lors du chargement. Ceux-ci ont systématiquement été observés. Parfois l'opérateur vérifie la fixation en secouant le brut,
  - ~ les opérateurs compensent éventuellement les défauts (essentiellement d'aspects) des pièces brutes en dimension et qualité par le choix de la surface usinée et le positionnement des "bruts" sur la table.
- la **gestion des chutes** des "bruts" :
  - ~ des arrêts machines (M0) sont parfois ajoutés dans le programme par les opérateurs pour enlever les chutes. Ceci a systématiquement été observé lors du travail sur deux machines (l'autre machine travaillant toujours, lors de nos observations, sans générer de chute). Cette démarche s'intègre dans une double perspective visant à accroître d'une part à la sécurité (risque de projection) et d'autre part, à la qualité (la chute peut se bloquer sous la pièce, sous le montage ou sous les ventouses et les déplacer),
  - ~ en général, les opérateurs restent près de la machine pendant la phase d'ébauche. A l'issue de l'ébauche et après avoir enlevé les chutes, ils quittent parfois ce poste pour réaliser une tâche annexe (montage des outils dans leur mandrin, consultation du moniteur de GPAO, ...).

- Le cycle de fabrication semble connu par les opérateurs. L'observation (ou parfois l'écoute) en temps réel de la machine semble leur permettre de savoir où en est le cycle de fabrication : ils **planifient ainsi leurs actions** à venir.

Les risques identifiés durant ces journées d'observation peuvent être classés selon leur origine. Nous avons ainsi deux grandes catégories d'origines de risques : la machine d'une part, et l'organisation de la production d'autre part.

### c) DIFFICULTES OU RISQUES ISSUS DE LA MACHINE

Les machines telles qu'elles sont conçues semblent être à l'origine de difficultés, ou risques, pour les opérateurs dans leur travail.

- **Présentation de l'information :**  
Les vitesses affichées à l'écran ne sont pas les vitesses réelles. Selon les broches, il faut multiplier par un coefficient 5 ou 10 la vitesse affichée pour obtenir la vitesse réelle.
- **Changement d'outils :**  
Lors du remplacement manuel d'outil sur deux des machines (1 et 2 sur la Figure 39), il faut appeler l'outil se trouvant sur le revolver en amont de celui sur lequel on veut travailler.  
De plus, le remplacement d'outils sur ces machines est particulièrement contraignant de par la posture des opérateurs.
- **Système d'aspiration :**  
De manière générale, sur l'ensemble des trois machines observées, le système d'aspiration semble gêner la prise de certaines informations importantes lors des réglages, notamment pendant les changements de série. En effet, les observations ont mis en évidence les postures et attitudes particulièrement contraignantes que prennent les opérateurs pour voir l'outil en activité sous le système d'aspiration pendant les phases de réglage.  
On a noté la fréquence de cette activité lors des changements d'outils et lors du passage du profil et de la roue de ponçage. Ces outils ayant un profil non linéaire, il est difficile de les mesurer avec précision. Les scénarios observés et les arguments fournis par les opérateurs lors des entretiens, mettent en évidence les informations qu'ils cherchent pendant ces phases :
  - *l'outil* : identification de l'outil, hauteur de travail, sens de rotation, trajectoire, contact avec la pièce
  - *la pièce* : son maintien, surface en contact avec l'outil

Il est nécessaire de considérer ces besoins d'information des régleurs dans la conception de systèmes d'aspiration.

Certains opérateurs soulèvent d'ailleurs les languettes ou éventuellement ouvrent le capot de l'aspiration pour assurer ces prises d'information.

Il semble, selon l'unanimité des opérateurs que certaines de ces informations soient plus facilement visibles sur la troisième machine.

Le système d'aspiration de la troisième machine semble moins efficace que sur les deux premières : on a notamment remarqué lors d'une production (observé pour un opérateur), qu'avant chaque chargement, l'opérateur nettoie la table à la soufflette pour améliorer la qualité et la sécurité de l'usinage.

Ainsi, le gain de productivité obtenu sur la nouvelle machine (3), grâce au nombre d'outils plus important et à la facilité de changement de ces outils dans le magasin, engendre un système d'aspiration peu efficace (moins que pour les machines 1 et 2).

Une fonction secondaire est attribuée par les opérateurs aux systèmes d'aspiration : parfois ils débranchent un des conduits principaux et s'en servent pour effectuer le nettoyage de la table en aspirant les copeaux. Ce mode opératoire a surtout été observé en fin de journée, lors du nettoyage du poste.

Il faut tout de même noter que l'ensemble des opérateurs et du personnel de l'entreprise (tant les ouvriers que la direction) se plaignent de l'inefficacité des systèmes de captage présents sur ces machines. Le mauvais fonctionnement de ces systèmes occasionne des gênes aux opérateurs travaillant directement sur ces machines mais également sur l'ensemble de l'atelier par une dispersion des poussières produites et non captées. De plus, un nettoyage régulier est nécessaire pour pouvoir assurer un travail de qualité. Ces nettoyages entraînent donc inévitablement une perte de productivité importante.

#### *d) DIFFICULTES OU RISQUES ISSUS DE L'ORGANISATION*

L'organisation de la production est gérée par la GPAO. Le régleur va interroger un moniteur qui lui donne le n° de la série à réaliser pour la machine (mais pas le nombre de pièces, ni la désignation du produit). L'enchaînement des séries est optimisé pour minimiser les changements entre deux usinages (réglages minimum, remplacement d'un nombre restreint d'outils dans le magasin, ...).

A chaque production est associé un "ordre de fabrication" qui donne le descriptif et la désignation du produit, le nombre de pièces à réaliser. Cet ordre de fabrication est placé sur la palette de "bruts" destinés à la fabrication du produit. Après la réalisation de la série, ce document suit la palette de produits terminés et l'opérateur rentre sur la console de GPAO, la production effectuée.

Les observations et entretiens ont permis de relever quelques problèmes issus de l'organisation ou de la GPAO qui pourraient être analysés plus finement pour améliorer l'efficacité et le confort de travail.

- ***Gestion de l'information :***

La console de GPAO n'affiche pas le nombre de pièce à fabriquer dans la série, il faut consulter l'ordre de fabrication, document placé sur la palette de pièces brutes.

Les palettes de bruts sont rangées dans un ordre quelconque dans l'atelier, ce qui conduit à une perte de temps importante pour trouver la palette correspondant à la série à usiner.

Les pièces spéciales unitaires ne sont pas intégrées dans la GPAO, ce qui peut poser problème dans la planification de la production et dans l'optimisation des changements de série.

- **Flexibilité des outils de travail :**

Les régleurs n'ont pas accès aux programmes d'usinage archivés, la capacité de mémoire des CN ne permet de stocker que deux programmes et le transfert de programme n'est pas toujours clairement organisé. Ces éléments peuvent causer des pertes de temps dans les changements de série.

Du point de vue des opérateurs, la GPAO n'est pas toujours optimisée pour les changements de série. Une flexibilité plus importante de celle-ci est donc nécessaire pour éviter des changements de série trop coûteux en temps et en productivité.

- **Gestion des outils des machines :**

Les outils ne semblent pas faire l'objet de maintenance préventive. Ceci peut s'avérer gênant : l'affûtage étant sous-traité, il entraîne une indisponibilité de l'outil d'environ une semaine, ce qui peut poser problème en l'absence d'anticipation.

Le matériau des roues de ponçage, en mousse de synthèse expansée, est intéressant en terme de productivité et de réduction des conséquences d'éventuelles collisions lors d'une erreur de programme. Ce matériau a été préféré au MDF car il est nettement plus facile et rapide à profiler avant utilisation. Par contre, les incidents que nous avons pu observer, montrent qu'il augmente les risques d'éclatement (il ne supporte pas les vitesses de rotation supérieures à 10 000 tr.mn<sup>-1</sup>).

## 6. BILAN

Les accidents déclarés, les incidents observés et les observations de l'activité permettent d'identifier certaines **origines des différentes difficultés et risques**, gérés par l'activité des opérateurs sur les défonceuses, parmi lesquelles :

- > les actions de l'opérateur
- > la conception de la machine
- > la conception de la commande numérique
- > la conception du programme exécuté
- > certains paramètres définis par l'organisation du travail (GPAO, entretien machine/outils...)

Ces origines de risques sont principalement des problèmes de conception, de contrôle, de manipulation.

Seule une analyse approfondie par observation d'activité réelle a permis d'identifier ces gênes. Bien qu'elles soient compensées, dans la majorité des cas, par les actions de prévention des opérateurs, elles peuvent être source d'incidents fréquents sur les défonceuses à commande numérique..

Par cette intervention ergonomique dans une entreprise d'ameublement, nous avons pu identifier trois phases principales d'activités des opérateurs (ceci sur 3 machines dont 2 de type différent). Nous avons également pu observer les opérateurs mettant en oeuvre des actions spécifiques pour contrecarrer les risques et gênes qui existent sur ces machines. Nous avons également pu imaginer des modifications à réaliser afin d'améliorer le travail du couple homme/machine.

Mais, au delà de ces aspects spécifiques à la sécurité, cette intervention nous a permis de parfaire notre connaissance du travail de l'homme sur ces machines. Cette connaissance de l'enchaînement des actions des opérateurs, les habitudes de travail de ceux-ci, nous ont été utiles pour réaliser la modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle du couple homme-machine que nous allons présenter ci-après, et également lors de l'expérience de conception distribuée (plus particulièrement par l'acteur ergonomiste).

## **IV. MODELISATION FONCTIONNELLE HOMME-MACHINE**

Suite à l'analyse terrain effectuée, nous avons souhaité aller plus loin dans l'analyse en travaillant à l'établissement d'une modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle du système homme-machine. Cette modélisation avait pour but principal de reproduire ce que nous avons pu identifier sur le terrain pour mieux comprendre encore, d'un point de vue fonctionnel, le système formé. Cette modélisation, tout en situant les éléments les uns par rapport aux autres et par rapport à l'extérieur du système, devait également confirmer la possible intégration de l'homme dans une modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle, support d'une analyse de sécurité.

A partir d'une modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle, il est possible d'instruire un certain nombre d'analyse de la sûreté de fonctionnement, permettant alors de travailler à l'amélioration de la sécurité. Ces dernières années, l'utilisation de logiciels d'analyse s'est accentuée, permettant "d'automatiser" les traitements qualitatifs et quantitatifs effectués à partir d'une modélisation du système à étudier. Beaucoup de méthodes ont fait l'objet d'un développement informatique permettant d'effectuer des traitements importants sur des systèmes complexes avec des résultats d'une fiabilité remarquable.

Cependant, comme nous l'avons vu précédemment, les méthodes d'analyse doivent être associées entre elles, dans la mesure du possible, afin de rendre l'analyse la plus performante possible en terme d'éléments analysés (techniques et humains), d'indicateurs de sûreté, mais aussi pour pouvoir travailler sur le système en fonctionnement normal et en fonctionnement dégradé. Ainsi, une analyse de sûreté de fonctionnement nécessite la mise en œuvre de plusieurs méthodes d'analyse, et bien souvent de plusieurs logiciels spécifiques de traitement. Partant de ce constat, de nouveaux logiciels [Seck\_96], que certains peuvent appeler "atelier logiciel", sont apparus (FIABEX, SOFIA<sup>30</sup>, ...). Le principe étant d'effectuer automatiquement un certain nombre d'analyses de fiabilité, choisies pour leur caractère générique et pour leur applicabilité dans de nombreux secteurs industriels, à partir d'une modélisation fonctionnelle du système analysé. Pour l'analyste, il faut alors renseigner l'atelier logiciel de SdF<sup>31</sup> de la description fonctionnelle, mais également de toutes les relations entre les différents éléments du système et des dysfonctionnements connus ou supposés de ces éléments.

### **1. FORMALISME DE MODELISATION**

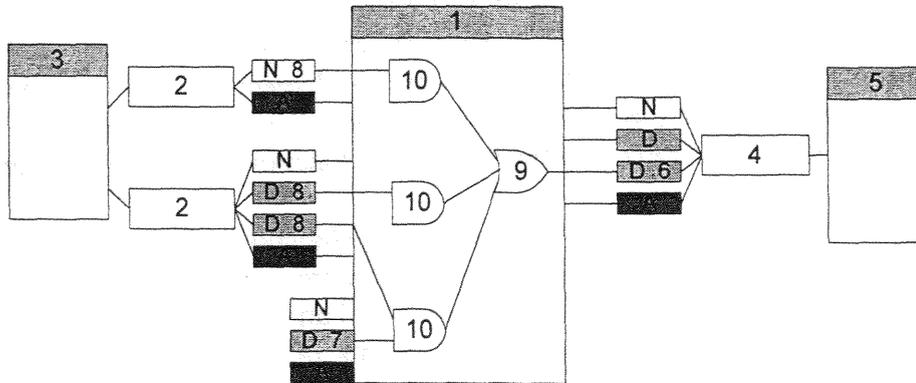
Dans la logique MAFERGO, une articulation est effectuée entre l'approche ergonomique et l'approche fonctionnelle, visant à identifier et à intégrer l'activité de l'homme dans les analyses. Pour démontrer l'intérêt d'une telle approche, Batt [Batt\_96] a réalisé une étude visant l'intégration de l'homme dans une analyse de SdF basée sur une modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle selon le formalisme SOFIA. Partant de ce constat, nous avons effectuée une modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle de l'opérateur et de la

<sup>30</sup> Une description de SOFIA est présentée en annexe.

<sup>31</sup> : *SdF* : Sûreté de Fonctionnement.

défonceuse selon cette approche hiérarchique permettant la décomposition fonctionnelle des éléments à modéliser et l'identification de liaisons fonctionnelles entre les éléments modélisés.

Notre modélisation se base sur un découpage du système selon deux types principaux d'éléments : des *blocs fonctionnels*, correspondant à chacun des éléments identifiés, et des *fonctions*, modélisant les liaisons entre les blocs (Figure 40). Les fonctions et les blocs fonctionnels sont décrits selon leur mode de fonctionnement normal et dégradé. Ainsi, sont reproduits dans cette modélisation l'ensemble des défaillances possibles tant des blocs que des fonctions, correspondant à celles que l'on a pu identifier sur le terrain ou à celles que l'on peut raisonnablement supposer comme potentielles.



- |   |   |
|---|---|
| ① Bloc fonctionnel,   | ⑦ Etat de bloc cause de l'état de fonction de sortie,                         |
| ② Fonctions entrée du bloc fonctionnel,                               | ⑧ Etats de fonctions entrées causes de l'état de fonction de sortie,          |
| ③ Bloc fonctionnel origine des fonctions entrées,                     | ⑨ Porte "OU" logique définissant le polynôme développé de l'état de fonction, |
| ④ Fonctions sortie du bloc fonctionnel,                               | ⑩ Portes "ET" logiques définissant les monômes du polynôme.                   |
| ⑤ Bloc fonctionnel destination de la fonction sortie,                 |   |
| ⑥ Etat de fonction de sortie sur lequel est défini le polynôme cause, |   |
- N : Nominal    A : Absent    D : Dégradé

Figure 40 : Liaisons entre blocs fonctionnels, fonctions, états et polynômes.

## 2. ELEMENTS MODELISES

La modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle effectuée prend en compte l'homme, au travers des tâches qu'il effectue, la machine, décrite selon chacune des phases de travail identifiées lors de l'analyse terrain, et leur environnement, par les énergies et les stocks nécessaires. Ainsi, la modélisation effectuée, tant d'un point de vue technique qu'humain, se veut le reflet le plus exact possible du couplage homme-machine visualisé en exploitation réelle.

Nous nous sommes basés sur les éléments techniques de la machine (tête d'usinage, table de travail, commande numérique, pièces brutes et finies, boutons de commande, ...) et avons identifié chacune des liaisons possibles entre ces éléments, mais également entre les actions de l'opérateur, les éléments de la machine et l'environnement.

Pour pouvoir modéliser le système, nous avons, comme cela est souvent le cas, décomposé le système en trois parties : l'*homme*, la *machine* et l'*environnement* (Figure 41).

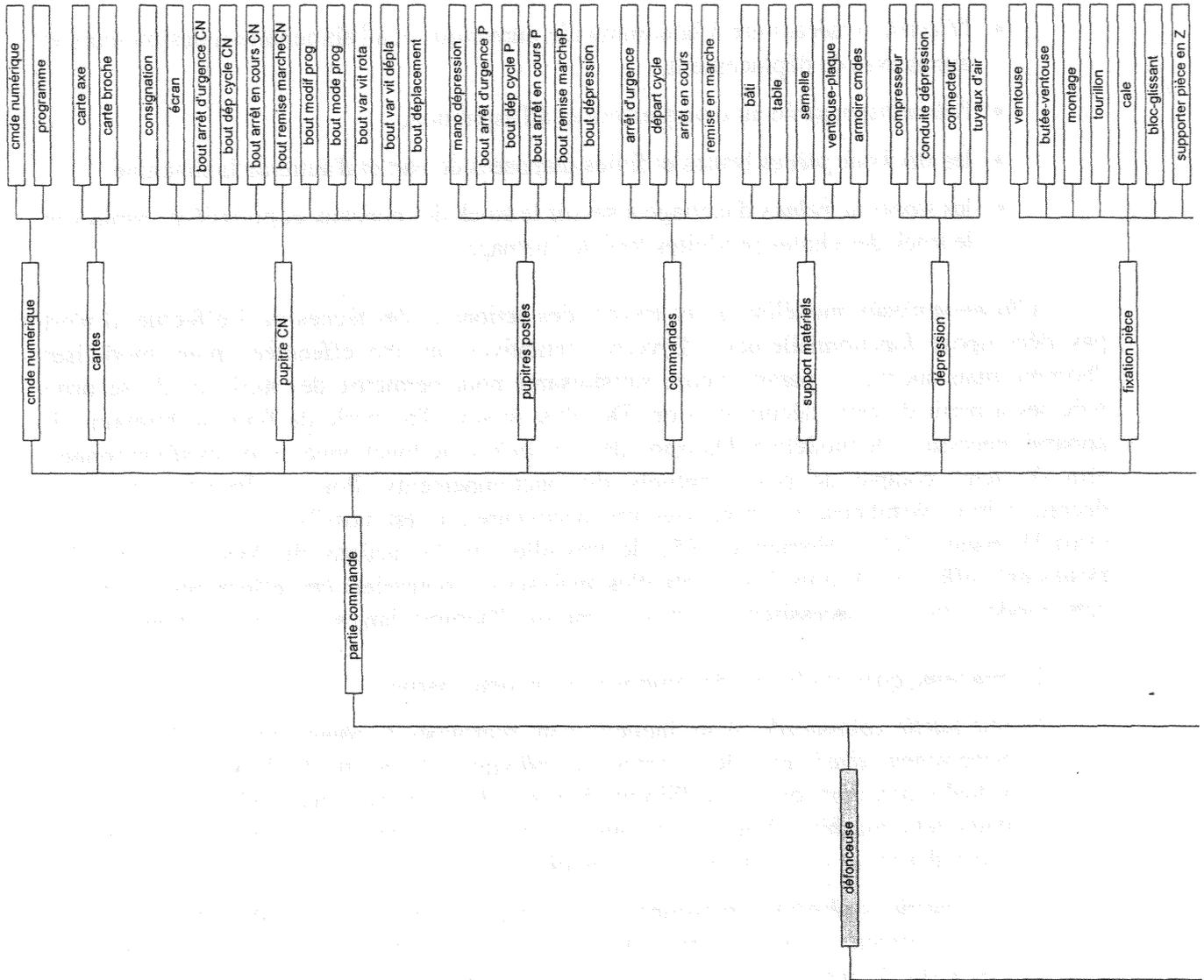
Dans l'*environnement* se trouvent toutes les sources d'énergies et les stockages nécessaires au fonctionnement de la machine, à savoir :

- l'*électricité* nécessaire à la commande numérique et à l'alimentation des moteurs et autres axes de déplacement,
- l'*air* indispensable au compresseur et à l'aspiration,
- les *stocks de pièces* brutes et finies disposées de part et d'autre de la machine,
- les *stocks de rebuts* d'usinage à savoir le stock des copeaux et poussières aspirés et le stock des chutes produites lors de l'usinage.

L'*homme* n'étant modélisé qu'au travers des actions et des tâches qu'il effectue, il n'est pas décomposé fonctionnellement. Diverses tentatives ont été effectuées pour modéliser l'homme mais aucune ne paraît encore satisfaisante pour permettre des analyses de sécurité précises à partir de cette décomposition. De plus, lorsque l'on parle de fiabilité humaine, il apparaît nécessaire de modéliser l'homme dans ce qu'il a de fonctionnel et de dysfonctionnel, afin de tenir compte de ces éventuels dysfonctionnements. Pour s'affranchir de cette décomposition fastidieuse (et non toujours nécessaire), il est possible, comme le montre Ortiz-Hernandez [Ortiz-Hernandez\_95] de travailler sur les actions de l'opérateur, sur les tâches qu'il effectue. De plus, les éventuelles analyses qui pourraient être effectuées à partir de cette modélisation, ne nécessitent pas de décomposer l'homme dans ses moindres détails.

La *machine* quant à elle est décomposée selon deux parties :

- une *partie commande*, dans laquelle sont regroupés la *commande numérique* et le *programme d'usinage*, les *cartes de pilotage* d'axes et de broche, l'*écran* de visualisation ainsi que les différents *boutons de commande* nécessaires à la conduite d'une telle machine (boutons de *mise en marche*, de *mise en dépression*, de *départ cycle*, d'*arrêt de cycle*, de *modification de programme*, d'*arrêt d'urgence*, ...).
- une *partie opérative*, regroupant la *table* de travail, les éléments requis au positionnement et au maintien des pièces sur la table (à savoir le *montage*, les *ventouses* de maintien, les *butées*, les *cales* de positionnement, ...), les éléments obligatoires à la fixation de l'outil (l'*outil* lui-même, le *mandrin*, les *clés de serrage*, ...), l'ensemble réalisant l'entraînement de l'outil (comprenant la *broche* et son *système de contrôle commande*), les *axes* de déplacement et leurs *système de contrôle commande*, ainsi que le *système d'aspiration* avec le *ventilateur* d'air, les *conduites* de transport des copeaux/poussières et le *système de captage*.



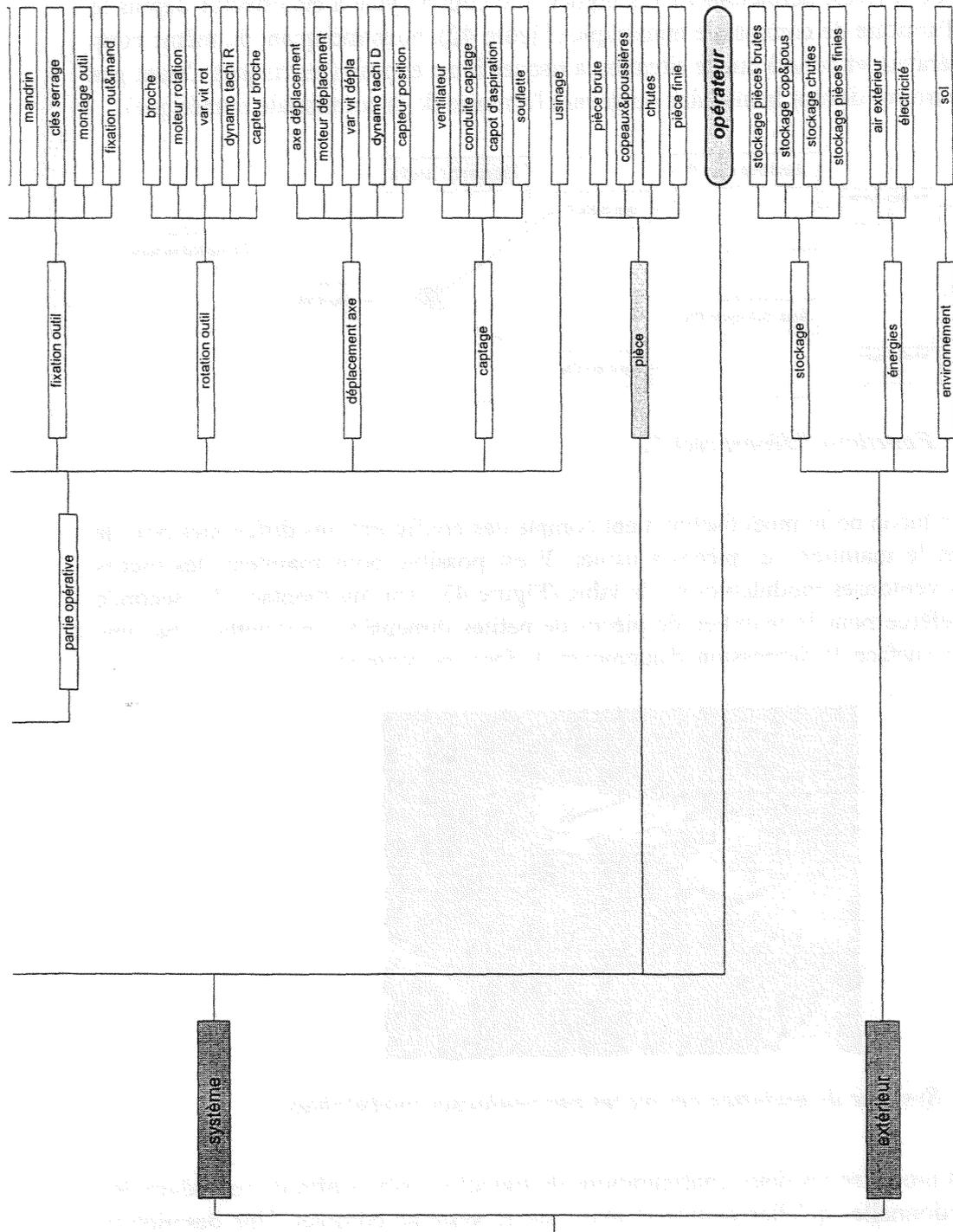
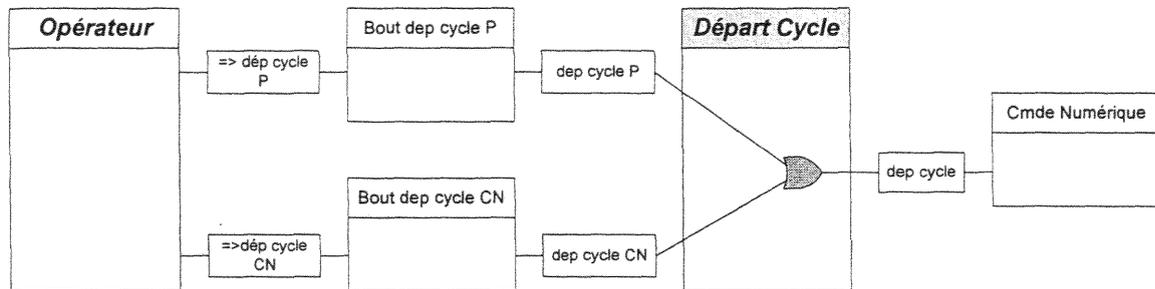


Figure 41 : Décomposition hiérarchique de la modélisation SOFIA.

Il est possible, pour l'opérateur, lorsqu'il veut que le cycle d'usinage débute, d'actionner un bouton "départ cycle" soit au niveau du poste de travail lui-même soit sur l'armoire de commande. Nous avons pris en compte ces particularités dans notre modélisation en identifiant deux boutons qui réalisent finalement la même fonction de "déclenchement du cycle d'usinage" des pièces, permettant de distinguer si le départ cycle a été effectué depuis le poste ou depuis l'armoire de commande numérique (Figure 42), nous indiquant du même coup où se trouve l'opérateur et donc à quelle situation à risques il est exposé (les risques n'étant pas les mêmes s'il se trouve devant la machine ou devant l'armoire de la commande numérique).



**Figure 42 : Fonctions "départ cycle".**

De la même façon notre modélisation tient compte des configurations différentes pour le positionnement et le maintien des pièces à usiner. Il est possible pour maintenir les pièces d'utiliser soit des ventouses modulables sur la table (Figure 43), soit un montage. La seconde solution étant préférée pour le maintien de pièces de petites dimensions permettant, par une optimisation de la surface de dépression, d'augmenter la force de maintien.



**Figure 43 : Système de maintien des pièces par ventouses modulables.**

Nous avons modélisé les deux configurations de travail possibles afin de reproduire les implications fonctionnelles qu'elles pouvaient avoir sur le système complet. Une description de l'enchaînement des blocs et des fonctions nécessaires au maintien d'une pièce par un montage d'usinage est décrit sur la Figure 44 permettant de voir l'intégration de l'opérateur dans la modélisation. Par cette modélisation fonctionnelle, nous avons reproduit les enchaînements d'actions nécessaires au bon fonctionnement du système. Nous avons également intégré les dysfonctionnements dans notre modélisation, nous permettant de voir les conséquences de telles ou telles défaillances d'un composant, de l'homme, ou d'une fonction sur l'ensemble du système.

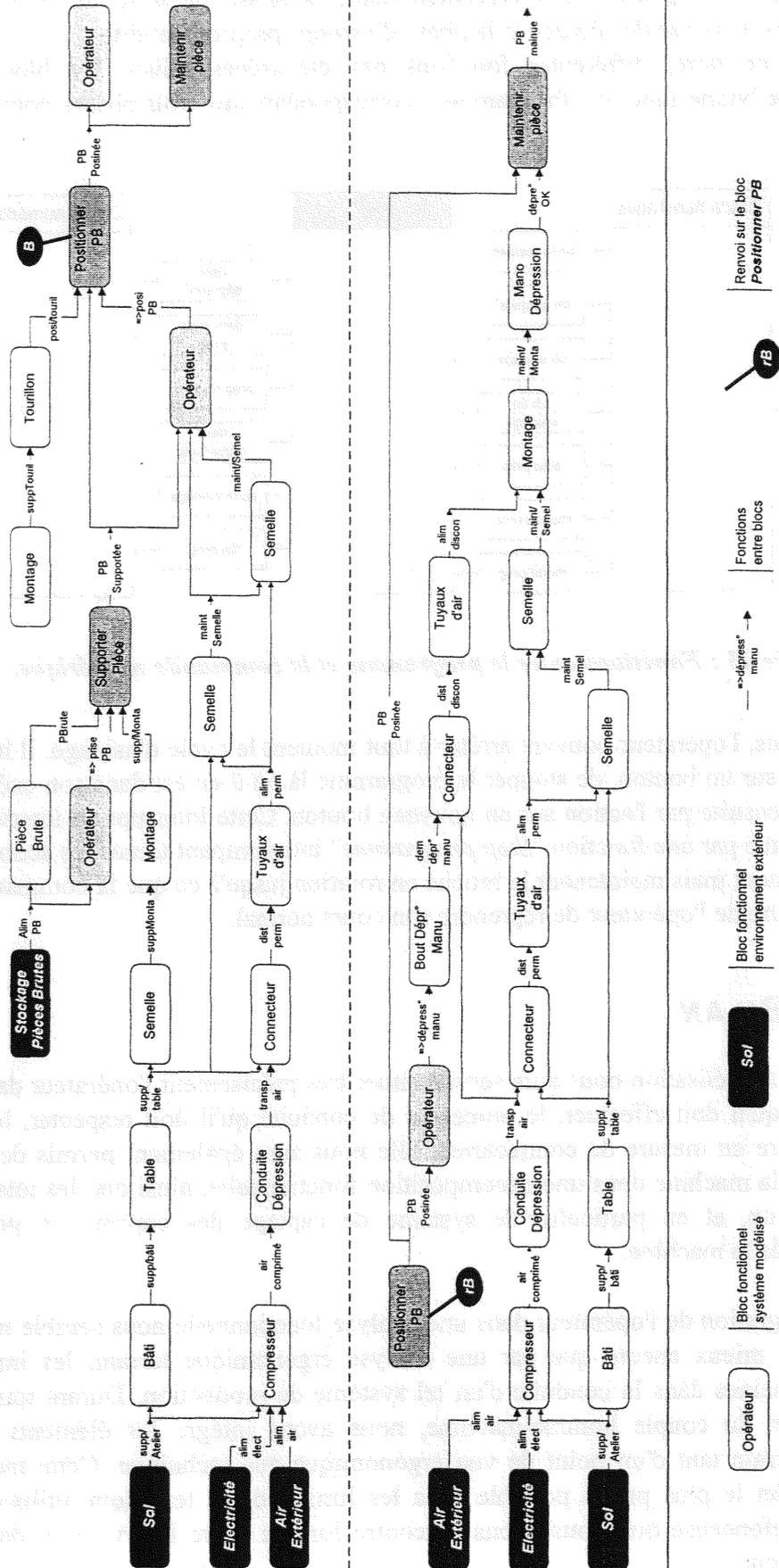
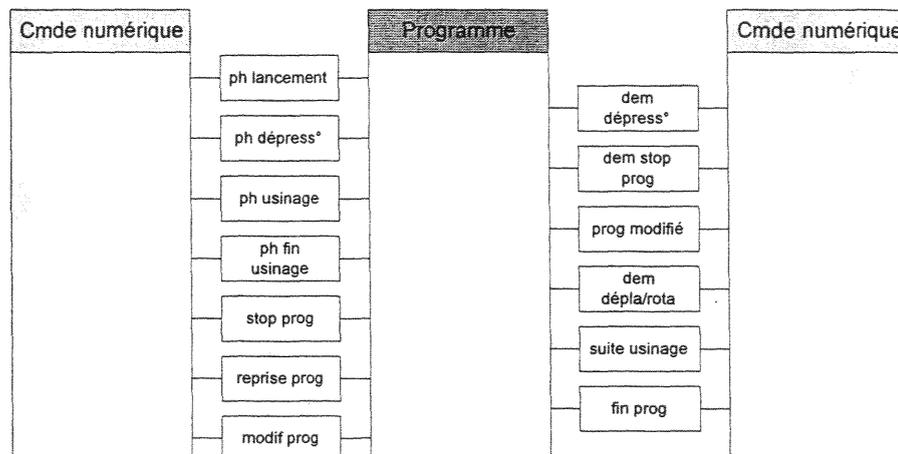


Figure 44 : Enchaînements pour le maintien d'une pièce par le montage.

Un processus d'usinage a été modélisé, correspondant à celui analysé auparavant et intégrant les trois phases vues précédemment : la phase de *mise au point de nouveaux programmes*, la phase de *réglage* et la phase d'*usinage* proprement dite.

Pour ce faire, différentes fonctions ont été créées reliant les blocs fonctionnels "Commande Numérique" et "Programme", correspondant aux trois phases nommées ci-dessus (Figure 45).



**Figure 45 : Fonctions entre le programme et la commande numérique.**

De plus, l'opérateur pouvant arrêter à tout moment le cycle d'usinage, il lui est possible, par l'action sur un bouton, de stopper le programme là où il en est dans son exécution et de le poursuivre ensuite par l'action sur un nouveau bouton. Cette interruption intervient au niveau du programme par une fonction "*Stop programme*" interrompant toutes les actions sur les axes de déplacement mais maintenant la broche en rotation jusqu'à ce que la commande numérique reçoive l'ordre de l'opérateur de reprendre son cours normal.

### 3. BILAN

Cette modélisation nous aura servi à situer très précisément l'opérateur dans le système, les actions qu'il doit effectuer, le processus de conduite qu'il doit respecter, les défaillances qu'il doit être en mesure de contrecarrer. Elle nous aura également permis de situer chaque élément de la machine dans une décomposition fonctionnelle, ainsi que les interactions qu'ils ont entre eux, et en particulier le système de captage des copeaux et poussières avec l'ensemble de la machine.

L'intégration de l'opérateur dans une analyse fonctionnelle nous semble nécessaire pour comprendre mieux encore que par une analyse ergonomique terrain, les implications des actions humaines dans la conduite d'un tel système de production. Durant toute la phase de modélisation du couple homme-machine, nous avons intégré les éléments identifiés par l'analyse terrain tant d'un point de vue ergonomique que technique. Cette modélisation est donc le reflet le plus précis possible avec les limites de la technique utilisée, du système opérateur-défonceuse que nous avons rencontré lors de notre intervention dans l'entreprise d'ameublement.

Chacune des actions de conduite de l'opérateur, chacune des phases de production, chaque configuration de travail, chacun des composants de la machine sont modélisés dans leur fonctionnement normal aussi bien qu'au travers de leurs dysfonctionnements réels ou supposés. Cette description que nous avons souhaitée la plus complète possible, nous a permis d'approfondir notre connaissance du système homme-machine.

Dans l'expérience de conception distribuée qui est présentée dans la partie suivante de ce mémoire, cette modélisation sert à l'acteur fonctionnel. Par la décomposition fonctionnelle et dysfonctionnelle du couple homme-machine, cette modélisation a permis à l'acteur fonctionnel de positionner chacun des éléments en relation avec l'opérateur et le système de captage. La décomposition fonctionnelle, lui a permis d'avoir une vue très précise d'une défonceuse dans sa configuration réelle d'exploitation.

Ainsi, si l'on effectue un parallèle avec le modèle du processus d'accident vu précédemment, cette modélisation aboutissement d'une démarche d'instruction tant ergonomique que technique, fonctionnelle que dysfonctionnelle, nous a permis d'identifier les éléments à l'origine des accidents au travers des interactions qu'ils peuvent avoir. Il nous faut maintenant les prendre en compte afin de pouvoir arrêter le processus d'accident au plus tôt, soit en évitant les situations dangereuses, soit en prévenant l'opérateur de lésions graves.



# C. INTEGRATION

<b>I. CONCEPTION</b>	<b>78</b>
1. INGÉNIERIE SÉQUENTIELLE	79
2. INGÉNIERIE SIMULTANÉE	81
<b>II. FONDEMENTS DU MCD</b>	<b>84</b>
<b>III. EXPÉRIENCE MENÉE</b>	<b>87</b>
1. OBJECTIFS VISÉS	87
2. PROPRIÉTÉS DES MODULES MCD	88
a) Module fonctionnel	89
b) Module structurel	90
c) Module fabrication	91
d) Module industrialisation	91
e) Module utilisation	92
f) Module ventilation	93
g) Module ergonomie	93
h) Module réglementation	94
3. ANALYSE DES ÉCHANGES ENTRE ACTEURS	94
a) Temps consacré	95
b) Auto-organisation	95
c) Prise de décision commune	99
d) Blocage dans le déroulement	98
e) Langage commun	99
f) Parallélisation de fonctionnement	101
g) Intégration des acteurs	101
h) Données manipulées	105
i) Point de vue des acteurs	107
4. BILAN DE L'EXPÉRIENCE	109

## I. CONCEPTION

A la base de toute conception, il existe un concept du futur produit ou système [PRIMECA\_98] [Blaise\_96] [Lhoste\_94]. Ce concept n'est autre qu'une représentation mentale d'un objectif précis auquel doit répondre le futur produit. Pour aboutir à ce nouveau produit il est nécessaire de transformer ce concept en résultat concret et tangible qui puisse être fabriqué, commercialisé, exploité, ... jusqu'à sa destruction finale.

Ce processus de matérialisation du concept en résultat se produit selon une méthode particulière, plus ou moins formalisée. Durant cette étape, différents savoirs et savoir-faire sont mis en œuvre en association avec des outils et des référentiels relatifs à la conception tels que la CAO, les référentiels normatifs, le prototypage rapide, la simulation, ... au travers d'une démarche de conception.

Il est alors possible de décrire le processus de conception comme étant une matérialisation d'un concept en produit faisant intervenir divers savoirs, savoir-faire et outils associés aux différents métiers intervenant dans la conception d'un produit, selon une démarche formalisée ou non, organisant tant les activités que les acteurs (Figure 46).

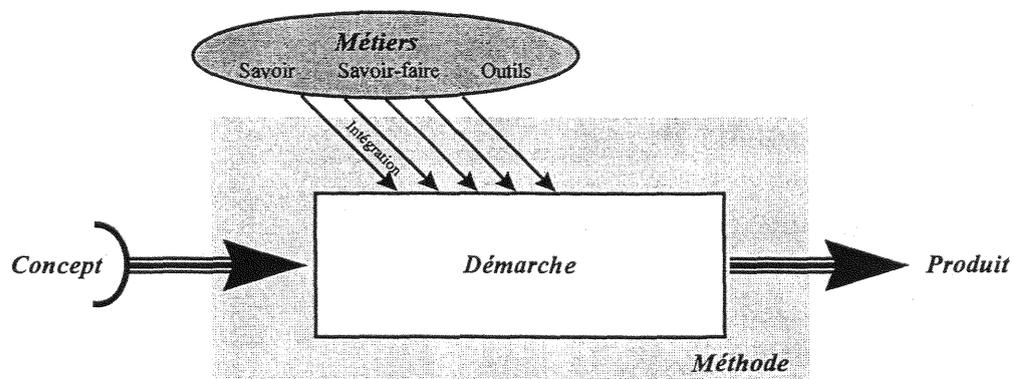


Figure 46 : Du concept au produit (d'après [Bonnevie\_98]).

Pour mener à bien un processus de conception, il faut non seulement décrire au plus juste les attentes du client afin de se représenter au mieux le "concept" du futur produit, mais également intégrer l'ensemble des métiers (et donc les acteurs représentants de ces métiers) dans le processus ainsi que les outils dont ils ont besoin, au mieux dans une démarche formalisée permettant un ordonnancement des activités et une planification des tâches.

Il faut donc travailler à l'intégration des savoirs, des savoir-faire et des outils métiers, à l'organisation des activités et à l'organisation des acteurs dans le processus de conception. Nous présentons dans un premier temps les approches d'organisation des acteurs au travers de l'ingénierie séquentielle et de l'ingénierie concourante tout en identifiant l'intégration possible des métiers et plus particulièrement le problème d'implication de certains métiers dans la conception. Dans un second temps, nous présenterons l'approche que nous souhaitons utiliser au travers d'une expérience visant à l'amélioration du système de captage des particules sur une défonceuse à commande numérique.

## 1. INGENIERIE SEQUENTIELLE

Au cours de la vie d'un produit, quel qu'il soit, celui-ci est transformé par un certain nombre d'acteurs différents, à des moments différents de sa vie. Le produit émerge de cette interaction de multi points de vue d'acteurs différents [Brissaud\_98]. Par l'implication des ces points de vue, le produit se trouve créé, fabriqué, transformé, modifié, adapté, ... puis enfin détruit. Ces différentes représentations physiques du produit, peuvent dans certains cas être directement mises en évidence au travers de l'activité des acteurs qui y travaillent. Ainsi, lorsque le produit passe de l'état de concept à son état physique, il subit une transformation, une conception, faisant intervenir divers acteurs. Ces acteurs participent traditionnellement à la démarche de conception, à savoir, les acteurs élaborant le cahier des charges, les acteurs travaillant à la définition des fonctions à remplir par le nouveau produit, les acteurs transformant ces fonctions en entités structurales. Les acteurs fabriquant le produit, ceux qui le commercialisent et ceux qui l'utilisent ne sont pas intégrés dans un tel processus.

La mondialisation, la réduction des temps de mise sur le marché, la réduction du temps de vie du produit, a conduit les industriels à optimiser leur processus de conception après avoir épuisé les solutions d'amélioration au niveau de la production. Ils ont alors travaillé à la structuration de leurs étapes de conception, afin d'optimiser les actions des acteurs intégrés à ces étapes. Les cycles de vie et de conception, ont alors vu leur intérêt grandir permettant aux industriels d'optimiser les échanges entre ces acteurs de la vie du produit. Pourtant, ils n'ont pas permis d'intégrer de nouveaux acteurs tels que les ergonomes, les acteurs du recyclage, les acteurs de la sécurité, ... dans la conception. Ainsi, le domaine de la sécurité, qui intéresse plus particulièrement nos travaux, n'a pas trouvé de place naturelle dans les structures de cycle de vie.

La vie de tout produit, peut être décrite selon un cycle de vie depuis les étapes de spécifications jusqu'à la destruction du produit [Leleu-Merviel\_97]. Les cycles de vie fleurissent dans la littérature comme étant une arme de contrôle de l'évolution de projets. Ils permettent de décrire l'évolution de la vie du produit selon différentes étapes permettant de positionner les notions de concept, la notion de produit fabriqué, exploité et détruit (Figure 47).

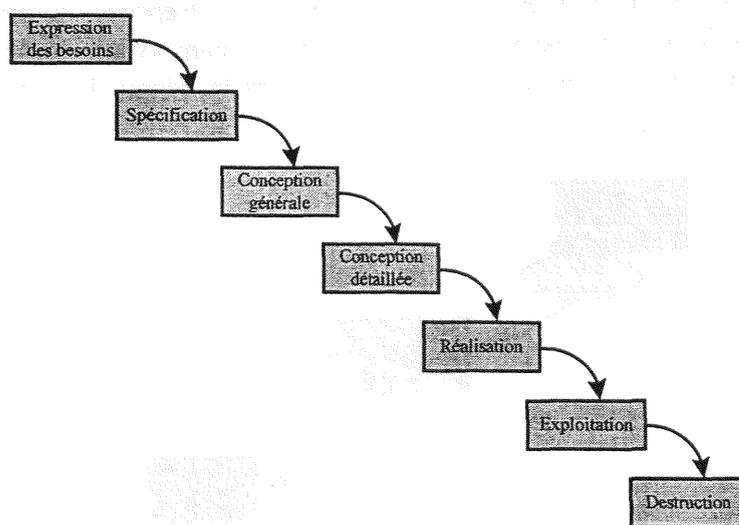
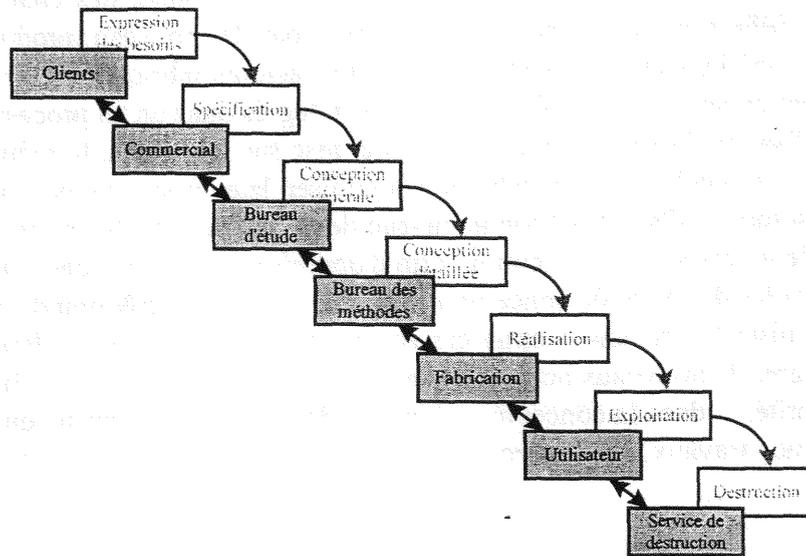


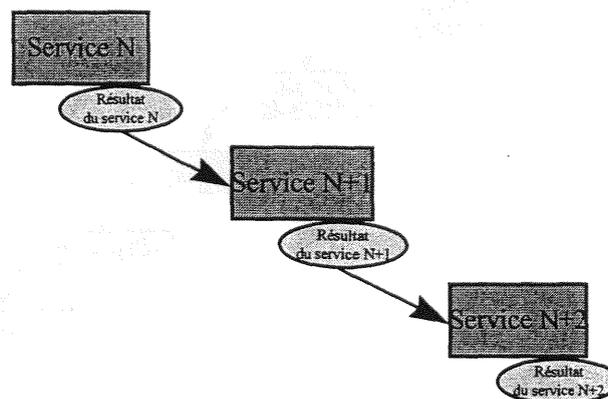
Figure 47 : Cycle de vie en "cascade".

De nombreuses démarches de conception s'appuient sur ces notions plus ou moins précises selon le modèle de cycle de vie employé. Les cycles de vie décrivant les étapes d'une étude (spécification, analyse, conception générale puis détaillée, validation, réalisation, tests, exploitation, destruction), il apparaît simple à l'industriel de calquer les interventions de ses acteurs à ce séquençement. Ces modèles de cycle de vie sont le support d'une vue Activités des acteurs mais également d'une vue métiers et enchaînement de l'intervention de ces métiers. En effet, le cycle de vie apporte un cadre de déroulement précis dans la planification des interventions des acteurs de la vie d'un produit et donc des acteurs de la conception de ce produit (Figure 48). Certains considèrent ces cycles de vie comme étant une référence absolue et idéale du séquençement des étapes de la vie d'un produit.



**Figure 48 : Cycle de vie en "cascade" avec identification des services par étapes.**

Ces cycles de vie sont représentatifs du cloisonnement existant dans les entreprises. En effet, les acteurs et donc les services associés, intervenant normalement dans le cycle de vie d'un produit, ne travaillent que très peu de façon coopérative : suivant l'enchaînement des étapes décrites au travers du cycle de vie de référence de l'entreprise, ils identifient un besoin qui est le résultat du travail des acteurs du service intervenant avant eux, puis élaborent une solution, dans les limites de leurs compétences, qui sera le départ du travail des acteurs de l'étape suivante (Figure 49).



**Figure 49 : Enchaînement des actions de conception séquentielle.**

Ainsi le produit, au cours de sa vie, passe d'une étape à une autre, d'un service à un autre, sans que le service  $N$  n'ait été informé des décisions prises par le service  $N+1$  (et vice versa). De même lorsque le service  $N$  travaille sur un projet, les autres services ne travaillent pas sur le même projet, et ne sont tenus au courant du travail de ce service qu'au travers des documents qu'il leur transmet, une fois son travail terminé. De nombreuses décisions, par exemple, du service "Bureau d'étude" sont ainsi prises sans que le service "Fabrication" n'en soit informé. Peu de concertations sont effectuées, reléguant ainsi les services aval à de simples services d'exécution, et plaçant les services le plus en amont du cycle de vie du produit, en position dominante, leur attribuant un rôle de créateur et de décideur. Pourtant ces phénomènes ne sont pas l'apanage des acteurs travaillant en amont du cycle de vie, mais au contraire, sont distribués dans l'action de chacun des acteurs et des interactions entre ces acteurs [Jeantet\_98] [Leplat\_90].

La conception, décrite comme étant une méthode permettant de transformer un concept en produit, se base sur des besoins définis avec le client. Cette expression du besoin s'effectue avant le départ d'un processus de conception en terme d'objectifs visés par le produit. Chacun s'accordant à dire que les objectifs, l'évaluation et l'expression du problème à résoudre évoluent au cours du temps, est-ce que l'expression de ce besoin ne doit être définie qu'une fois pour toute au début du cycle de vie du produit, sans qu'elle ne puisse évoluer durant la vie du produit ? N'en serait-il pas de même pour les autres étapes du cycle de conception d'un produit ? L'ingénierie séquentielle ne laisse pas la possibilité à l'évolution et à la précision toujours croissante au fur et à mesure de l'avancement de la conception et de l'avancement de la vie du produit, des besoins du client.

De plus, les cycles de vie, par cette représentation séquentielle ne permettent pas d'identifier et d'intégrer d'autres acteurs que ceux intervenant dans une étape et une seule. Ainsi, l'ergonomie<sup>32</sup>, visant à assurer les meilleures conditions d'utilisation pour éviter toute forme d'atteinte à la santé et garantir une réelle efficacité du dispositif technique en l'adaptant aux conditions réelles de l'utilisation [Dir\_97094\_CO40], n'a pas de place dans de telles représentations. Il en est de même pour nombre d'acteurs.

## 2. INGENIERIE SIMULTANEE

A l'opposé de cette démarche séquentielle supportée par les cycles de vie, est né, à la fin des années 80 aux Etats Unis, le concept de "*concurrent engineering*". De nombreuses définitions ont été données dans la littérature [Sohlenius\_92] [Evbuomwan\_94] [Cerezuela\_96] [Vallet\_98] [Van Handenhoven\_98] [Feschotte\_98], mais l'on peut s'entendre en définissant le concurrent engineering comme une "*approche organisationnelle systématique tendant vers la conception simultanée et intégrée des produits et de leurs méthodes et procédés de fabrication associés ainsi que de la logistique de soutien nécessaire à l'exploitation de ces produits par leur utilisateur final*".

Il s'interprète en français par *ingénierie simultanée* traduisant la parallélisation des activités ou par *ingénierie concourante* traduisant le principe d'objectif commun aux diverses activités, mais également par *ingénierie intégrée* définie par l'AFNOR [NF X\_50-415] comme

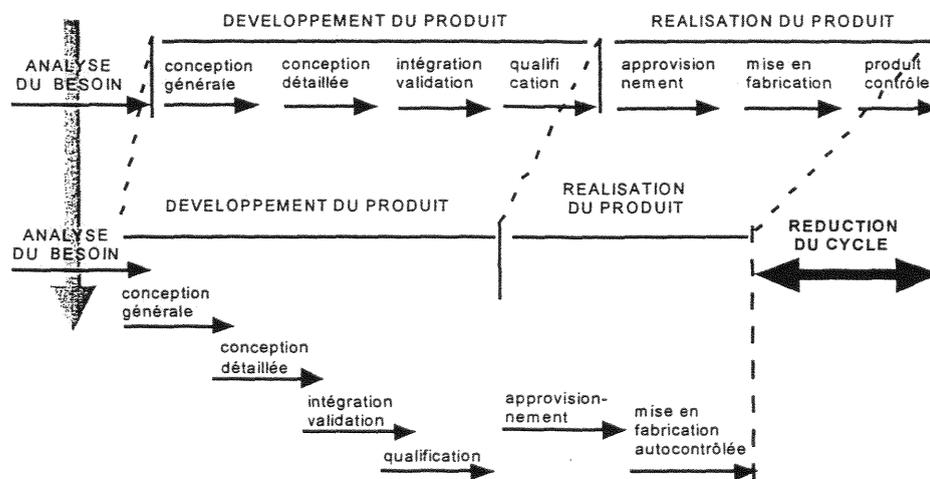
<sup>32</sup> *Ergonomie* : Mise en œuvre de connaissances scientifiques relatives à l'homme en activité, et nécessaires pour concevoir des outils, des machines, des dispositifs et processus de travail, qui puissent être utilisés avec le maximum de confort, de sécurité et d'efficacité (SELF : Société d'Ergonomie de Langue Française).

étant une "approche permettant la conception intégrée et simultanée des produits et processus de production et de maintenance associés".

Comme le précise l'AFNOR, l'ingénierie simultanée est une approche tendant à ramener vers l'amont, la connaissance des métiers intervenant en aval de la conception comme l'industrialisation, la production, la commercialisation, ... et qui prend en compte les contraintes que ceux-ci génèrent.

Pour cela, il faut que tous les acteurs de la vie du produit (acteurs des services d'étude, des méthodes, de la production, des achats, du planning, des fournisseurs, de maintenance, ...) soient impliqués autour du même projet, sur une période de temps allant de la définition du projet jusqu'à la fin de vie du produit (tout au moins jusqu'à sa commercialisation). L'équipe pluridisciplinaire travaillant à la conception d'un nouveau produit selon la démarche d'ingénierie simultanée, est donc composée de divers acteurs de la vie du produit, selon le type de produit à concevoir, les moyens de l'entreprise, les objectifs visés, ...

Cette conception conjointe, ou co-conception, des produits et des processus associés, se déploie donc dans l'espace en organisant la rencontre entre les acteurs concernés et dans le temps en organisant le chevauchement des tâches à remplir plutôt que leur succession séquentielle. En cela, il n'est pas possible de représenter les tâches des différents acteurs selon un processus séquentiel. Il n'est donc pas possible de montrer les apports de l'ingénierie simultanée par une simple modification du cycle de vie d'un produit comme sur la Figure 50.



**Figure 50 : Présentation de l'apport de l'ingénierie simultanée par modification d'un cycle de vie (d'après [Foulard\_94]).**

En effet, comme nous l'avons montré auparavant, cette représentation, support de l'ingénierie séquentielle, présente une vue d'organisation des étapes mais de façon implicite une vue organisation des activités et des services d'une entreprise; elle reflète la communication entre les services de l'entreprise. Certes, même avec la mise en place de l'ingénierie simultanée, les activités des acteurs seront toujours plus ou moins séquentielles, mais, cette mise en place doit surtout permettre l'intégration d'autres acteurs, et la dilution des activités de chacun des acteurs dans le temps, du début du projet à la fin du projet, qui n'apparaît pas sur un cycle de vie "traditionnel modifié". Ainsi, il serait plus judicieux de représenter l'ingénierie simultanée selon deux schémas : un représentant l'enchaînement des activités (Figure 51), l'autre l'organisation des acteurs dans le projet (Figure 52).

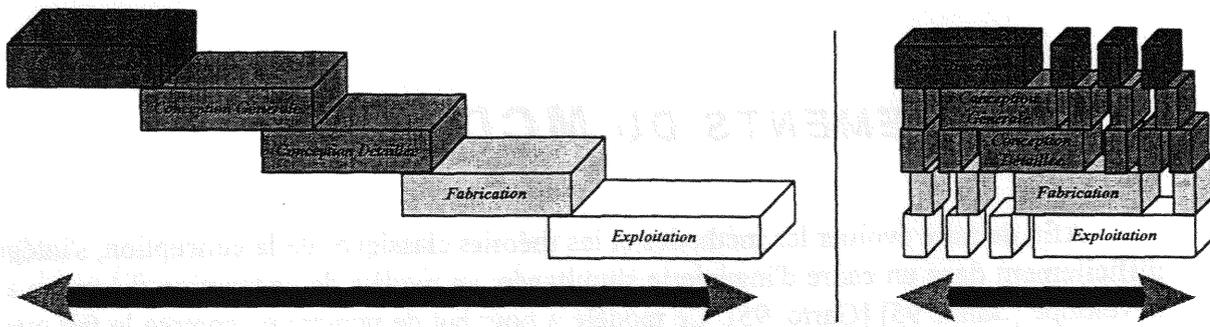


Figure 51 : Enchaînement des activités en ingénierie simultanée.

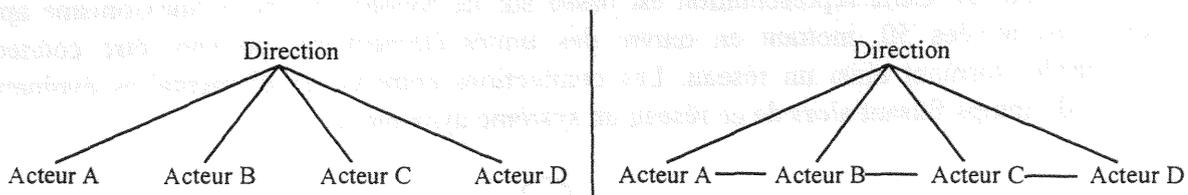


Figure 52 : Deux types d'organisation d'acteurs et de leurs interactions pour l'ingénierie simultanée.

Quelle que soit l'étape de conception du produit, chaque acteur doit pouvoir communiquer ses idées, ses décisions, impliquant durant toutes les phases de conception, chacun des acteurs identifiés et intégrés à ce processus.

Ce nouveau mode de travail se veut le garant d'une réduction des temps de développement, de l'amélioration de la qualité et de la diminution des coûts de conception. Ainsi les bénéfices que l'on peut escompter de la mise en oeuvre d'une démarche basée sur l'ingénierie simultanée, sont :

- > une meilleure rationalisation de la conception, des validations de produits et des processus de fabrication,
- > une diminution du cycle de production des produits,
- > une réduction significative des coûts de développement et de fabrication,
- > une amélioration de la qualité des produits,
- > une amélioration permanente du produit.

Pour cela, la communication entre les acteurs est un élément incontournable dans le concept d'ingénierie simultanée. Nécessairement fluide, elle peut être supportée par des moyens informatiques importants.

Nous présentons maintenant plus en détail un modèle de conception dite distribuée, s'intégrant dans le cadre d'une approche de type ingénierie simultanée, que nous allons mettre en oeuvre par la suite.

## II. FONDEMENTS DU MCD<sup>33</sup>

Afin de faire évoluer les méthodes et les théories classiques de la conception, s'intégrant difficilement dans un cadre d'ingénierie simultanée, un modèle de conception théorique a été développé [Salau\_95] [Garro\_95]. Ce modèle a pour but de prendre en compte le fait que les modèles classiques ne permettent pas la délégation de responsabilité à chaque acteur de la conception alors que l'ingénierie simultanée, au travers du parallélisme des interventions, le requiert.

Ce modèle peut être représenté (Figure 53) par un ensemble de nœuds interconnectés les uns aux autres. Cette représentation est basée sur les fondements du connexionisme apparu dans les années 50, mettant en œuvre des unités élémentaires pouvant être connectées ensemble, formant ainsi un réseau. Les connections entre unités élémentaires évoluent au cours du temps faisant alors de ce réseau un système dynamique.

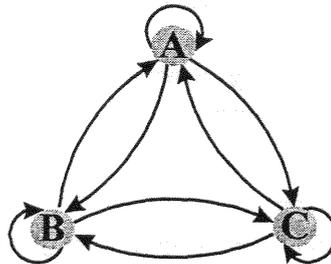


Figure 53 : Graphe du modèle connexionniste du MCD.

De ce réseau d'unités interconnectées émergent des potentialités nouvelles supérieures à celles de l'ensemble des unités additionnées. C'est comme si la somme des potentiels de chaque unité était inférieure à la potentialité du réseau.

Cette notion d'émergence est très importante pour la conception de produit, elle permet d'assurer que la mise en commun de point de vue multiples organisés sous forme d'un réseau de type connexionniste, débouche sur la création d'un nouveau produit.

Un tel réseau doit avoir les propriétés suivantes :

- **Hétérogénéité** : chaque module constituant le réseau possède ses propres règles de fonctionnement.
- **Non-clôture** : un module d'un réseau peut être défini comme module d'un autre réseau. Cette propriété permet d'envisager une extension du modèle à plus de trois modules, à l'ensemble des métiers de la conception et donc de la vie du produit, mais permet également à l'activité de conception d'être connectée à d'autres activités de l'entreprise, voire à d'autres entreprises.
- **Non-atOMICITÉ des modules** : ainsi chacun des modules peut être éclaté en "sous-modules" respectant les mêmes principes du réseau.

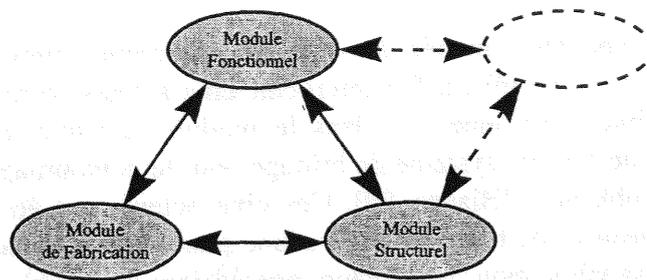
<sup>33</sup> MCD : Modèle de Conception Distribuée.

MCD est défini comme étant un réseau de modules dans lequel chacun des nœuds possède un objectif local particulier et raisonne avec son propre langage. La fonction de chacun des modules est remplie, en pratique, soit par un acteur seul, soit par une équipe d'acteurs.

Dans la thèse de Salau, ce modèle était restreint à trois modules : fonctionnel, structurel et fabrication (Figure 54). Les objectifs locaux de ces trois modules étant :

- pour le module **fonctionnel** : défendre l'intérêt de l'utilisateur du produit à concevoir en définissant les besoins à remplir par ce produit en fonction de la définition du problème par le client utilisateur,
- pour le module **structurel** : choisir les composants, les réunir pour conférer à la structure les meilleurs performances,
- pour le module **fabrication** : réaliser le produit conçu en utilisant au mieux le potentiel de fabrication de l'entreprise.

L'objectif global du système résultant étant la conception du produit.



**Figure 54 : Diagramme schématique des modules de conception.**

Cette structure est basée sur le principe de la distribution, dans le temps et l'espace, mais également des connaissances et des acteurs, des instruments et des objets intermédiaires [Brissaud\_98]. Cette distribution a déjà été mise en évidence au travers de diverses expériences [Bucarelli\_94] [Idelmerfaa\_96] [Ris\_98] et plus particulièrement par celles basées sur le modèle de conception distribuée [Salau\_95] [Blanco\_98]. De même que l'ingénierie simultanée tend à réduire la distribution dans le temps et dans l'espace, MCD améliore le fonctionnement de la distribution des acteurs, des ressources et des connaissances.

Dans toute organisation, chacun des acteurs de la conception (et plus globalement de la vie d'un produit), possède et manipule ses propres instruments, outils, a son propre vocabulaire, ses logiques de fonctionnement différentes des autres métiers. La connaissance est donc distribuée au travers des acteurs et de leur organisation. Mais cette connaissance n'est pas figée, elle évolue, change, disparaît, ... Cette connaissance distribuée n'est donc pas cernable précisément mais attachée aux acteurs de la conception.

Tous les outils et supports d'informations manipulés au cours de la conception sont autant d'*objets intermédiaires* [Mer\_94] qui instrumentent le processus de conception. Il est clair que ces objets manipulés par les acteurs, étant propres à un métier ou communs à tous, sont distribués dans l'espace et dans le temps. Ils mettent en relation les individus et les connaissances produites dans des lieux et des instants différents, permettant l'interaction entre les acteurs et les connaissances hétérogènes. Par ce rôle, ils permettent l'émergence du produit et la structuration entre les acteurs et les connaissances échangées [Mer\_95]. MCD se centre

sur ces échanges de communications, pour en faire l'élément principal permettant l'émergence de l'objet à concevoir, mais également l'émergence de l'organisation des acteurs entre eux.

Diverses expériences mettant en œuvre MCD ont été menées. La première d'entre elles avait pour objectif de concevoir un touret à meuler [Garro\_95]. Pour cela trois acteurs ont été identifiés (fonctionnel, structurel et fabrication), "spécialistes" dans leurs disciplines, jouant le rôle de chacun des trois modules correspondants. Pour cette expérience ils ne pouvaient communiquer que par message écrit, étant chacun localisé, dans une pièce différente. Par une fiche de raisonnement, émise chaque fois qu'une question était posée, l'expérimentateur possède une trace complète du déroulement de l'expérience, permettant de faire la part de ce qui se passe dans chaque module et le résultat produit. L'expérience s'est déroulée sur 5 demi-journées aboutissant à la conception quasi complète du touret à meuler. Un graphe d'enchaînements des communications entre les acteurs a pu être élaboré, montrant la parallélisation dans le fonctionnement du réseau et des tâches. Il a été également démontré que le réseau faisait preuve de robustesse, lui permettant de s'assurer de la convergence des solutions par un morcellement des tâches et des décisions. De plus, cette expérience a conduit à montrer la prédominance de l'acteur structurel par rapport aux autres acteurs tant par le nombre de communications qu'il a émis que par l'analyse des communications par couple d'acteurs.

La seconde expérience menée à peu près en même temps que notre expérience, construite comme un jeu de rôle, a fait intervenir cinq acteurs regroupés dans trois modules (deux dans le module fonctionnel, un dans le module structurel et deux dans le module fabrication) pour concevoir un système de bridage pour le contournage de pièces de bois dans l'industrie de l'ameublement [Blanco\_98]. Ces cinq acteurs ont été réunis dans une même pièce durant deux séances de trois heures chacune pour aboutir à une définition complète du produit permettant sa fabrication. Les acteurs possédaient l'ensemble des données nécessaires au problème et ne pouvaient faire appel à un quelconque expérimentateur pour les aider. Ils avaient à leur disposition des feuilles de papier, un tableau blanc et quelques ouvrages technologiques de référence. L'analyse a été effectuée à partir des informations filmées durant l'expérience et des feuilles de papier échangées. Ainsi il a été possible d'identifier différents formalismes des objets intermédiaires échangés ainsi que quatre périodes d'activité :

- une phase "*d'appropriation du problème*" durant laquelle les acteurs ont discuté autour du cahier des charges rédigé préalablement par un des acteurs fonctionnels,
- la phase "*d'élaboration d'un principe de solution*" durant laquelle le produit émerge et est figé,
- la troisième phase correspondant à la "*définition de la solution*", développement du principe de solution élaboré dans la phase précédente,
- la dernière phase de "*définition des détails*" de pièces pour permettre d'aboutir à la fabrication du produit.

Toute cette expérience s'est basée sur l'analyse des objets intermédiaires échangés entre les acteurs. Ainsi il a été possible d'identifier certains objets comme étant non seulement des traces de l'activité de conception mais également comme marqueurs temporels du processus de conception, marquant les limites de certaines phases d'élaboration de solution. L'auteur précisant toutefois que les phases identifiées ne marquent que des tendances et donc qu'il ne faudrait pas conclure trop rapidement à un séquençement linéaire.

### III. EXPERIENCE MENEES

#### 1. OBJECTIFS VISES

Partant du constat que MCD peut être un support à une expérience s'inscrivant dans le cadre de l'ingénierie simultanée, qu'il est possible d'intégrer de nouveaux acteurs dans le processus de conception d'un produit, nous avons décidé de mettre en œuvre une expérience basée sur ce modèle.

Pour cela, nous avons identifié sur les défonceuses à commande numérique un élément intéressant à reconcevoir : le système de captage des particules. Cette partie de machine a été mise en évidence comme étant source de gêne et de risques pour les opérateurs travaillant sur ces machines, par l'analyse effectuée sur le terrain (Cf. "*Analyse ergonomique terrain*"), par les utilisateurs eux-mêmes et au travers d'une demande formulée à l'INRS en 1992 par les Caisses Régionales d'Assurance Maladie. Ce problème a été également choisi pour son réel intérêt technique, faisant intervenir de multiples acteurs et laissant entrevoir des actions de valorisation technologiques directes auprès des constructeurs de machines.

Après avoir identifié une machine (mise à notre disposition par l'ENSTIB<sup>34</sup>) susceptible de recevoir une amélioration éventuelle de son système de captage, nous avons défini un certain nombre d'objectifs visés avant de mettre en place l'expérience. Ainsi, nous souhaitions :

- montrer la possibilité d'intégrer des acteurs garants de la sécurité dans une expérience de conception,
- améliorer le système de captage de la machine d'étude.
- démontrer expérimentalement l'extension du MCD à d'autres modules,
- démontrer expérimentalement l'applicabilité du MCD dans une expérience proche des conditions industrielles,
- réaliser le produit conçu et le tester.

Désirant travailler à l'amélioration du système de captage des particules de bois, nous avons identifié huit modules spécifiques nécessaires à notre expérience (Figure 55) :

- les trois modules de "base" du MCD : les modules *fonctionnel*, *structurel* et de *fabrication*,
- un module nommé H.S.E.<sup>35</sup>, spécialisé dans les problèmes de sécurité que l'on peut décomposer en trois sous-modules<sup>36</sup> : un sous-module *ergonomie* (garant de l'aspect ergonomique et notamment des points mis en évidence par l'analyse terrain comme importants à prendre en compte dans une reconception), un sous-module *ventilation* (spécialiste des aspects émission et captage des particules de bois) et un sous-module

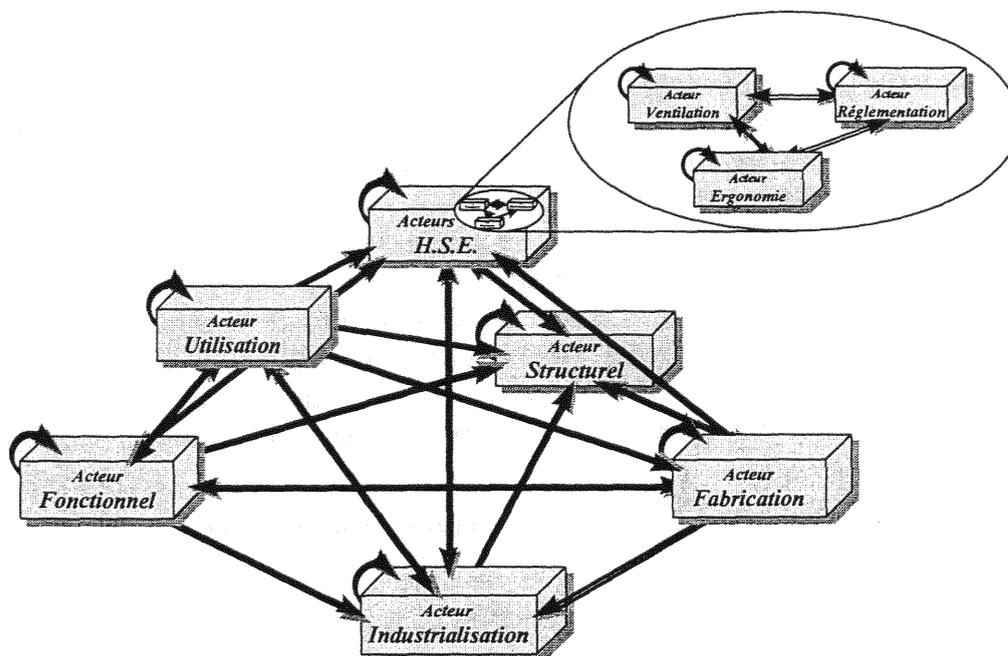
<sup>34</sup> ENSTIB : Ecole Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois.

<sup>35</sup> H.S.E. : Hygiène Sécurité Ergonomie.

<sup>36</sup> Ces sous-modules, et donc les acteurs correspondants, seront, pour des questions de simplification, nommés "*sécuritaires*" par opposition aux autres nommés "*non sécuritaires*".

**réglementation** (spécialiste quant au respect des exigences listées dans les directives européennes et les normes de sécurité),

- un module dénommé **industrialisation** pouvant apporter à notre expérience sa vision industrielle de la fabrication de systèmes mécaniques. Cet acteur a été envisagé dès le départ comme étant potentiellement le fabricant d'un éventuel prototype émergeant de l'expérience,
- un module représenté par un **utilisateur** de ces machines (plus précisément de la machine étudiée) nous apportant toute la connaissance de l'utilisation de telles machines et les attentes correspondantes.



**Figure 55 : Modèle de conception distribuée étendu à huit acteurs.**

Une fois défini ces modules, nous avons recherché des personnes "expertes" dans chacun des domaines couverts. Ainsi, différents acteurs tant internes à l'INRS qu'externes (CRAM et entreprise de mécanique) ont été choisis en fonction de leurs capacités mais également de leurs possibilités à participer à une expérience de ce type. Chaque module et sous-module est représenté par un et un seul acteur.

## 2. PROPRIETES DES MODULES MCD

Chacun des modules (et donc des acteurs) de notre expérience possède un objectif propre. Les objectifs et les propriétés de chaque module ont été établis avant le lancement de l'expérience. Les acteurs ont été informés des propriétés de l'ensemble des modules, de leurs objectifs locaux ainsi que des moyens dont ils pouvaient se servir. L'objectif global étant "d'améliorer le système de captage de la machine d'étude par une meilleure prise en compte de l'émission de particules, tout en essayant de minimiser le débit d'air de ventilation". L'expérience devant se terminer par la fabrication et le test sur la machine d'étude du système développé.

L'expérience a débuté par une réunion avec l'ensemble des acteurs pour que tous puissent se connaître et savoir quels étaient leur savoirs, leur savoir-faire, leurs compétences et leurs objectifs. Le tout afin que chacun puisse déléguer en fonction de ses propres objectifs et des capacités des autres acteurs. Ainsi, chacun sait jusqu'où il doit travailler, dans quelles limites, et ce que les autres peuvent apporter comme réponse aux problèmes qu'il se pose.

L'ensemble des acteurs, excepté l'acteur utilisation, ne connaissait la machine d'étude qu'au travers d'un film qui leur a été passé lors de la réunion d'ensemble montrant la machine en fonctionnement avec le système de captage actuel. Pour compléter cette information, différents types de système de captage que l'on peut rencontrer sur les défonceuses, leur ont été présentés. Toutefois, dans l'ensemble, les acteurs avaient une connaissance minimale de l'utilisation des défonceuses dans l'industrie du bois.

Tous les acteurs participaient à l'expérience tout en continuant à travailler à leurs activités normales. Notre expérience était comme un projet que les acteurs ont mené en plus de leur activité normale au sein de leur différentes organisations. L'implication des acteurs dans notre expérience, est très proche de celle rencontrée dans un projet industriel mené sur plusieurs mois. Ceci étant une différentiation importante par rapport aux deux expériences MCD présentées auparavant.

Nous allons maintenant décrire les objectifs et la démarche de chacun des acteurs tels qu'effectués au début de l'expérience ainsi qu'un rapide descriptif de leurs compétences.

### a) *MODULE FONCTIONNEL*

#### **Objectifs :**

*Il doit recenser, caractériser, ordonner et valoriser les besoins, l'environnement en utilisation, les fonctions principales et les contraintes ; ceci uniquement en terme de services à rendre et donc en dehors de toute référence à des solutions. Toutefois, il doit s'assurer que les besoins identifiés sont bien pris en compte dans la démarche de conception par les autres acteurs.*

#### **Démarche :**

Il doit :

- dans un premier temps, définir au mieux le besoin à remplir par le produit en fonction de la définition du problème,
- lister les fonctions du système de captage futur (il est bien entendu que le futur système peut et doit reprendre certaines fonctions des systèmes existants, et notamment celles déjà identifiées lors de la modélisation effectuée, tout en en identifiant éventuellement de nouvelles) :
  - identifier les besoins des utilisateurs,
  - identifier les contraintes liées à la réglementation,
  - identifier les fonctions liées à l'aspiration d'un point de vue ventilation,
  - tenir compte des indications de l'acteur ergonomie pour répondre aux besoins de l'utilisateur,
  - se préoccuper des soucis liés à l'industrialisation du futur produit,
- décrire le plus complètement possible ces fonctions et les hiérarchiser,

- s'assurer que les fonctions listées sont bien interprétées par les autres acteurs (ou plus particulièrement par certains acteurs qu'il juge plus impliqués),
- travailler en relation avec les autres acteurs afin que les fonctions principales décrites soient prises en compte dans le déroulement de la conception et qu'elles le soient jusqu'à la fin de l'expérience.

Pour mener à bien son rôle dans l'expérience, l'acteur fonctionnel s'appuiera sur la modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle qui a été effectuée suite à l'analyse ergonomique terrain. Cette modélisation doit lui apporter de nombreuses réponses en termes de fonctions sur la machine et d'actions de l'opérateurs en relation avec les différents éléments d'une défonceuse à commande numérique.

**Acteur :**

La personne qui joue le rôle fonctionnel est un ingénieur électromécanicien qui a eu, dans ses précédents postes, des fonctions similaires à celle qu'il doit jouer dans notre expérience. Cet ingénieur a en charge plusieurs études à l'INRS tant d'un point de vue technique que méthodologique. Cet acteur n'a pas de connaissances particulières de l'industrie du bois.

**b) MODULE STRUCTUREL**

**Objectifs :**

*Il doit choisir les composants qui peuvent le mieux possible répondre aux performances demandées par le produit.*

**Démarche :**

Il doit :

- travailler en relation directe avec l'acteur fonctionnel pour avoir les informations sur les fonctions du futur système,
- être capable de répondre à ces fonctions par des solutions techniques qui pourront être réalisées en fabrication,
- décrire un système permettant techniquement de répondre au cahier des charges (en résumé : améliorer le système de captage des défonceuses à CN),
- choisir des solutions techniques pertinentes selon les aspects coûts, dimensionnels, réglementaires, d'adaptabilité du système à la machine existante et à d'autre type de machine, et selon des critères liés à l'aspect captage des particules de bois, ...

L'acteur structurel tiendra compte de ce qui est fait dans le domaine de la mécanique par les fabricants d'équipements, de pièces en stock ou réalisées par l'atelier type (ensemble des moyens spécifiés par l'acteur fabrication).

**Acteur :**

Le rôle structurel est joué, dans notre expérience, par un technicien supérieur de formation bois, ayant de solides connaissances dans le dessin industriel et dans l'industrie du bois. Cette personne, au sein de l'INRS, a en charge des études visant à améliorer certains dispositifs de protection, de captage, d'aide, ... présents notamment sur les machines à bois.

### c) MODULE FABRICATION

**Objectifs :**

*Réaliser un produit en utilisant au mieux les potentiels de fabrication.*

**Démarche :**

Il doit :

- se mettre en relation directe avec l'acteur industrialisation afin de définir un ensemble de moyens techniques à disposition pour la réalisation future du système de captage issu de l'expérience. Cet atelier type regroupera les moyens de production de l'entreprise de l'acteur industrialisation et de l'atelier de l'INRS,
- identifier les besoins nécessaires à la réalisation de solutions techniques,
- optimiser les solutions techniques du futur système,
- tenir compte des problèmes d'assemblage des différentes parties du système,
- être capable de décrire l'enchaînement des usinages nécessaires à la réalisation des pièces avec les moyens de fabrication de l'atelier type.

Il est possible que pour certaines pièces, les moyens de fabrication de l'atelier type, n'en permettent pas la réalisation. La sous-traitance de la réalisation de ces pièces peut alors s'envisager (à voir avec l'acteur industrialisation pour l'étude de coût d'une telle opération).

Il faut qu'il soit capable de réaliser un prototype du système avec les moyens de l'atelier type, qu'il évalue les modifications nécessaires pour une industrialisation (en relation avec l'acteur industrialisation), qu'il propose des modifications dans la réalisation de certaines pièces du système pour optimiser les critères de coût, de qualité, de productivité.

**Acteur :**

La personne qui joue le rôle fabrication a durant plusieurs années travaillé en bureau d'étude et en fabrication dans plusieurs entreprises mécaniques. Au sein de l'INRS, ce technicien supérieur est chargé de réaliser les dessins des divers montages nécessaires aux études menées et la mise en place de bancs d'essais. Par cette fonction, cette personne connaît très bien les possibilités de l'atelier d'usinage de l'INRS. Cet acteur n'a pas de connaissances particulières de l'industrie du bois.

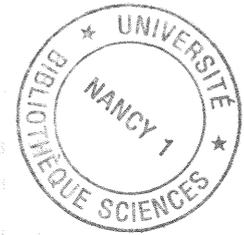
### d) MODULE INDUSTRIALISATION

**Objectifs :**

*L'objectif de l'acteur industrialisation est de s'assurer que le produit développé dans l'expérience de conception soit un produit commercialisable dans les entreprises du secteur de la seconde transformation du bois.*

**Démarche :**

Il faudra que le produit développé soit un produit conçu avec une optique de coût lui permettant d'être compétitif sur le marché particulier des défonceuses à CN et qu'il apporte des "plus" en terme d'argument de vente.



L'acteur doit :

- dans un premier temps, définir en accord avec l'acteur fabrication, les moyens de production qu'il possède dans son atelier, afin que l'acteur fabrication puisse connaître les moyens de fabrication sur lesquels il se basera,
- être en mesure d'évaluer le coût de réalisation du produit (le coût de réalisation des différentes pièces constituant le système de captage),
- les temps de réalisation, de mise au point, d'installation, ainsi que les coûts liés à chacune de ces étapes,
- éventuellement proposer des déclinaisons du produit.

**Acteur :**

Le rôle de l'industrialisation est tenu par un chef d'entreprise dont la spécialité est la mise au point et l'installation de dispositifs mécaniques particuliers pour l'industrie du bois. En cela, le rôle que cette personne joue dans notre expérience est en tout point le même que celui qu'elle a dans son entreprise.

**e) MODULE UTILISATION**

**Objectifs :**

*L'utilisateur de la machine d'essai et du système de captage existant, possède une connaissance importante du fonctionnement des défonceuses. Son objectif est de s'assurer que le nouveau système de captage lui apporte un confort d'utilisation supplémentaire par rapport à l'ancien système.*

**Démarche :**

Il doit :

- être en mesure de décliner les fonctions attendues par le futur système en relation avec l'acteur fonctionnel,
- décrire les configurations de fonctionnement normal de sa machine,
- s'assurer que le système développé lui permette de travailler dans diverses configurations et qu'il lui apporte un réel "plus" dans l'aspiration des particules de bois, pour cela il doit être capable de décrire l'environnement de travail qui est le sien lorsqu'il usine sur la défonceuse,
- évaluer l'impact technique d'une future installation du système de captage développé (vérifier que le système lui permet de changer d'outil en cours d'usinage par exemple),
- identifier des problèmes d'adaptabilité (technique, fonctionnelle, encombrement, automatisation, ...) du futur système sur sa machine,
- s'assurer que le système réponde bien aux attentes qu'il a (élimination des contraintes existantes : ergonomiques, gênes respiratoires, visuelles, tactiles, ...).

**Acteur :**

L'utilisateur de notre expérience est professeur à l'ENSTIB et a en charge la responsabilité du parc machines ainsi que l'ensemble des cours liés à la production sur machines à bois.

## f) MODULE VENTILATION

### Objectifs :

*S'assurer que le système de captage développé permette de réduire la concentration de particules de bois au niveau du poste de travail sur les défonceuses.*

### Démarche :

Il doit :

- décrire les principes de ventilation nécessaires pour évacuer les particules de bois,
- proposer des principes permettant d'améliorer les systèmes de captage sur ces machines,
- s'assurer que dans les solutions techniques, ces principes soient bien pris en compte,
- être capable d'évaluer des vitesses d'air minimum pour évacuer les particules.

### Acteur :

Technicien supérieur, la personne jouant le rôle ventilation, est chargée à l'INRS, de plusieurs études liées à la ventilation dans les industries du bois. A ce titre ce technicien étudie certains systèmes de contrôles utilisés dans la surveillance des installations d'aspiration industrielle. Il participe également à la rédaction d'un guide servant à l'identification des caractéristiques de l'émission des particules sur les machines à bois. Il possédait une certaine connaissance de la machine d'étude pour avoir, préalablement à l'expérience de conception, participé aux tests de ventilation effectués avec le système de captage d'origine.

## g) MODULE ERGONOMIE

### Objectifs :

*Evaluer l'impact du nouveau système de captage sur l'activité de l'opérateur, sur la nécessaire prise d'informations de l'utilisateur au niveau de la zone de travail de l'outil.*

### Démarche :

Il doit :

- connaître l'activité réelle de l'utilisateur sur ces machines (pour cela il s'inspire du travail effectué dans le cadre de l'intervention dans l'entreprise d'ameublement),
- évaluer l'impact d'un mauvais fonctionnement du système de captage sur les conditions de travail de l'utilisateur et son environnement,
- imaginer l'activité future de l'utilisateur avec le nouveau système,
- tenir compte des différentes phases de travail ; notamment les phases de réglages, de mise au point de nouveaux programmes, de changement d'outil, de maintenance, ...

### Acteur :

L'ergonome de notre expérience, travaille au sein de la CRAM Nord Est à l'étude de diverses installations industrielles d'un point de vue ergonomie. De plus, il a, dans le passé, travaillé à l'amélioration des conditions de travail dans plusieurs menuiseries.

## h) MODULE REGLEMENTATION

### Objectifs :

Il doit s'assurer que le nouveau système de captage réponde aux exigences des directives en vigueur ainsi qu'aux prescriptions techniques décrites dans les normes s'appliquant à ces machines.

### Démarche :

Il doit :

- conseiller sur des solutions techniques permettant de répondre aux attentes réglementaires et normatives,
- vérifier que le système réponde aux exigences des directives et que les solutions techniques sont en accord avec les textes de normes relatives à ces machines et systèmes.

### Acteur :

De formation supérieure bois, l'acteur réglementation travaille à l'INRS à l'étude des machines à bois neuves en vue de la délivrance d'une attestation CE de type pour les machines visées par l'annexe IV de la directive "machine" [Dir\_98/37/CE] (les constructeurs ayant pour obligation, avant la mise sur le marché, pour ces machines, de les soumettre à un examen technique auprès d'un organisme notifié afin de s'assurer de l'application effective des exigences listées dans la directive "machines").

## 3. ANALYSE DES ECHANGES ENTRE ACTEURS

Pour pouvoir analyser cette expérience nous avons limité les échanges entre acteurs à des communications écrites exclusivement, nous garantissant la possibilité de pouvoir identifier toutes les communications effectuées. Chaque acteur n'étant pas localisé au même endroit (seuls les acteurs fonctionnel, structurel et fabrication se trouvaient dans le même bâtiment), les communications s'échangeaient via le courrier, le fax ou la messagerie électronique. De même que pour l'expérience de Salau, les communications se faisaient selon un canevas imposé (Figure 56), permettant ainsi de suivre les échanges de communications, les processus de question/réponse. De plus des fiches de raisonnement ont été rédigées systématiquement pour chaque nouvelle communication, permettant de connaître ce qui était effectué dans chaque module.

<b>ACTEUR EMETTEUR :</b>	Date :
n° de question/réponse :	Heure :
<b>ACTEUR DESTINATAIRE :</b>	
Réponse à la question n° de l'acteur :	Raisonnement fiche n° :

Figure 56 : Canevas des feuilles de Question / Réponse.

Partant de cette description plus ou moins détaillée des objectifs et de la démarche de chacun des acteurs, l'expérience a pu débuter. En premier, l'acteur fonctionnel a commencé les communications afin de connaître plus précisément les attentes de chacun des autres acteurs d'un point de vue fonctionnel.

Une description du système développé étant effectuée dans la dernière partie, il est toutefois possible qu'à titre d'exemple, certains éléments techniques employés dans la réalisation du système, soient repris ici, sans description détaillée, pour illustrer les propos.

Nous allons dans la suite de ce chapitre présenter un certain nombre de phénomènes qui ont pu être mis en évidence au cours de l'expérience de conception distribuée. Il faut auparavant toutefois souligner le temps passé par les acteurs permettant de situer l'intérêt de notre projet par rapport aux autres expériences menées à partir du MCD.

### *a) TEMPS CONSACRE*

Il n'a pas été possible de quantifier précisément le temps de travail de chacun des acteurs entre deux communications, ni même de pouvoir les comparer entre eux : pour chaque acteur, cette expérience venait s'ajouter à leur quotidien. De ce fait, sur les graphes de communication qui sont donnés dans la suite, le temps n'apparaît pas sous forme d'heures écoulées ; les communications sont simplement repérées par rapport au jour de leur émission.

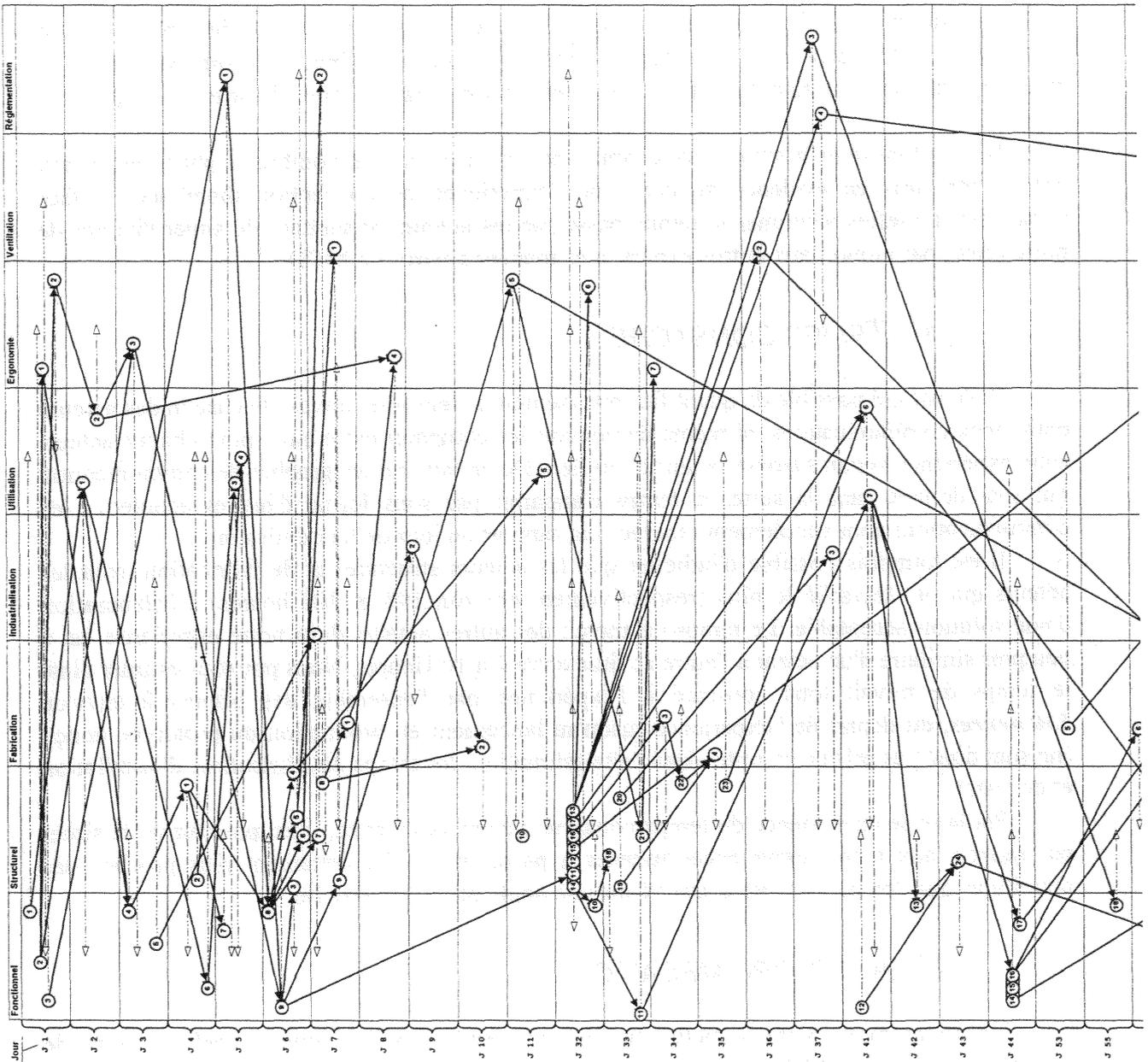
Il est toutefois possible d'indiquer que les acteurs structurel et de fabrication, sont les acteurs qui ont travaillé le plus (respectivement environ 190 et 300 heures) à l'élaboration d'une solution acceptable. Le temps de travail des autres acteurs dans notre expérience est à peu près similaire d'un acteur à l'autre et situé entre 2 à 10 Heures. Nous pouvons estimer ainsi le temps de travail total consacré à l'expérience par l'ensemble des acteurs à environ **530 heures**, du départ de l'expérience jusqu'au lancement en production du prototype conçu (ne sont donc pas pris en compte, dans cette estimation, les temps de fabrication, d'installation et de tests).

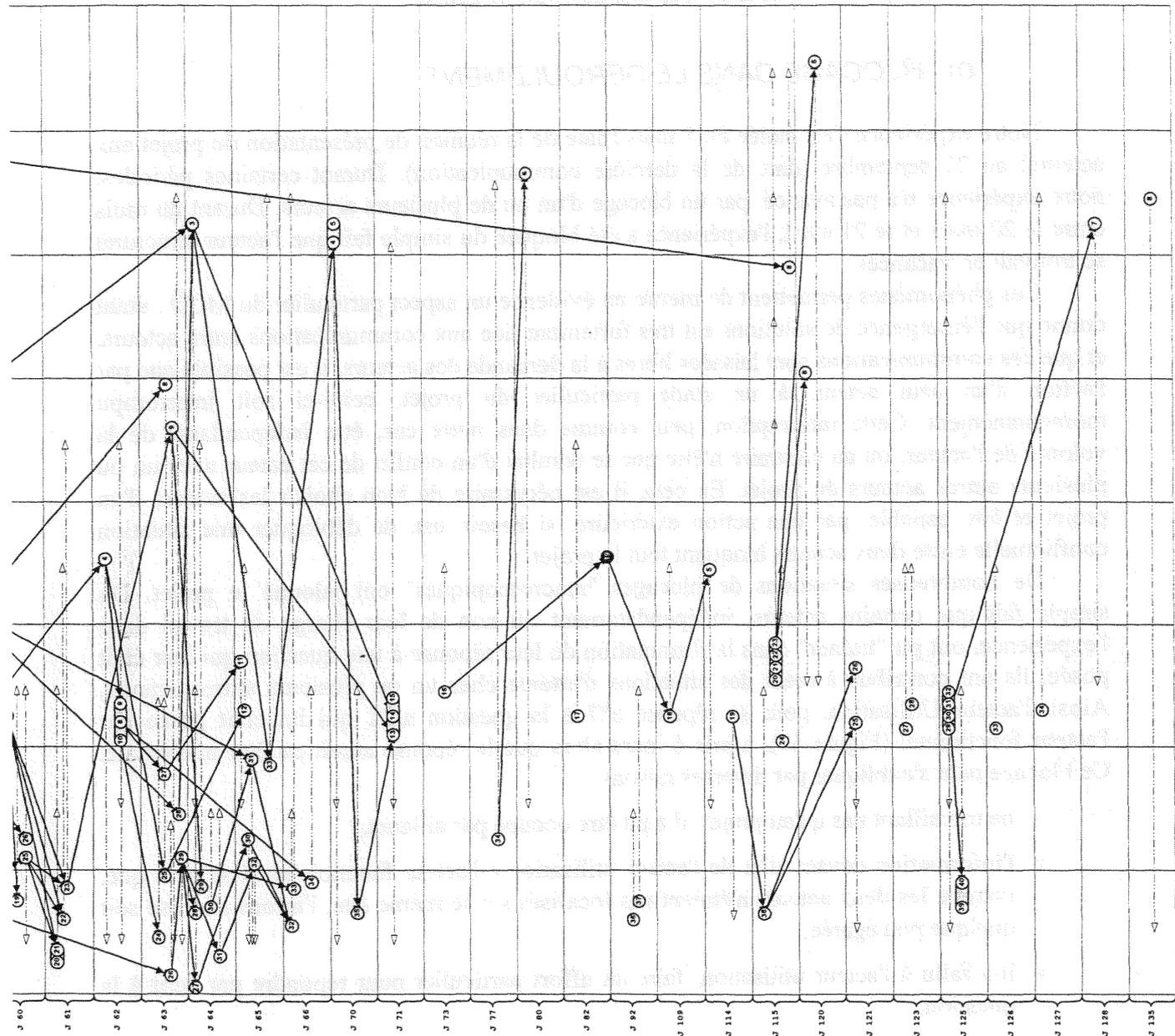
Par la mise en évidence du temps consacré à cette expérience, il est possible de la situer par rapport aux autres expériences menées à partir du MCD, nettement plus proches des conditions que l'on pourrait rencontrer dans une application industrielle.

### *b) AUTO-ORGANISATION*

Un des premiers points à mettre en évidence, est le fonctionnement avéré du réseau de conception distribuée. Malgré les moyens de communication considérablement appauvris, car limités à la seule expression écrite, le réseau a été capable de s'auto-organiser pour faire émerger une solution en gérant un certain nombre d'exigences des acteurs (Figure 57).

Il est possible d'identifier des enchaînements de communication entre plusieurs acteurs permettant d'élaborer une solution à un problème posé par un acteur. La solution émergeant des échanges effectués et des compétences des acteurs mettant en évidence l'existence de l'émergence dans un processus de conception basée sur le principe de la distribution des décisions.





**Figure 57 : Enchaînements des communications.**

Les communications ont été classées par jour ouvré (du lundi au vendredi hors jours fériés) à partir du jour 1 : le 6 Mars 1998. Les communications sont numérotées et positionnées dans la colonne de l'acteur. Lorsqu'une communication fait suite à une communication d'un autre acteur, une flèche pleine noire est indiquée entre ces deux communications. Les flèches grisées interrompues permettant d'indiquer l'acteur destinataire de la communication. La communication n°19 de l'acteur Industrialisation correspond à un échange oral entre lui et l'acteur fabrication (nécessaire avant le lancement de la fabrication du prototype).

Cette émergence avait très bien été montrée dans les deux autres expériences de conception, mais avec un modèle MCD à trois modules seulement. Par l'identification de l'émergence dans un modèle de conception distribuée faisant intervenir huit acteurs différents (et donc huit métiers différents), nous apportons un élément supplémentaire à la validité du MCD dans le sens qu'un tel réseau est capable de s'auto-organiser.

### c) BLOCAGE DANS LE DEROULEMENT

Notre expérience s'est étalée du 5 mars (date de la réunion de présentation du projet aux acteurs) au 21 septembre (date de la dernière communication). Durant certaines périodes, notre expérience n'a pas avancé, par un blocage d'un ou de plusieurs acteurs. Durant un mois entre le 20 mars et le 21 avril, l'expérience a été bloquée du simple fait que l'acteur structurel se trouvait en vacances.

Ces phénomènes permettent de mettre en évidence un aspect particulier du MCD : étant donné que l'émergence de solutions est très fortement liée aux communications entre acteurs, et que ces communications sont laissées libres à la demande des acteurs, il est possible que par l'action d'un seul acteur, à un stade particulier du projet, celui-ci soit interrompu momentanément. Cette interruption, peut comme dans notre cas, être indépendante de la volonté de l'acteur, ou au contraire n'être que le résultat d'un conflit de cet acteur avec un ou plusieurs autres acteurs du projet. En cela, il est nécessaire de bien choisir les acteurs d'un projet et être capable, par une action extérieure, si besoin est, de débloquent une situation conflictuelle entre deux acteurs bloquant tout le projet.

De nombreuses situations de blocages "macroscopiques" ont jalonné le projet. Du simple fait que certains acteurs, indépendamment ou non de leur charge de travail dans l'expérience, ont pu "traîner" dans la formulation de leur réponse à une question qui leur était posée, ils ont contribué à créer des situations d'attente chez un ou plusieurs autres acteurs. Ainsi, l'acteur Utilisation, pour sa réponse n°7 à la question n°11 qui lui était posée par l'acteur fonctionnel (Figure 57), a pris 6 jours alors que la réponse aurait pu être immédiate. Ce blocage peut s'expliquer par diverses raisons :

- ne travaillant pas qu'au projet, il a pu être occupé par ailleurs,
- l'information devant aller de l'acteur utilisation à l'acteur fonctionnel, il se peut que, comme les deux acteurs n'étaient pas localisés sur le même site, l'information se soit quelque peu égarée,
- il a fallu à l'acteur utilisation, faire un effort particulier pour répondre par écrit à la question,
- ...

Le dernier point étant à mettre à l'actif de l'utilisation du support écrit comme seul support de communications entre les acteurs, certains ont eu quelques réticences à employer ce moyen "rudimentaire" de communication, retardant d'autant leur réponses.

Le déroulement de l'expérience, est passé par des étapes clés, intervenant après une phase de communications peu nombreuses, lors de par l'envoi de la même communication à plusieurs acteurs. Ainsi, lorsque l'acteur structurel envoie la même communication à chacun des acteurs (Jour 32 sur la Figure 57), il débloquent une situation d'attente des autres acteurs depuis 21 jours. Cette communication commune étant la première voie de solution élaborée. Il

est également possible d'identifier de tels phénomènes avec certaines communications de l'acteur fabrication lorsqu'il a fait parvenir à plusieurs acteurs les plans de détails du prototype, pour avis et pour leur montrer que leurs exigences respectives avaient bien été intégrées. Ces communications caractérisent des passages obligés correspondant à des phases de l'expérience qu'il faut rapprocher de celles identifiées dans l'expérience de Blanco [Blanco\_98].

Par rapport aux quatre périodes d'activité (bien que peu distinctes) qu'il identifie, nous n'avons pu montrer un tel découpage. Nous n'avons pas identifié d'objets intermédiaires comme "marqueurs temporels". Comme nous l'avons montré, notre expérience étant passée par des phases de blocage, certaines communications ont permis d'identifier des passages obligés. Toutefois par une analyse plus précise, il n'est pas possible d'identifier un séquençement dans les activités basé sur ces communications "débloquentes". Ces communications n'identifient que le déblocage et non le marquage de la fin d'une activité.

Ce séquençement des activités ne présente de réels intérêts que pour effectuer un parallèle avec une approche d'ingénierie séquentielle. Comme nous l'avons montré, une telle approche ne permet pas d'identifier des étapes d'intégration des acteurs garants de la sécurité, il ne nous paraissait pas important d'effectuer un quelconque parallèle, mais au contraire de démontrer la réelle intégration des acteurs "sécuritaires" dans un processus de conception.

Ces situations de blocages n'avaient pu être mises en évidence par les autres expériences menées, ces expériences étant basées sur le regroupement, dans le temps et dans un même lieu, des acteurs durant toute la période d'expérimentation. Ces phénomènes de blocages mettent en évidence les limitations de l'émergence de solution par des échanges de communications entre acteurs, garants d'un point de vue métier particulier, tels qu'ils peuvent exister dans le monde industriel.

#### *d) PRISE DE DECISION COMMUNE*

Durant l'expérience, un certain nombre de communication ont permis d'identifier des échanges entre deux ou plusieurs acteurs aboutissant à une prise de décision commune. Cette décision est alors le reflet d'un consensus, résultant de plusieurs échanges entre acteurs pour, d'une part poser le problème, d'autre part présenter des voies de solutions, et enfin décider en intégrant les intérêts de plusieurs acteurs. Cette phase d'élaboration de compromis avait été mise en évidence lors de l'expérience de Blanco décrite auparavant. L'auteur parle de "conjecture" et "d'évaluation" successives entre les acteurs pour aboutir à une prise de décision et donc à l'émergence d'une solution.

Il est possible d'identifier et de suivre le cheminement de prises de décisions communes entre plusieurs acteurs. De plus, tous les acteurs, et donc plus particulièrement les acteurs "sécuritaires", sont impliqués dans cette prise de décision.

Par exemple, la décision de prévoir une partie escamotable permettant à l'opérateur de voir l'outil dans les phases de réglage du programme, demandé par l'acteur ergonomie (n°1) comme étant une exigence de sécurité, implique tous les acteurs et génère 26 communications pour permettre le choix de la solution technique mise en œuvre (Figure 58). Le processus de prise de décision sur cet aspect a débuté par une communication de l'acteur ergonomie demandant de prévoir un système de captage permettant à l'opérateur de voir l'outil dans les phases de travail (en particulier dans les phases de réglage et de mise au point de nouveau programme). Par des processus d'accaparements successifs du problème de la part des acteurs de l'expérience, cette exigence débouche sur l'implantation d'une paroi mobile commandée par l'opérateur par l'intermédiaire d'un bouton à action maintenue (les communications apparaissant sur la Figure 58 sont données en annexe).

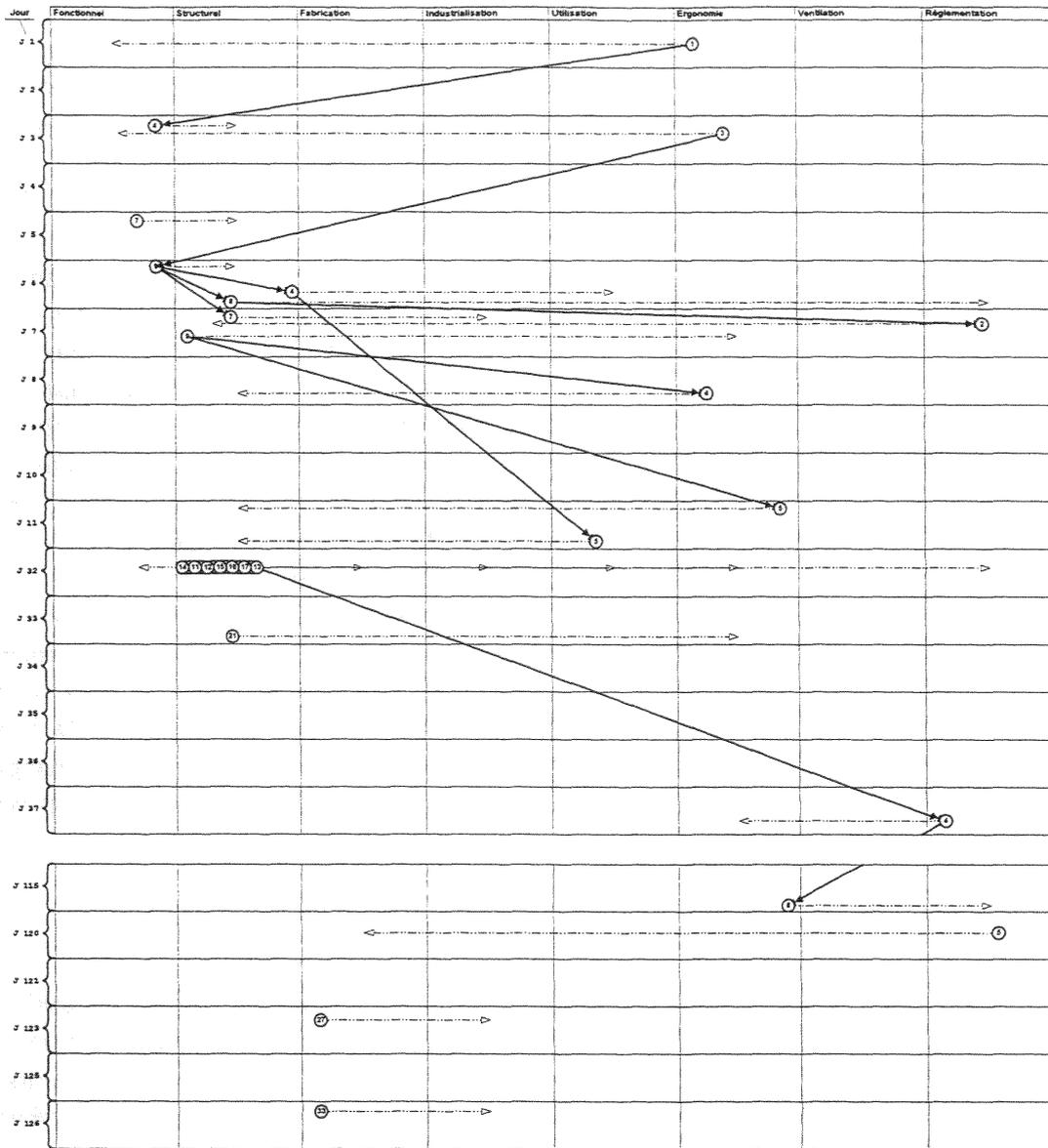


Figure 58 : Enchaînement particulier.

e) LANGAGE COMMUN

Ne disposant pas tous des mêmes outils, ni du même langage métier, les acteurs ont eu parfois quelques difficultés à comprendre les questions ou les réponses d'autres acteurs. Ainsi il est possible d'identifier des questionnements dont le seul but est de comprendre les attentes ou les réponses d'autres acteurs. Par exemple, l'acteur ventilation, par sa question n°2 (Figure 57), demande à l'acteur structural de lui préciser les plans qu'il lui a envoyés (réponse n°13), afin de comprendre où passent les particules aspirées dans le système proposé. L'acteur structural ne lui répondant par un nouveau schéma de principe que 27 jours plus tard. Cette réponse entraînant de la part de l'acteur ventilation, une demande de modification de l'inclinaison de la buse de ventilation, qui sera intégrée par l'acteur structural (la modification étant visible au travers de la communication n°15 de l'acteur structural). Par ce processus de

communication, les deux acteurs, après avoir adapté leur langage de communication, ont pu améliorer le système.

Les acteurs doivent donc mettre en œuvre des dispositions leur permettant d'adapter leurs communications afin qu'ils puissent comprendre les attentes des autres acteurs. Ceci a pu être analysé plusieurs fois durant l'expérience, mettant en avant les problèmes rencontrés dus au manque d'éléments de communication commun, mais également aux limites du support écrit. De leur point de vue, ce support les limite dans leurs explications et dans leur compréhension du discours des autres.

Alors que les acteurs "non sécuritaires" avaient tous une culture forte de la sécurité, on aurait pu supposer qu'ils possédaient un langage commun, minimisant d'autant les questionnements qu'ils auraient formulés aux acteurs "sécuritaires". Il n'en a rien été, les questionnements pour une meilleure compréhension, étaient issus tant des acteurs "sécuritaires" que des "non sécuritaires" et avaient pour cibles aussi bien l'une que l'autre des catégories.

### *f) PARALLELISATION DE FONCTIONNEMENT*

L'analyse de l'enchaînement des communications permet de mettre en évidence le travail en parallèle d'un module à l'autre. A de nombreuses reprises les acteurs ont travaillé en parallèle, sans forcément affecter le travail des acteurs non impliqués dans cette parallélisation. Ainsi, alors que l'acteur structurel travaillait à la génération d'un premier dessin général du système, les acteurs fonctionnel et ergonomie définissaient encore les fonctions nécessaires, d'un point de vue ergonomique, à remplir par le système ; fonctions qui seront intégrées plus tard dans le système par l'acteur structurel.

De plus, si l'on regarde les tâches effectuées par chacun des acteurs, il est possible de s'apercevoir qu'ils effectuent plusieurs tâches de nature différente. Par exemple, l'acteur fonctionnel, après avoir questionné différents acteurs (question n°1, 2 et 3), communique une première partie des résultats obtenus à l'acteur structurel (n°4), le laissant avancer de son côté, tout en récupérant d'autres informations pour les remettre en ordre avant de les lui communiquer définitivement (n°9).

De même, l'acteur structurel traite plusieurs tâches en même temps lorsqu'il doit intégrer un système permettant de disposer d'une paroi amovible tout en travaillant à la résolution du guidage en rotation du déflecteur (Question n°5 et 6).

### *g) INTEGRATION DES ACTEURS*

Durant cette expérience, 144 communications ont été échangées. Si l'on analyse plus profondément la répartition de ces communications entre acteurs (Tableau 7), il est possible de s'apercevoir que trois de ceux-ci ont eu plus de communications que les autres, donc plus d'implication dans l'expérience, sans qu'il soit possible de corrélérer ces communications au temps consacré à l'expérience. Ces trois acteurs correspondent aux modules de "base" déjà identifiés dans les autres expériences MCD.

	Fonctionnel	Structurel	Fabrication	Industrialisation	Utilisation	Ventilation	Ergonomie	Réglementation
Nbre de com.	40	34	34	5	9	8	9	5

**Tableau 7 : Répartition des communications par acteur.**

Mais au delà de ces chiffres, il faut noter que tous les acteurs ont eu un rôle à jouer dans l'expérience. Ainsi, il est possible de juger de l'implication de chacun des acteurs simplement en visualisant le système réalisé et testé. A titre d'exemple, il est possible de mettre en évidence l'intégration de l'acteur ventilation, au travers de la solution retenue. En effet, cette voie de solution a été mise en avant par cet acteur lors de sa communication n°1 (Figure 57), puis l'acteur structurel l'a "habillée" et l'acteur fabrication l'a améliorée pour l'optimiser en fonction des limitations imposées par l'acteur utilisation relevant des limites dimensionnelles de la machine.

Dans notre expérience, les acteurs garants des aspects de sécurité, ont été intégrés, et ceci durant toute l'expérience, malgré une distribution importante des connaissances du domaine de la sécurité dans les connaissances de l'ensemble des acteurs.

**Ergonome :**

Par la limitation de l'expérience à la génération des plans de définitions des pièces (et non pas après la phase de tests), l'acteur ergonomie est surtout intervenu dans les premières phases du développement, en apportant des exigences importantes à la vue de l'analyse effectuée ultérieurement sur le terrain. Ainsi, il a contribué directement à l'intégration d'une paroi escamotable permettant :

- l'identification de l'outil
- l'évaluation de la position de l'outil relativement à la pièce,
- l'identification du sens de rotation de l'outil,
- l'évaluation de la trajectoire de l'outil,
- l'instant où l'outil rentre en contact avec la pièce.

En complément du travail qu'il a effectué, par son expertise, il aurait encore à travailler sur le système en place pour l'améliorer.

L'ergonome dans notre expérience, est intervenu tôt dans le processus d'échanges de communications mais également vers la fin du projet. La Figure 59 illustre les communications, en %, par couple faisant intervenir l'acteur ergonomie au fil des jours du projet. Il est possible de comprendre que, certes, comme nous l'avons indiqué ci-dessus, l'acteur ergonomie est surtout intervenu dans les premières phases de l'expérience, il a également communiqué vers la fin du projet en particulier avec l'acteur fabrication (trois communications). En cela, il est difficile de prédire une phase précise dans laquelle il aurait à intervenir en priorité.

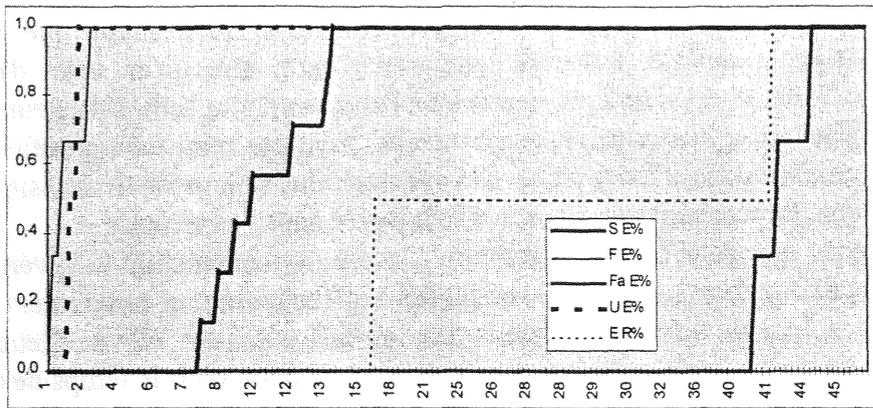


Figure 59 : Communications par couples impliquant l'acteur Ergonomie<sup>37</sup>.

**Réglementation :**

Si l'acteur réglementation n'a pas beaucoup communiqué durant cette expérience, la Figure 60 montre que ses communications sont dispersées tout au long du projet.

Une exigence de l'acteur réglementation, permettant d'illustrer son intégration dans l'expérience, est l'obligation de positionner le bouton de commande de la paroi escamotable, à une distance suffisante pour que l'opérateur ne puisse être en contact avec l'outil lorsqu'il actionne le relevage de la paroi. Ceci illustre le processus accidentel présenté ultérieurement : l'acteur réglementation a identifié une entité dangereuse (l'outil en rotation) et une zone dangereuse correspondante (zone autour de l'outil). Il a alors demandé à mettre en œuvre une protection de type mécanique se caractérisant techniquement par l'utilisation de parois définissant ainsi une zone protégée. Etant donné que par ailleurs, une de ces parois devait être escamotable, il a alors prévu une disposition particulière pour éviter de placer l'opérateur dans une situation dangereuse liée à la conjonction de la présence de l'opérateur (sa main dans notre cas) et de l'outil dans son état dangereux (en rotation) dans la zone définie comme dangereuse : il a alors imposé une action maintenue de commande de cette paroi afin d'être sûr que la paroi s'abaisse dès que l'opérateur relâche son action sur le bouton de commande.

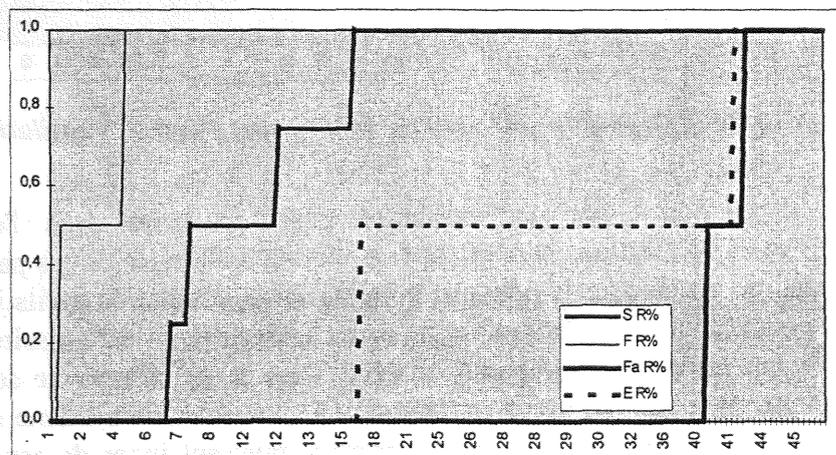


Figure 60 : Communications par couples impliquant l'acteur Réglementation.

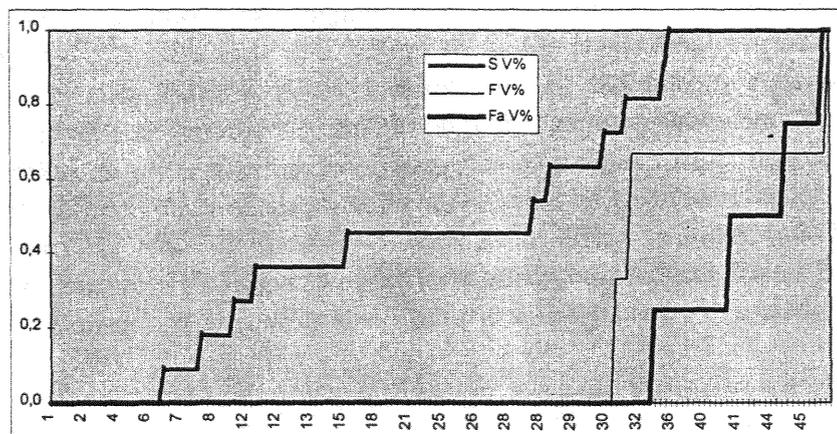
<sup>37</sup> Dans les graphes de communications par couples, E <=> Ergonome, R <=> Réglementation, V <=> Ventilation, U <=> Utilisateur, I <=> Industrialisation, Fa <=> Fabrication, S <=> Structurel, F <=> Fonctionnel.

Une des questions que l'acteur structurel lui a posée est de savoir quel matériau utilisé pour réaliser les parois de protection entourant l'outil, afin qu'un éclat d'outil ne puisse perforer ces parois et ne vienne au contact de l'opérateur. Il a fallu à l'acteur réglementation s'impliquer dans sa réponse que les autres acteurs n'ont pas remise en question, lui accordant ainsi une confiance dans son expertise. Cet exemple illustre la prise de décision basée sur une unique opinion, directement liée à l'expertise intégrée dans l'expérience.

De même que pour l'acteur ergonomie, l'acteur réglementation doit vérifier une fois le système installé, le bon respect des exigences réglementaires et notamment la position de l'opérateur vis-à-vis du système lorsque la paroi en face avant est relevée. Cette analyse n'a pu être menée dans le cadre de notre expérience par la limitation dans le temps de celle-ci.

### Ventilation :

L'acteur ventilation ayant participé aux tests effectués, son rôle ne se limitait pas à l'expérience de conception mais était plus global. De fait, il avait pu acquérir une connaissance importante de la machine lors des essais avec l'ancien système effectués avant l'expérience de conception. Ceci a pu être visualisé dans une question durant laquelle il effectue une remarque à l'acteur structurel sur un détail de la machine qu'il n'aurait pu connaître sans avoir effectué ces essais, empiétant sur le domaine de compétence de l'acteur utilisation. L'acteur ventilation n'a pas communiqué dès le départ de l'expérience, mais ses communications ont rapidement été avec l'acteur structurel (Figure 61).



**Figure 61 : Communications par couples impliquant l'acteur Ventilation.**

L'acteur ventilation a eu une influence très importante dans l'expérience, par l'élaboration de voies de solutions permettant l'amélioration du captage des particules, qui ont permis au groupe de développer le nouveau système selon la solution qu'ils jugeaient être la meilleure. Il a communiqué un certain nombre de caractéristiques de l'émission des particules (ces caractéristiques seront présentées plus en détail dans la dernière partie de ce mémoire) à prendre en compte ainsi que des voies d'améliorations possibles du système de captage, afin que les autres acteurs, selon leur contraintes propres, puissent juger de ses propositions et décider en commun d'une voie de solution à adopter.

### Autres acteurs :

Pour ce qui est des trois acteurs de "base", contrairement à l'expérience de Salau, il n'est pas possible de distinguer un couple d'acteurs qui ait communiqué plus que les deux autres

(Figure 62). Il faut simplement signaler une particularité dans le fait que le couple fonctionnel/fabrication ait communiqué plus tardivement que le couple structurel/fabrication. Ceci pouvant démontrer que, dans un processus d'ingénierie simultanée, même si un certain séquençement des tâches entre les acteurs peut être reconnu, l'activité des acteurs est simultanée et distribuée, et ne peut que difficilement être rapprochée du séquençement des activités d'un processus d'ingénierie séquentielle.

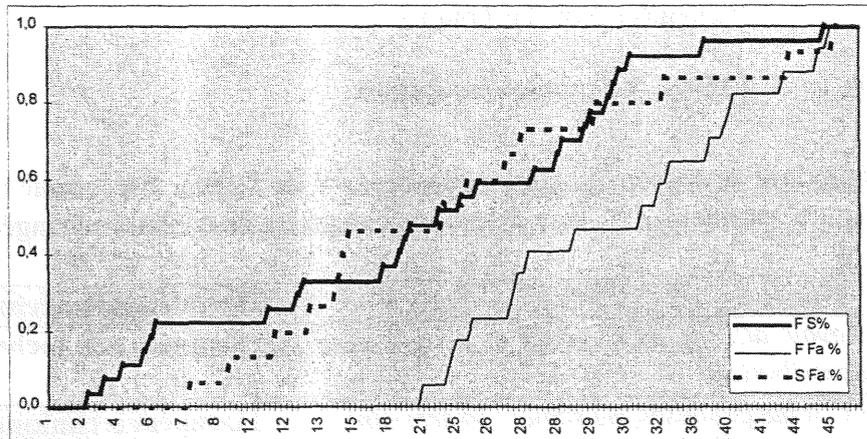


Figure 62 : Communications par couples entre les acteurs Fonctionnel, Structurel et Fabrication.

L'acteur *utilisation* a apporté à l'expérience sa connaissance importante de la machine, ses compétences dans le travail effectué avec la machine d'étude, ainsi que de nombreuses caractéristiques dimensionnelles liées à la machine. Ces caractéristiques dimensionnelles ont été nécessaires à l'étude du nouveau système de captage afin de prendre en compte l'environnement direct de travail ainsi que les contraintes imposées par les changements d'outils, les pièces usinées, les possibilités techniques de la machine (plus particulièrement celles liées au système de commande numérique pilotant la machine).

Cet acteur est intervenu dans l'expérience dès le début jusqu'au deux tiers du déroulement; la dernière partie, une fois déterminés les conditions d'utilisation et l'environnement dimensionnel de travail, n'impliquait plus directement son intervention.

L'acteur *industrialisation*, envisagé dès le départ comme potentiel fabricant du système conçu, a apporté toute sa connaissance de la fabrication de tels systèmes et notamment de solutions techniquement réalisables par ses moyens de fabrication propres.

Les communications émises par cet acteur sont étalées durant toute l'expérience, du début à la fin. Contrairement à l'ensemble des acteurs pour qui l'expérience s'arrêtait à la réalisation des plans de définition des différents pièces constituant le nouveau système, l'acteur industrialisation a réalisé le prototype de captage afin de pouvoir mener des essais de ventilation pour quantifier l'amélioration apportée.

## h) DONNEES MANIPULEES

Toutes les communications ont été décomposées en trois types de données, différenciées selon leur nature technique ou non, et pour les données techniques, selon qu'elles soient ou non du domaine de compétences de l'auteur de la communication, reprenant ainsi la

décomposition proposée par Salau afin de classer, très schématiquement, les données échangées durant l'expérience.

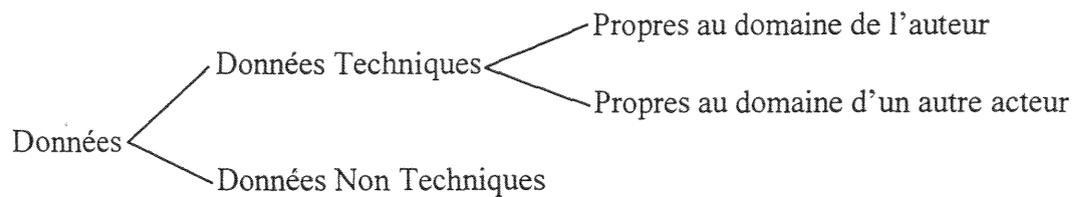


Figure 63 : Différentes données manipulées.

Est reproduite ci-dessous la communication n°5 de l'acteur Ergonomie à destination de l'acteur structurel, permettant d'illustrer les trois catégories de données échangées :

<i>"Bonjour,</i>	<b>Données non techniques</b>
<i>C'est bien d'avoir attendu mon retour de congés pour me remettre à contribution.</i>	<b>Données non techniques</b>
<i>Le projet que tu me proposes me semble intéressant.</i>	<b>Données techniques propres</b> Jugement de l'expert ergonome
<i>Cependant, je saisis mal le fonctionnement du capteur rotatif et la gêne éventuelle qu'il peut occasionner pour voir l'outil, sa trajectoire, son sens de rotation.</i>	<b>Données techniques propres</b> Jugement et attentes de l'expert ergonome
<i>En complément, pourrais-tu me faire parvenir un schéma plus précis de cette partie du système ?</i>	<b>Données techniques propres</b> Attente d'un complément d'informations
<i>Je me permets de te proposer un schéma de principe d'un protecteur/capteur qui pourrait être constitué d'une buse d'aspiration et de trois volets mobiles au moyen d'un vérin pneumatique.</i>	<b>Données techniques n'appartenant pas à l'expert ergonome</b>
<i>Bonne continuation."</i>	<b>Données non techniques</b>

Tableau 8 : Décomposition d'une communication de l'acteur ergonome.

L'analyse du contenu des échanges durant l'expérience, montre qu'environ 55 % du contenu des communications effectuées par un module sont propres au domaine de compétences de ce module (Figure 64). Les 45 % restants, se répartissent en 17 % de données techniques du domaine d'un autre module, signifiant que l'acteur émetteur de la communication pénètre dans un domaine qui n'est pas le sien normalement, et en 28 % de données non techniques, servant notamment à la coordination, la coopération et aux liens amicaux durant l'expérience, pouvant être interprétées selon Garro [Brissaud\_98] comme des indices de l'auto-organisation du réseau.

Ce découpage ne donne bien entendu pas les mêmes résultats selon les acteurs de l'expérience (Figure 64). En effet, certains acteurs tel l'acteur industrialisation, communique beaucoup plus de données techniques propres (75 %) qu'un acteur tel que le fonctionnel (44 %). Il en est de même pour les autres types de données. Cette décomposition permet de caractériser les acteurs au travers de leur personnalité ressortant dans le contenu des

messages : trait d'humour, rigueur, facilité de rédaction, difficultés à se faire comprendre par écrit, voire éventuellement des échanges plus ou moins conflictuels, ...

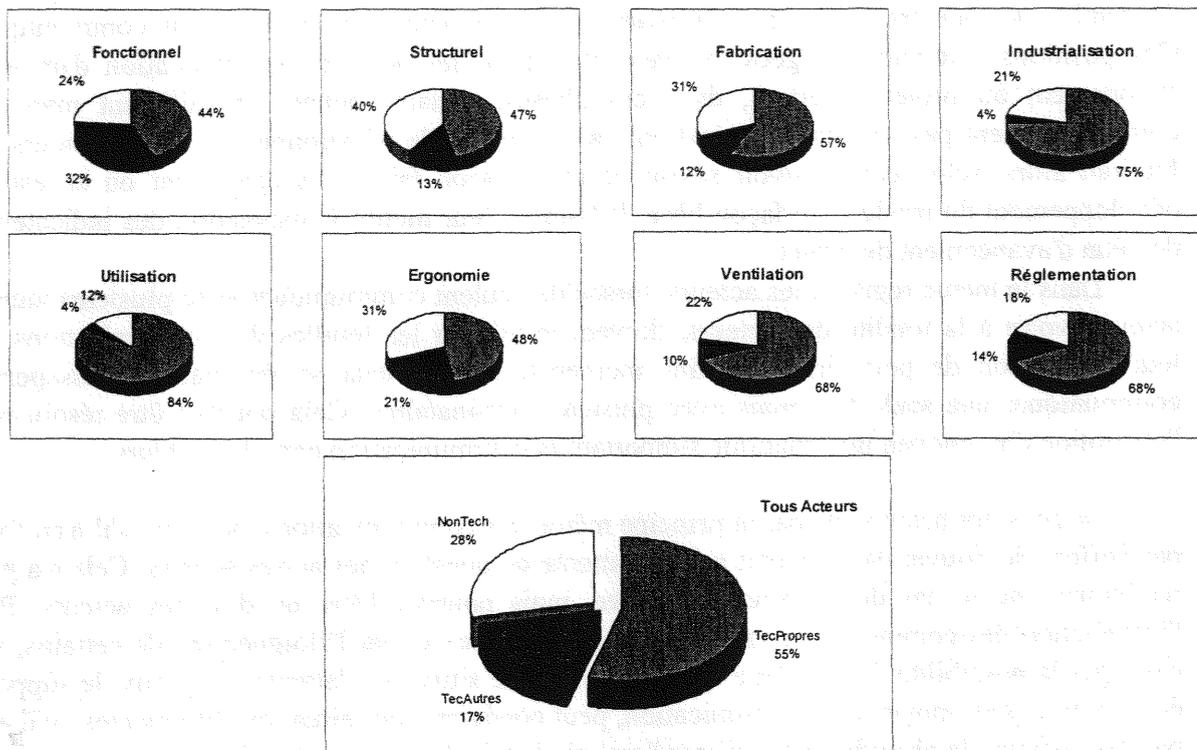


Figure 64 : Décomposition des communications<sup>38</sup>.

### i) POINT DE VUE DES ACTEURS

A la fin de l'expérience, chaque acteur a été interviewé individuellement pour connaître ses sentiments et impressions quant au déroulement de l'expérience. Tous ont reconnu que cette expérience s'était bien déroulée, tout en y apportant quelques bémols. Le Tableau 9 ci-dessous, synthétise quelques points intéressants ou non que les acteurs ont pu mettre en évidence lors des interviews.

<i>Manques :</i>	<i>Intérêts :</i>
lisibilité de l'avancement, limitation du support écrit, situations bloquantes. lisibilité du travail des acteurs, connaissances limitées du rôle des acteurs,	émergence d'une solution, traçabilité des échanges, intégration de tous les acteurs.

Tableau 9 : Manques et intérêts du MCD vus par les acteurs.

<sup>38</sup> TecPropres <=> Données techniques propres au domaine de l'auteur de la communication,  
 TecAutres <=> Données techniques propres au domaine d'un autre acteur,  
 NonTech <=> Données non techniques.

Ainsi, la plupart ont ressenti un manque de lisibilité quant au déroulement de l'expérience. A certains moments, ils ne savaient pas où en était le projet, si les autres acteurs communiquaient pendant qu'eux ne recevaient pas de communication. Ceci a été remarqué par l'ensemble des acteurs et plus particulièrement par les acteurs ayant le moins communiqué. Ces positions d'attentes obligées, peuvent être, pour les acteurs, une indication d'un non avancement du projet. Pourtant, dans ces phases, certains acteurs travaillaient mais ne communiquaient pas, car ils n'exprimaient pas le besoin de questionner les autres acteurs. Il faudrait alors, selon eux, pouvoir savoir ce que chacun fait, mais également où en est le développement du produit, de façon libre. Il faudrait leur mettre à disposition des indicateurs de l'état d'avancement du projet.

Dans le même registre, les acteurs, lorsqu'ils veulent communiquer avec plusieurs autres acteurs, voire à la totalité des acteurs, doivent multiplier les feuilles de communications. Il leur paraît bon de pouvoir, à certains moments, comme cela se fait par la messagerie, communiquer une seule fois mais avec plusieurs destinataires. Cela pourrait être résolu par l'utilisation d'un moyen informatique supportant la communication entre les acteurs.

De plus, les acteurs, de par le principe même des communications, peuvent, s'il n'en font pas l'effort, se trouver dans un état passif d'attente de question des autres acteurs. Cela n'a pas réellement été le cas dans notre expérience, mais pourrait l'être au dire des acteurs. Par l'interdiction des communications orales entre les acteurs et par l'éloignement de certains, ils n'ont pas la possibilité d'eux mêmes de débloquent une situation d'attente. Pour eux, le support écrit comme seul moyen de communication, peut conduire à des situations bloquantes qu'il est parfois difficile de résoudre sans utiliser l'oral via le téléphone par exemple.

Un des aspects que certains ont rencontré, est la difficulté à se limiter dans leur propre rôle, désirant effectuer une partie du travail des autres pour faire avancer plus rapidement et du même coup limiter les explications. D'autres ont eu des difficultés à apprécier les compétences des autres et donc à leur déléguer des problèmes. Tout ceci devant être résolu par le choix des acteurs "experts" de leur métier à intégrer dans le processus de conception et par la connaissance réciproque du rôle des acteurs dans le projet.

L'écrit comme seul support de communication a posé des problèmes à tous les acteurs. Ils y voient une limitation importante dans les échanges, un frein à la communication, voire un support par lequel ils ne peuvent pas tout exprimer. Par contre, ils y trouvent tous un même intérêt qui est de pouvoir avoir une trace d'information à laquelle ils peuvent se référer en cas de besoin. De plus, l'obligation d'écrire pour pouvoir communiquer les a obligés à synthétiser les informations qu'ils souhaitaient échanger.

L'utilisation du dessin technique a occasionné quelques difficultés de compréhension conduisant à des demandes d'explications plus précises. Ceci rejoignant la problématique du langage commun d'usage pour que chacun puisse communiquer et se faire comprendre des autres.

Les acteurs ergonomie et réglementation ont trouvé que de terminer l'expérience aux dessins du nouveau système, sans qu'il leur soit possible d'intervenir sur le système après un premier essai, a été une limite dans leur intégration. En effet, ces deux acteurs peuvent intervenir également directement sur les systèmes existants, possédant nombre de démarches

propres à leurs métiers, pour travailler dans ces conditions. Il faut y voir un indicateur du rôle des acteurs de la conception qui ne se limite pas qu'aux étapes de cette seule phase de conception, mais qui, au contraire, nécessite l'implication des tous les acteurs interagissant sur me produit durant toutes les phases de la vie de ce produit.

Tous sont unanime face du système de captage qui est pour eux véritablement le fruit d'un travail mené de concert, dans une entente toujours importante du début à la fin. Tous se sont sentis impliqués dans l'expérience, mêmes si le rôle de certains était forcément limité par rapport à d'autre.

Très confiants dans l'amélioration apportée par le nouveau système, ils attendaient tous les résultats des tests de ventilation comme étant la démonstration de l'apport d'une telle démarche de conception dans l'intégration des aspects sécurité à la conception.

#### **4. BILAN DE L'EXPERIENCE**

Cette expérience de conception distribuée par rapport aux objectifs que l'on avait fixés, s'est bien déroulée. Elle a permis d'identifier un certain nombre de phénomènes intéressants pour comprendre l'intérêt d'une approche distribuée de la conception.

Nous avons démontré expérimentalement que le modèle de conception distribuée permet l'intégration d'autres acteurs que les trois initialement identifiés. Par là même nous avons démontré l'intégration des acteurs garants de la sécurité dans un processus de conception, permettant d'intégrer les aspects sécuritaires au plus tôt dans le cycle de vie d'un produit.

Nous avons apporté notre brique à l'extension du MCD à une utilisation plus "industrielle" dans le sens où nous l'avons étendu à huit acteurs, nous avons travaillé avec des acteurs non disponibles à temps plein sur le projet, avec des métiers divers et notamment ceux de la sécurité. En ce sens notre expérience, certes limitée (par le seul support de communication écrit, la durée dans le temps, le nombre d'acteurs encore restreint, les analyses effectuées, ...), a franchi un cap vers son exploitation en milieu industriel.

Cette expérience nous a également permis de mettre en évidence le principe d'émergence d'un produit mais aussi de l'organisation des acteurs dans un processus de conception basé sur le principe de la distribution des décisions ; MCD apportant un plus par rapport aux processus de conception plus traditionnels dans la distribution et dans l'auto-organisation.

Nous n'avons pas effectué de comparaison avec une autre approche de conception, mais nous pouvons toutefois voir l'apport d'une telle démarche dans la prise en compte des intérêts de tous les acteurs, dans le déroulement optimal des communications entre acteurs ainsi que dans la solution développée.

D'aucun d'ailleurs dirait que l'indicateur le plus précis de l'apport du MCD est le résultat en terme de produit ayant émergé. En effet, il est possible de voir le produit, par le principe de captage employé, par les aménagements développés, les contraintes de sécurité intégrées, comme le reflet à lui seul de l'intégration des différents acteurs dans la conception, en particulier des acteurs "sécuritaires", reflétant également l'émergence d'une solution prise en commun.

Ce système développé sera présenté d'un point de vue technique dans le chapitre suivant.



# D. VALIDATION

<b>I. PROBLÉMATIQUE DU CAPTAGE</b>	<b>112</b>
1. INFLUENCE DU TYPE D'USINAGE	112
a) Vitesse de coupe	112
b) Hétérogénéité des particules	112
2. SOURCE D'ÉMISSION DES PARTICULES	113
a) Définition	113
b) Mobilité	114
3. DIRECTION DE PROJECTION DES PARTICULES	115
a) Définition	115
b) Variations possibles	115
4. AMPLITUDES DE PROJECTION	116
a) Amplitude radiale	117
b) Amplitude axiale	117
5. INFLUENCE DES PARAMÈTRES D'ÉMISSION SUR LE DISPOSITIF DE CAPTAGE	118
a) Surface frontale de projection	118
b) Amplitudes résultantes	119
<b>II. AMÉLIORATIONS DU SYSTÈME DE CAPTAGE</b>	<b>120</b>
1. MACHINE ÉTUDIÉE	120
2. LIMITES DU SYSTÈME ACTUEL	121
3. VOIES DE SOLUTIONS	123
4. SYSTÈME DÉVELOPPÉ	123
<b>III. TESTS ET MESURES EFFECTUÉS</b>	<b>127</b>
1. RÉSULTATS AVEC LA CONFIGURATION D'ORIGINE	130
2. RÉSULTATS AVEC LA NOUVELLE CONFIGURATION	131
3. COMPARAISON DES RÉSULTATS :	134
4. AMÉLIORATIONS POSSIBLES	135

# I. PROBLEMATIQUE DU CAPTAGE

Nous allons aborder l'aspect aspiration par une première partie présentant le problème d'un point de vue théorique afin de bien cerner les phénomènes et les caractéristiques propres à l'aspect captage des particules de bois sur une machine.

## 1. INFLUENCE DU TYPE D'USINAGE

### a) VITESSE DE COUPE

Une particularité des opérations d'usinage dans l'industrie de deuxième transformation du bois est la vitesse de coupe élevée variant de 40 à plus de 120 m/s selon les outils utilisés et le type d'usinage effectué. Une vitesse de coupe aussi importante a pour conséquence une projection des particules<sup>39</sup> à une vitesse initiale correspondant à la vitesse de coupe de l'outil.

De par cette grande vitesse de projection, les particules possèdent une énergie cinétique élevée lors de leur formation et de leur projection par l'outil. Selon la grosseur et la masse volumique des particules, le frottement de l'air les freine plus ou moins rapidement.

Il faut tout de même préciser que généralement les particules projetées lors de l'usinage sont de nature hétérogène notamment en taille.

### b) HETEROGENEITE DES PARTICULES

La taille, la forme et la densité des particules projetées dépendent :

- du matériau usiné : essence (feuillus, résineux), dérivés du bois (panneaux de particules, de fibres, contre-plaqués, composites, ...).

La densité des matériaux peut varier d'un facteur 4 environ (0.3 à 1.2) influençant d'autant l'énergie cinétique des particules [Hazard\_96].

Au contraire des bois massifs qui, en général, produisent des particules de tailles très variables mêlées les unes aux autres lors de leur projection, certains matériaux dits "homogènes" (ex : panneaux de particules, MDF<sup>40</sup>) génèrent des particules de tailles semblables et souvent de taille assez petite.

La diversité des essences de bois nous conduit également à noter que la fragmentation des particules au moment où elles sont produites est différente selon la nature des bois : certains bois exotiques ne produisent que de fines particules alors que les bois résineux produisent, dans les mêmes conditions de coupe, des particules plus grosses et plus hétérogènes en taille.

<sup>39</sup> Sous le terme de "*particules*" nous entendrons l'ensemble "*copeaux*", "*sciures*" et "*poussières*".

<sup>40</sup> MDF : Médium Density Fiber.

- *de la forme de l'outil utilisé* : outil à défoncer, à profiler, à poncer, ...  
 Les particules produites avec un outil de défonçage sont de tailles moindres et moins hétérogènes que les particules produites avec les outils de profilage. Généralement, les outils de défonçage sont plus petits en diamètre que les outils de profilage, ils tournent plus vite et ils enlèvent moins de matière : les particules produites ne peuvent donc être que plus petites et moins hétérogènes.  
 Les opérations de ponçage produisent des particules de taille nettement plus faible et beaucoup plus homogène que celle des particules produites par d'autres types d'usinage.
- *des conditions de coupe* : vitesse de coupe, vitesse d'avance, profondeur de passe, ...  
 Les conditions de coupe sont optimisées à partir de lois connues afin d'assurer une qualité d'usinage selon des critères d'aspect de la surface générée, d'usure de l'outil, de l'énergie consommée, ...

Il est ainsi possible d'évaluer le débit journalier (produit de la vitesse d'amenage par la profondeur de passe et la largeur d'usinage par le nombre d'heures de travail) de particules produites par une machine à plusieurs mètres cubes.

Comme nous venons de le voir, de nombreux facteurs influencent la forme, la taille et la masse des particules produites lors d'un usinage de matériaux bois ou dérivés et donc la variation des conditions de projection. Mais lorsque l'on se préoccupe des aspects captage des particules sur une défonceuse à bois, il est nécessaire de tenir compte des conditions géométriques propres à chaque type d'usinage possible, indépendamment de l'hétérogénéité des particules produites. Pour cela trois nouveaux paramètres sont à définir.

## 2. SOURCE D'EMISSION DES PARTICULES

### a) DEFINITION

La *source* correspond aux points où l'outil cesse d'être en contact avec le matériau en sortie d'usinage.

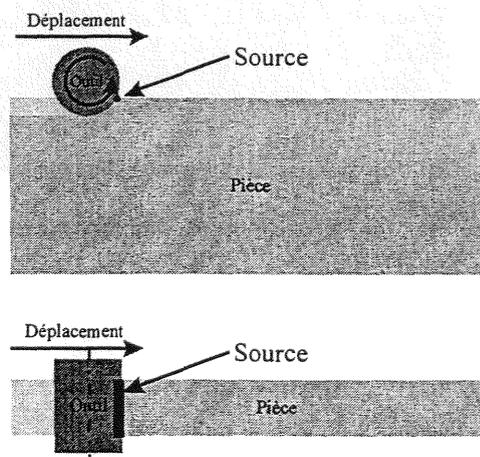


Figure 65 : Localisation de la source.

Cette source peut être rectiligne ou non suivant la forme de l'outil. Elle sera rectiligne avec des outils de défonçage et la plupart du temps non rectiligne avec les outils de profilage.

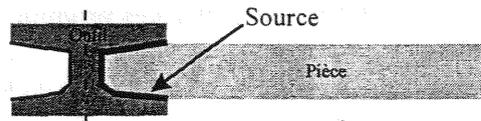


Figure 66 : Source d'émission de particules de forme non rectiligne.

Nous appellerons donc *source d'émission de particules* l'ensemble des points communs au matériau à usiner et à l'outil, correspondant à l'endroit où les particules sont projetées par l'outil.

### b) MOBILITE

La source d'émission de particules peut être :

- **Fixe** tout au long d'une même opération d'usinage :  
ex : scie à ruban,  
scie circulaire à table, à format (Figure 67),  
dégauchissage, rabotage, ...

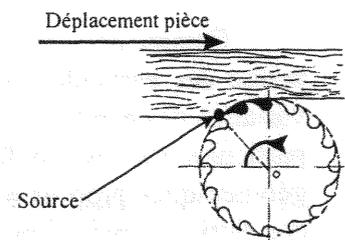


Figure 67 : Scie circulaire à format : source fixe.

- **Mobile** au cours d'une même opération d'usinage, soit par un simple déplacement selon une seule direction de l'outil relativement à la pièce (Figure 68), soit par un changement de direction de l'outil dans son déplacement relativement à la pièce (Figure 69).

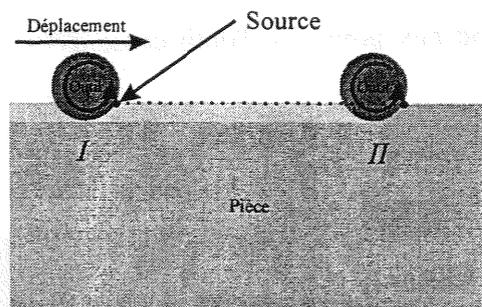


Figure 68 : Mobilité de la source par déplacement de l'outil selon une même direction.

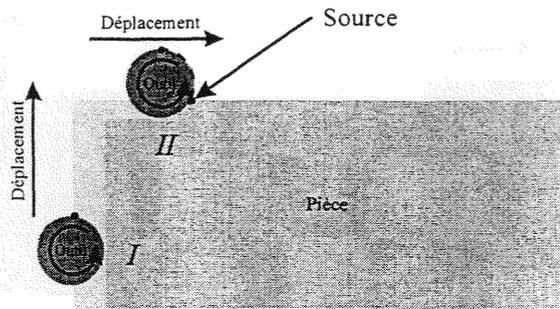


Figure 69 : Mobilité de la source par changement de direction de l'outil.

### 3. DIRECTION DE PROJECTION DES PARTICULES

#### a) DEFINITION

Lorsque les particules cessent d'être emprisonnées entre l'outil et le matériau, elles se trouvent projetées en dehors des creux des dents dans une direction déterminée.

Cette direction est appelée *direction de projection* et suit les tangentes à l'outil aux points de sortie du matériau usiné formant la source d'émission.

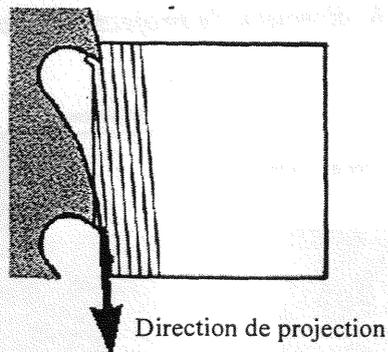
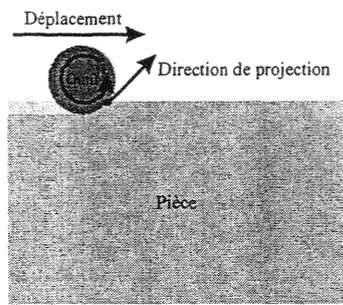


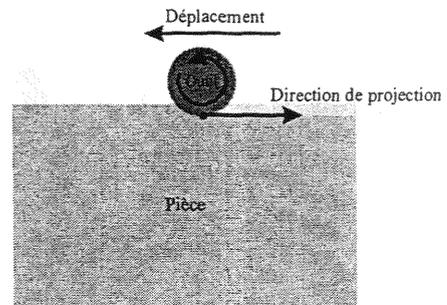
Figure 70 : Direction de projection des particules.

#### b) VARIATIONS POSSIBLES

La direction varie selon le type d'usinage : en opposition ou en avalant.

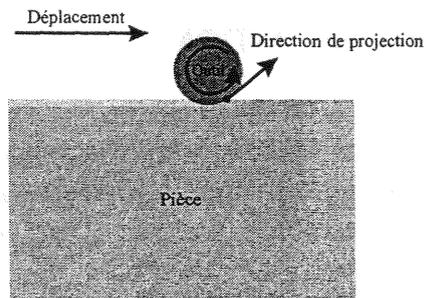
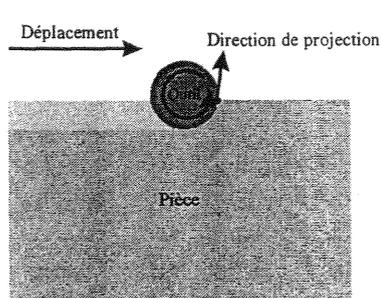


*Figure 71 : Direction de projection lors d'un travail en opposition.*

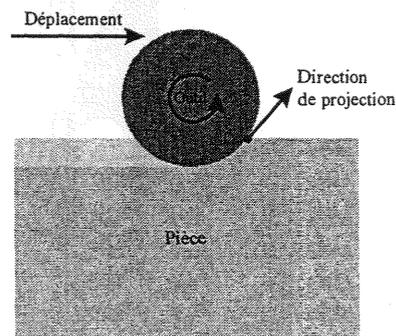
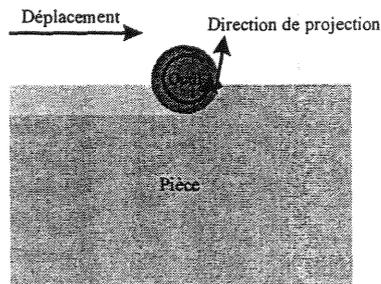


*Figure 72 : Direction de projection lors d'un travail en avalant.*

L'angle formé par la direction de projection et la tangente au matériau peut varier selon le type d'usinage effectué mais aussi en fonction de la profondeur de passe (Figure 73) et du diamètre de l'outil (Figure 74).



*Figure 73 : Variation de la direction de projection selon la profondeur de passe.*



*Figure 74 : Variation de la direction de projection en fonction du diamètre de l'outil.*

#### 4. AMPLITUDES DE PROJECTION

Influencées par leur poids, leur forme, leur énergie cinétique, les particules projetées se dispersent autour de la direction de projection. La dispersion des particules s'effectue selon un *angle de dispersion* plus ou moins grand selon le type d'outil, la nature du matériau (l'hétérogénéité du matériau favorisant une augmentation de l'angle de dispersion des

particules), le type de travail (en opposition ou en avalant), ... Aucune donnée bibliographique ne nous a permis de quantifier cette dispersion.

Selon le plan dans lequel nous visualisons l'émission des particules, nous pouvons définir deux types d'amplitudes instantanées.

### a) AMPLITUDE RADIALE

Dans un plan radial (perpendiculaire à l'axe de rotation), la dispersion s'effectue suivant un *angle de dispersion*  $\alpha$  plus ou moins grand selon le type d'outil et l'hétérogénéité des particules.

L'étendue  $a$ , formée par la dispersion des particules dans le plan radial, définit l'*amplitude radiale instantanée*.

L'amplitude dépend de l'angle de dispersion ainsi que de la distance à laquelle elle est mesurée de la source.

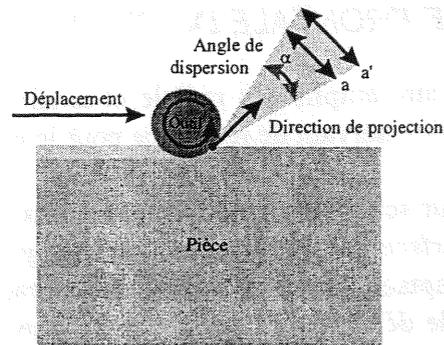


Figure 75 : Angle de dispersion et amplitudes radiales instantanées  $a$  et  $a'$ .

### b) AMPLITUDE AXIALE

Dans un plan axial (parallèle à l'axe de rotation), la dispersion s'effectue suivant un *angle de dispersion*  $\beta$  plus ou moins grand selon la largeur de passe, le type d'outil et l'hétérogénéité des particules.

L'étendue  $b$ , formée par la dispersion des particules dans le plan axial, définit l'*amplitude axiale instantanée*.

De même que pour l'amplitude radiale, l'amplitude axiale dépend de l'angle de dispersion ainsi que de la distance à laquelle elle est mesurée de la source mais aussi de la largeur de passe (correspondant soit à la largeur de l'outil, soit à celle de la pièce comme sur la Figure 76).

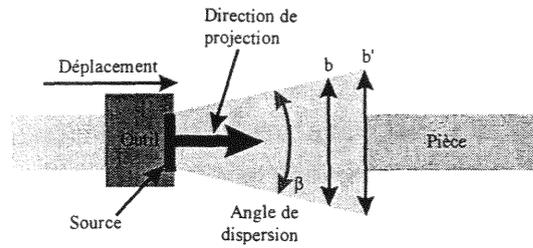


Figure 76 : Angle de dispersion et amplitudes axiales instantanées  $b$  et  $b'$ .

## 5. INFLUENCE DES PARAMETRES D'EMISSION SUR LE DISPOSITIF DE CAPTAGE

### a) SURFACE FRONTALE DE PROJECTION

La surface  $a \times b$ , liée aux amplitudes radiale et axiale instantanées, définit la *surface frontale minimale de projection* servant de référence pour le dispositif de captage pour définir la surface de captage.

En effet, plus le capteur sera éloigné de la source, plus la surface frontale de projection sera importante et plus la surface de captage minimale sera grande. Le débit d'air se calculant à partir de la surface de captage (débit = surface de captage  $\times$  vitesse de l'air), plus cette surface est importante plus le débit le sera aussi afin de respecter une vitesse de l'air dans le réseau d'aspiration suffisante au transport des particules. Afin de réduire le débit et donc la consommation d'énergie nécessaire à la mise en mouvement de l'air pour le transport, il paraît nettement judicieux de concevoir un système de captage au plus près de la source orienté dans la direction de projection et englobant la totalité des particules projetées afin de réduire le débit d'air nécessaire à l'évacuation des particules.

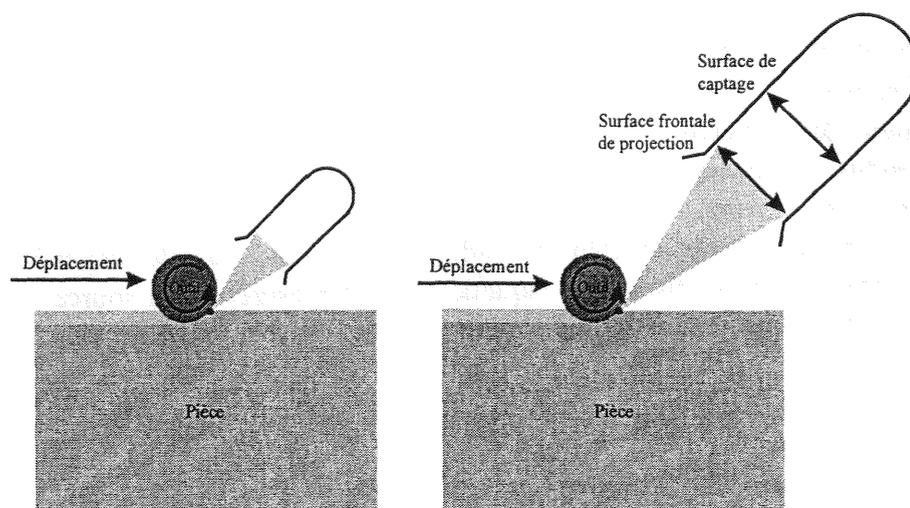
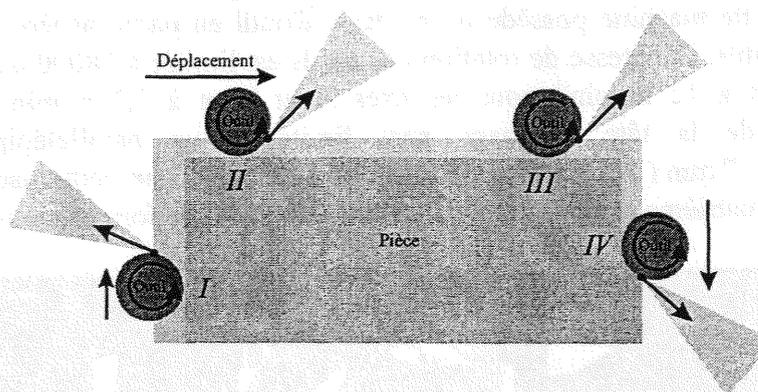


Figure 77 : Variation de la surface frontale de projection et de la surface de captage.

## b) AMPLITUDES RESULTANTES

Nous définissons les amplitudes résultantes comme étant les amplitudes de projection de particules pouvant résulter d'une mobilité de la source, de la variation de la direction de projection et de l'amplitude instantanée dépendante, au cours d'une même opération d'usinage.

Nous décrivons ci-après (Figure 78) un usinage au cours duquel la source d'émission est mobile, la direction de projection associée varie selon un angle de  $180^\circ$  et les amplitudes augmentent cet angle pour le porter à une valeur proche de  $240^\circ$  à la circonférence de l'outil. Il faudra donc tenir compte de cette configuration lors de la conception d'un dispositif de captage. Cet exemple illustre directement le cas d'un outil de défonceuse. Ce même outil peut effectuer un usinage sur les quatre côtés d'une même pièce. L'amplitude résultante couvre donc un angle de  $360^\circ$ .



**Figure 78 : Variation de la projection des particules au cours d'une même opération de contournage.**

Nous pouvons, en conclusion de ce chapitre, préciser que la source d'émission, la direction et les amplitudes d'émission des particules, variant ou non au cours d'une même opération d'usinage, conditionnent fortement l'efficacité de captage.

## II. AMELIORATIONS DU SYSTEME DE CAPTAGE

### 1. MACHINE ETUDIEE

Le système de captage que nous avons amélioré, est installé sur une défonceuse à commande numérique de type "portique fixe et table mobile" (Cf. "*Les défonceuses à commande numérique*") selon l'axe X. La tête d'usinage étant mobile selon les axes Y et Z (Figure 79). Cette machine possède un magasin d'outil en partie arrière de la table pouvant accueillir 10 outils. La vitesse de rotation des outils est limitée à  $18000 \text{ tr.min}^{-1}$  et les vitesses de déplacement à  $12 \text{ m.min}^{-1}$  pour les axes X et Y et à  $7,2 \text{ m.min}^{-1}$  pour l'axe Z. les déplacements de la tête d'usinage sont limités à un parallépipède rectangle de  $2000 \times 1250 \times 277 \text{ mm}$  (Y  $\times$  X  $\times$  Z). Un mandrin a été adapté sur cette machine, assurant ainsi la fonction de quatrième axe permettant d'usiner des pièces de formes circulaires.

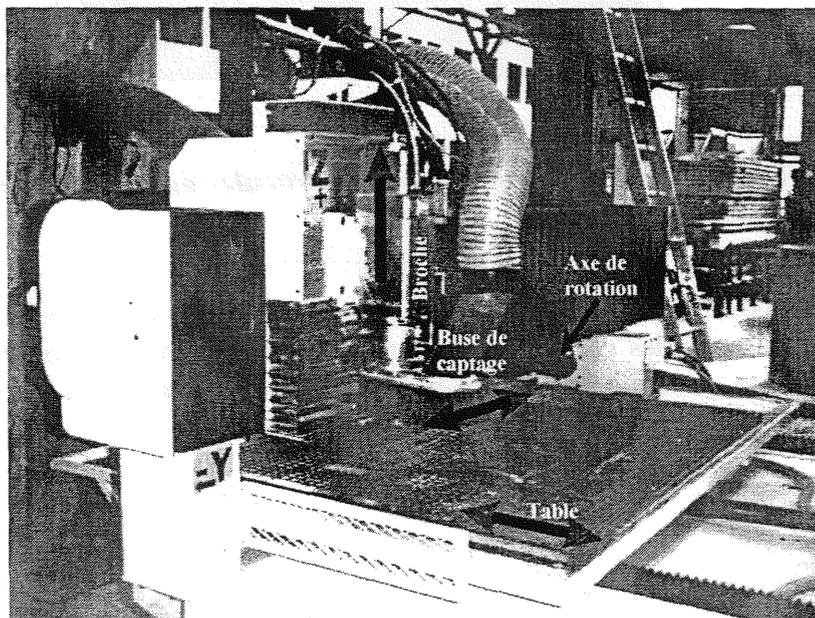


Figure 79 : Machine étudiée.

Avant de présenter les résultats que l'on a pu quantifier par des mesures d'émission, nous souhaitons présenter le nouveau système à la fois par le principe de captage mis en oeuvre et par la technique employée. Nous allons voir, qu'avant d'effectuer quelques essais en vraie grandeur, par la bonne prise en compte de certains paramètres, nous étions très fortement confiants dans le système ayant émergé de la conception distribuée. Pour cela, nous allons présenter les voies de solutions possibles ainsi que celle que nous avons retenue, avant de présenter plus en détails le nouveau système.

## 2. LIMITES DU SYSTEME ACTUEL

Partant des caractéristiques d'émission qui ont été décrites dans le chapitre précédent, il est facile d'effectuer un constat : les constructeurs de défonceuses à commande numérique du secteur bois, dans leur ensemble, n'ont pas (ou peu) contribué à l'évolution des systèmes de captage sur ces machines ; il suffit de recenser et de comparer l'ensemble des machines présentes sur le marché aujourd'hui pour s'apercevoir que toutes ont des systèmes de captage quasiment similaires. Chacune des machines présentes aux catalogues des constructeurs possède un système de captage localisé autour de l'outil englobant celui-ci. Pour compenser le manque d'efficacité de tels systèmes, les constructeurs, avec l'appui des fabricants de systèmes de ventilation, préconisent alors aux utilisateurs des débits d'aspiration très importants de l'ordre de 4000 à 5000 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. Ces débits très importants entraînant nécessairement des dépenses énergétiques considérables que seules les entreprises utilisatrices doivent supporter.

Lors de l'expérience de conception que nous avons menée, les acteurs, par l'intermédiaire de l'acteur ventilation, ont réfléchi au comment améliorer le système de captage d'une défonceuse. Pour cela, ils ont analysé le travail effectué sur cette machine, identifié les variations d'émission des particules qui en découlaient, afin de trouver une solution optimisant au mieux le captage sur cette machine. Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, l'émission sur une défonceuse à commande numérique est variable selon la position relative de l'outil par rapport à la pièce, son déplacement relatif, sa forme, le matériau usiné, ...

Ils ont également pris en compte les manques évidents du système présent sur la machine mais également des quelques systèmes qu'ils connaissaient sur d'autres machines (tout à fait similaires à celui existant sur la machine à améliorer). Ainsi par une analyse simple tenant compte des principes d'émission décrits ci-avant, il est possible de comprendre que la source d'émission, sur une défonceuse, est mobile à la fois autour de l'outil et avec l'outil. Ainsi, la direction de projection est variable selon un angle de 360° couvrant tout le plan XY (Figure 80), correspondant alors à la projection des particules de bois sur l'ensemble de la table de travail mais bien au delà (les particules ayant une vitesse de projection importante, elles ne limitent pas à la surface de la table d'usinage).

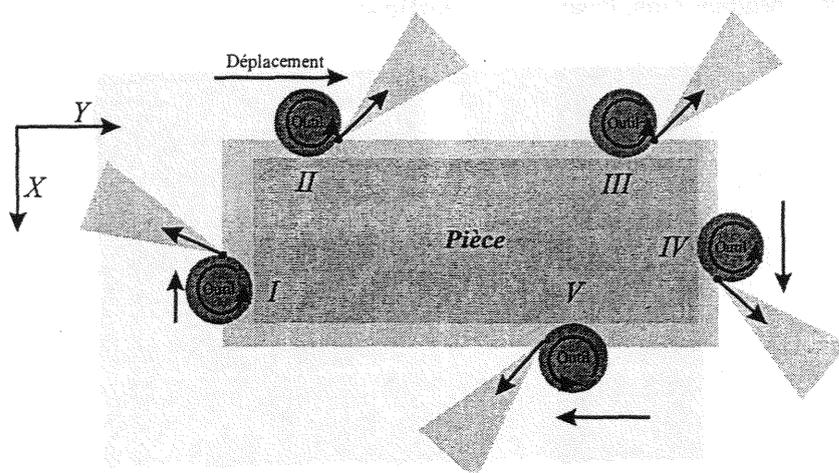
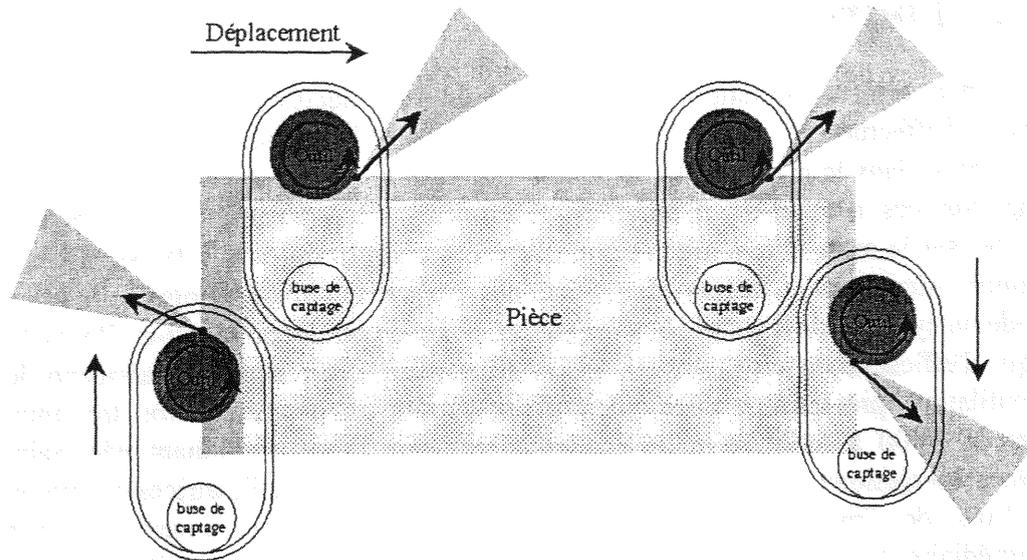


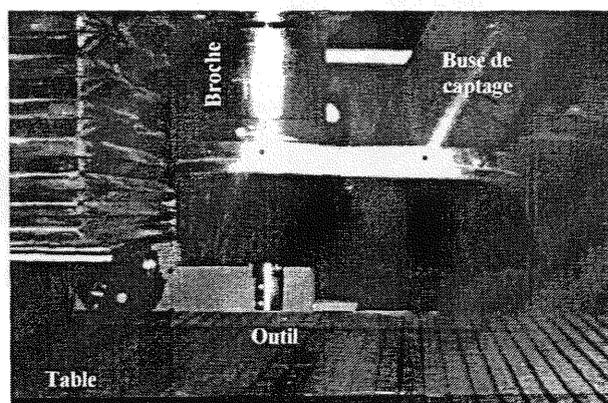
Figure 80 : Variation de la direction des particules lors d'un contourage.



**Figure 81 : Principe de l'ancien système.**

Si l'on représente le déplacement de l'outil sur le pourtour d'une pièce et que l'on y illustre également la variation de la direction de projection, ainsi que la position du système de captage (Figure 81), il est possible de visualiser très rapidement les limites de l'ancien système. A savoir :

- la non couverture de la totalité de la zone de projection des particules,
- la non prise en compte de la direction de projection,
- une direction privilégiée d'aspiration par l'emplacement de la buse de captage,
- seul l'asservissement de la buse de captage avec l'outil est effectué,
- pas d'asservissement en hauteur du système en fonction de la longueur des outils utilisés (sur la Figure 82, le système de captage est en position basse, comme pour un usinage. Dans ces conditions les balais ne peuvent venir en contact avec la pièce usinée, rendant ainsi l'aspiration inefficace).



**Figure 82 : Ancien système.**

Ils ont alors pu décliner plusieurs voies de solutions. Pour cela ils ont du élaborer des voies de solutions et les analyser en groupe autour de l'acteur ventilation.

### **3. VOIES DE SOLUTIONS**

Il est possible d'envisager encoffrer totalement la machine. Ce type de solution ne permet pas à l'opérateur de travailler dans les meilleures dispositions. En effet, celui-ci, comme nous avons pu l'identifier, a un besoin important de voir et de toucher la pièce notamment lors de la phase de réglage. Il lui est également nécessaire de pouvoir voir l'outil en cours d'usinage pour évaluer sa trajectoire, sa position, ... Le principe de l'encoffrement complet n'est également pas pertinent car il ne permet pas forcément l'évacuation complète des particules. Il réalise, tout au plus, un confinement qui réduit les projections vers l'opérateur et ainsi les risques d'inhalation de particules pouvant lui causer des irritations voire des maladies reconnues comme professionnelles. Par ce simple confinement, les poussières de bois sont pendant un temps en suspension dans la cabine puis viennent se déposer sur les éléments de machine à savoir la table, la tête d'usinage, les éléments de maintien des pièces, la pièce elle même. L'opérateur, lorsqu'il veut retirer la pièce usinée, doit alors nettoyer celle-ci, et le fait le plus souvent à l'aide d'une soufflette d'air comprimé : le problème est alors strictement le même qu'auparavant.

Une autre solution consistait à augmenter la surface de captage autour de l'outil pour couvrir totalement la surface liée aux amplitudes résultantes. Cette solution, proche de l'encoffrement, possède de nombreux inconvénients. Certes, par rapport à l'encoffrement, elle ne nécessite plus un nettoyage systématique des pièces après usinage, mais, pour avoir une vitesse d'air suffisante pour évacuer les particules, il est nécessaire de générer un débit très important proportionnel à la surface de captage, correspondant environ à la surface de la table.

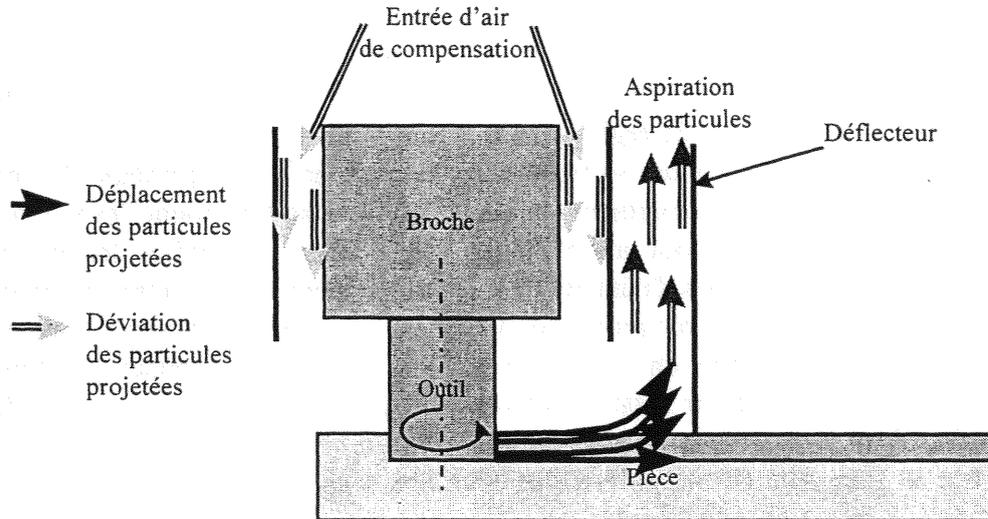
Le système existant correspond à une troisième voie de solution, la plus couramment employée par les constructeurs. Par un confinement réduit autour de l'outil et par un asservissement avec cet outil, le système de captage réduit l'émission des particules dans une zone autour de l'outil (dans la mesure où le système de ventilation a un débit suffisant). Ainsi, par cette solution simple de réalisation, les constructeurs pensent avoir un système de captage efficace avec des débits et donc des vitesses d'air importants résolvant leur problèmes de captage. Cette solution, partiellement satisfaisante, aurait pourtant pu être simplement améliorée par les acteurs de notre expérience. En effet, par une augmentation du débit de ventilation, un asservissement en hauteur du capteur, un positionnement de la buse de captage concentrique par rapport à l'outil, elle aurait certainement pu permettre l'amélioration du captage sur la machine que nous avons étudiée.

### **4. SYSTEME DEVELOPPE**

Par défi personnel et collectif, et par souci de limiter les débits d'air, les acteurs ont souhaité aller plus loin dans la prise en compte des caractéristiques de l'émission des particules sur ces machines. Ainsi, par un asservissement en position suivant la direction des particules, un déplacement avec l'outil, un asservissement en hauteur suivant la longueur de l'outil utilisé, un captage au plus près de la source d'émission et un confinement réduit autour

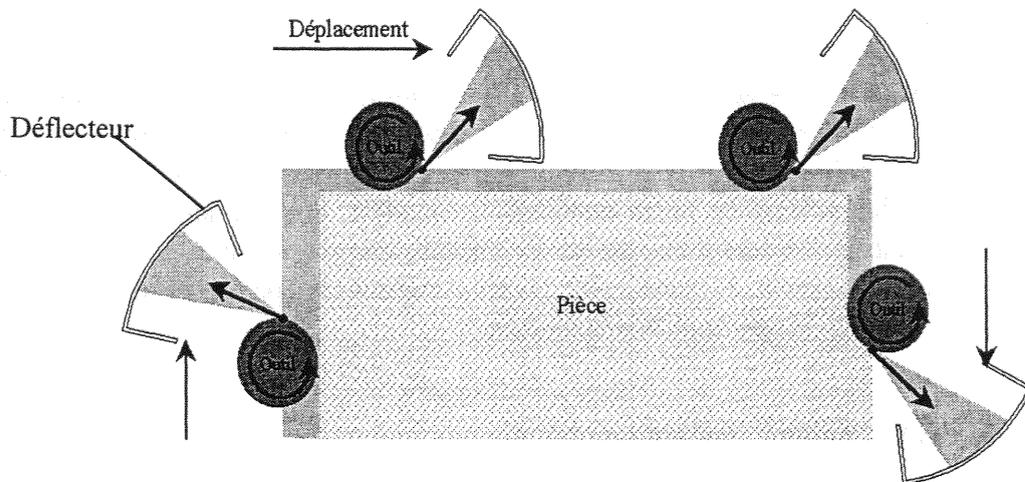
de l'outil, les acteurs ont ainsi pris en compte au mieux les caractéristiques et les variations de l'émission.

L'objectif principal du nouveau système est, à l'aide d'un déflecteur rotatif, de stopper (ou tout au moins de dévier) les particules dans leur projection et ensuite de les évacuer (Figure 83).



**Figure 83 : Principe du déflecteur et de l'évacuation des particules.**

Pour contrer le déplacement des particules, un déflecteur positionné dans la direction de leur projection, est asservi en fonction du programme d'usinage. Dans le programme d'usinage, nous avons défini plusieurs fonctions permettant de choisir l'orientation angulaire du déflecteur en fonction des déplacements de l'outil relativement à la pièce. Ainsi, pour chacun des déplacements de l'outil, le déflecteur se trouve positionné dans la direction de projection des particules (Figure 84).



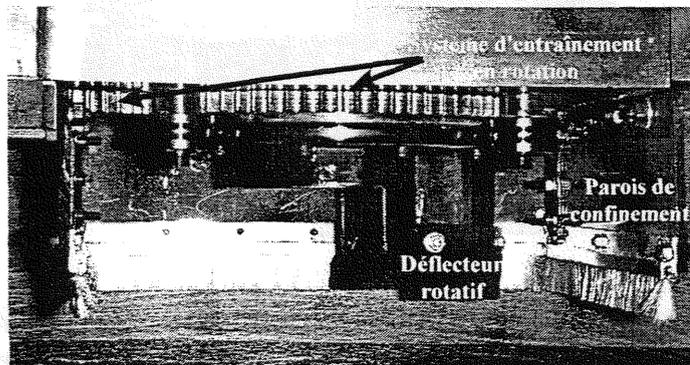
**Figure 84 : Principe du déflecteur rotatif.**

Cet asservissement en rotation du déflecteur en fonction du déplacement de l'outil, de son diamètre et de la profondeur de passe, peut tout à fait être intégré à la conception des

machines neuves. En ajoutant un pilotage d'axe, il suffit de définir des fonctions, soit au niveau du programme d'usinage, soit au niveau de l'automate, qui permettent, par un paramétrage géométrique fonction du programme d'usinage, de l'outil et de la profondeur de passe, de commander la position et la rotation du déflecteur.

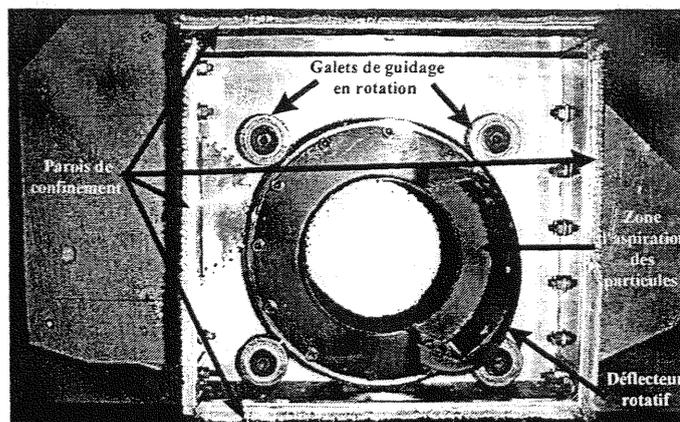
Lors d'un déplacement rectiligne de l'outil, le déflecteur doit s'orienter dans la direction de projection des particules. Lors d'un déplacement circulaire, il doit s'orienter dans la direction des particules à une vitesse identique à celle de l'outil. Il faut donc prévoir un asservissement en vitesse également du capteur pour pouvoir se positionner correctement au cours d'un usinage de formes courbes.

Sur le prototype développé, le déflecteur est entouré de parois permettant de confiner les particules. Ces parois sont en matières plastiques transparentes pour permettre à l'opérateur de voir l'outil en cours d'usinage. De plus, une de ces parois peut se relever par l'action de l'opérateur, lui permettant alors de mieux voir l'outil, notamment dans les phases de réglages ou de mise au point de nouveaux programmes. Ce relevage s'effectue par l'intermédiaire d'un électro-aimant, commandé à distance par l'opérateur. Cette commande à distance permet de s'assurer que l'opérateur ne peut venir en contact avec l'outil lorsque la paroi est relevée, évitant ainsi les risques de coupure avec l'outil en rotation. Ces parois réalisent également une protection mécanique contre les risques d'éclatement des outils en cours d'usinage.



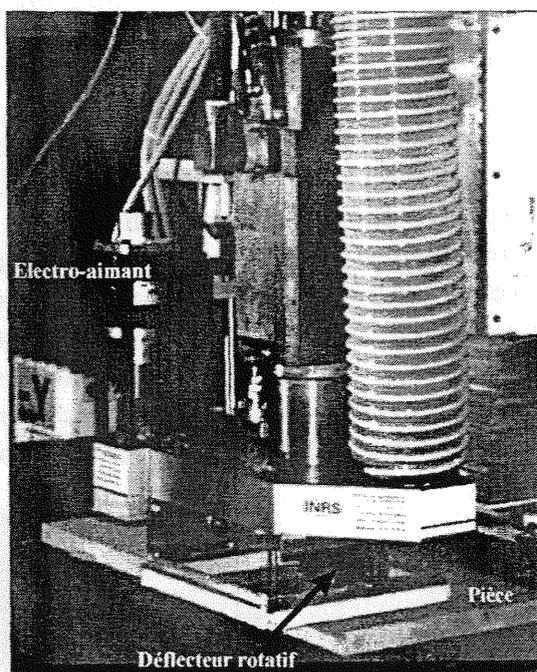
*Figure 85 : Détail du déflecteur et de son système d'entraînement en rotation.*

Les particules, une fois arrêtées par le déflecteur, sont aspirées à l'aplomb du déflecteur, puis évacuées après un passage dans la semelle (Figure 86).



*Figure 86 : Système vu de dessous.*

Du fait d'une limitation technique propre à la machine d'étude, l'asservissement en hauteur du système de captage, a été réduit à deux positions. Ainsi, la position haute est affectée au changement d'outil, et la position basse à l'usinage (Figure 87). Dans cette position basse, les parois et le déflecteur sont au plus proche possible de la pièce, assurant ainsi un captage au plus près de la source d'émission, garantissant du même coup une efficacité de captage maximale.



*Figure 87 : Capteur en position d'usinage.*

Par une bonne prise en compte des caractéristiques de l'émission des particules, nous disposons d'un système de captage qui, d'un point de vue purement théorique, est plus efficace que l'ancien système.

### III. TESTS ET MESURES EFFECTUES

Afin de pouvoir comparer le nouveau système de captage avec l'ancien, nous avons effectué deux campagnes d'essais avec chacun des systèmes.

Les conditions d'essais étaient reproduites au mieux entre les deux campagnes d'essais :

- les essais ont été effectués sur des panneaux en MDF reconnu pour son homogénéité et sa facilité de travail [EMB\_93],
- chaque pièce de MDF mesurait 900 × 740 mm et 30 mm d'épaisseur,
- chaque essai a été effectué en prenant une passe de 8 mm. Ainsi dans le panneau travaillé il a été possible d'effectuer trois passes, à trois hauteurs différentes mais à épaisseur de passe égale (Figure 88) :

Passe 1 : Hauteur = épaisseur = 8 mm,

Passe 2 : Hauteur = 2 x épaisseur = 16 mm,

Passe 3 : Hauteur = 3 x épaisseur = 24 mm,

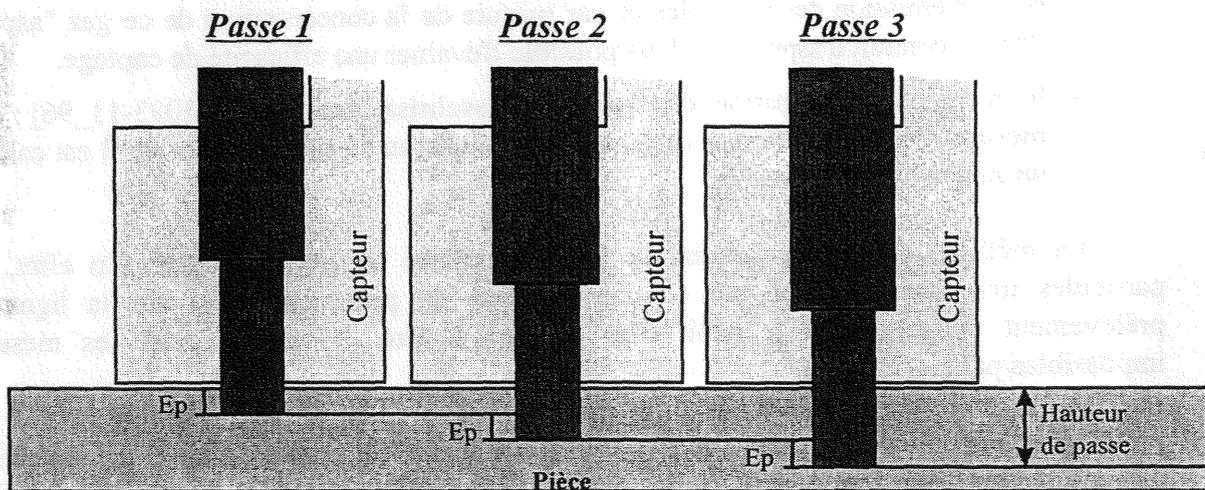
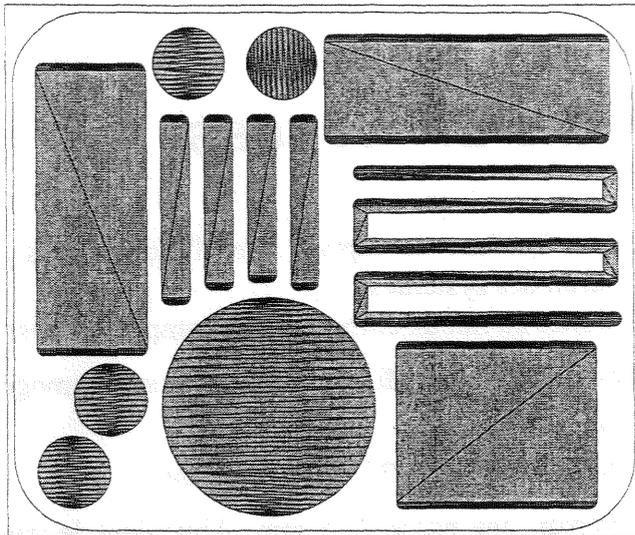


Figure 88 : Variation de la hauteur de passe à épaisseur de passe égale.

- l'outil utilisé était un outil à défoncer de diamètre 20 mm et de longueur utile 60 mm en acier rapide tournant à 18000 tr.mn<sup>-1</sup>,
- toutes les pièces d'essais ont été usinées selon le même programme d'usinage reproduisant les principaux usinages possibles avec une défonceuse sur une pièce en 2 dimensions : contournage extérieur et défonçage privilégiant à chaque fois une direction de projection différente selon l'usinage (Figure 89).



*Les parties grisées correspondent aux parties usinées en pleine matière par défonçage.*

**Figure 89 : Pièce usinée lors des essais de captage.**

Nous avons voulu travailler selon deux méthodes de mesure :

- la technique de **traçage hélium** [NF EN 1093-4\_96] : par génération d'hélium au point d'émission des particules et par mesure de la concentration de ce gaz "aspiré" dans le conduit d'aspiration, il est possible d'évaluer une efficacité de captage.
- la technique d'évaluation de l'**indice d'assainissement** [prEN 1093-11\_96] : par mesures des concentrations de poussières au niveau du poste de travail, il est calculé un indice d'assainissement.

La méthode de traçage hélium n'a pu être utilisée sur cette machine. En effet, les particules très fines de MDF ont colmaté le filtre de protection placé sur la ligne de prélèvement faisant chuter le débit d'air prélevé à zéro et rendant ainsi les mesures impossibles par cette technique.

La seconde méthode permet, quant à elle, l'évaluation des performances d'un système de captage et d'aspiration associé. Les concentrations de particules sont alors mesurées en des points prédéterminés autour de la machine soumise au contrôle. Deux photomètres (Hund 1 et 2) et un compteur de particules (Grimm) ont été placés sur la table de la défonceuse comme le précise la Figure 90 ci-après.

Ces emplacements, correspondant à des "*zones d'émission significatives*", ont été choisis pour :

- avoir en chaque point de mesure des concentrations nettement différenciées de la concentration ambiante,
- prendre en compte un certain volume autour du point de génération,
- ne pas entraîner de gêne pour l'opérateur pendant l'usinage,
- positionner chacun des appareils de mesures afin qu'il soit exposé à un niveau équivalent à celui d'un opérateur travaillant normalement sur cette machine.

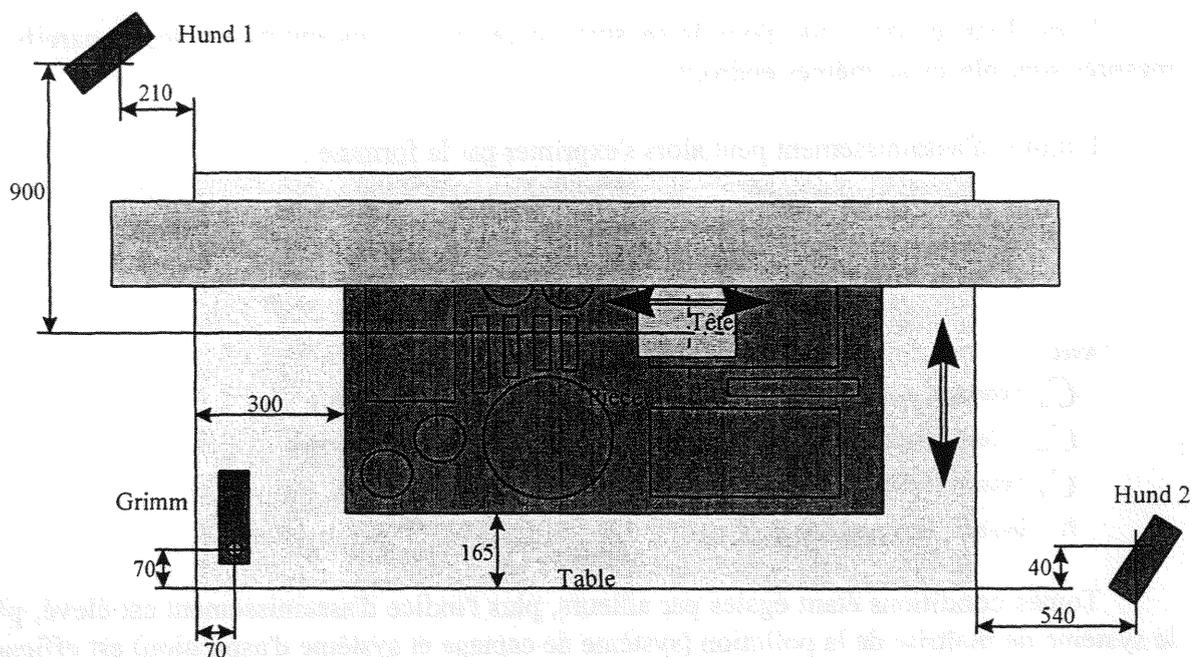


Figure 90 : Emplacement des appareils de mesure sur la défonceuse.

Une fois les points de mesurage déterminés, la procédure de test pour évaluer un indice d'assainissement se déroule en trois phases

- mesure de la concentration  $C_f$ , machine et aspiration arrêtées,
- mesure de la concentration  $C_m$ , machine et aspiration en service,
- mesure de la concentration  $C_a$ , machine en service et aspiration arrêtée.

$C_f$  correspond à la mesure du niveau résiduel résultant de l'émission des machines environnantes et des autres procédés d'aspiration. Dans notre cas de travail, l'aspiration des machines présentes dans l'atelier, s'effectue par plusieurs systèmes de ventilation pour une machine ou pour un groupe de machines. Ainsi, ces nombreux systèmes d'aspiration indépendants, peuvent perturber les mesures et en particulier la mesure de la concentration  $C_f$ . Durant nos essais, les machines environnantes de celle sur laquelle nous travaillions, n'étaient pas en fonctionnement. Ceci s'explique par le fait que ces essais se sont déroulés dans les ateliers d'un centre de recherche et qu'il est possible dans ces conditions d'arrêter les machines durant plusieurs jours de suite. Nous reviendrons plus loin sur les perturbations de mesures que nous avons néanmoins pu rencontrer.

$C_m$  est le résultat de la mesure de concentration effectuée avec la machine et son système d'aspiration en fonctionnement. Afin de pouvoir reproduire les conditions d'essais, nous avons travaillé chacune des pièces selon un même programme d'usinage qui nous a permis d'effectuer une mesure en continue sur 13 min. de temps d'usinage.

La concentration  $C_a$  se mesure machine en fonctionnement mais aspiration arrêtée. Cette mesure de concentration s'effectue dans les mêmes conditions que pour la mesure de  $C_m$ , durant le même temps de mesurage, avec le même outil, le même matériau, mais sans aspiration.

Il est bien évident que pour la mesure de ces trois concentrations, les appareils de mesures sont placés au mêmes endroits.

L'indice d'assainissement peut alors s'exprimer par la formule :

$$I_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_{ai} - C_{mi}}{C_{ai} - C_{fi}}$$

Avec :

$C_{ai}$  : concentration mesurée machine en fonctionnement et aspiration arrêtée,

$C_{mi}$  : Concentration mesurée machine en fonctionnement et aspiration en service,

$C_{fi}$  : concentration mesurée machine et aspiration arrêtées (niveau résiduel),

$n$  : nombre d'emplacements de mesure.

Toutes conditions étant égales par ailleurs, plus l'indice d'assainissement est élevé, plus le système de maîtrise de la pollution (système de captage et système d'aspiration) est efficace.

Trois essais par panneau ont été effectués, nous permettant d'évaluer ainsi l'influence de la profondeur de passe sur l'émission de poussières.

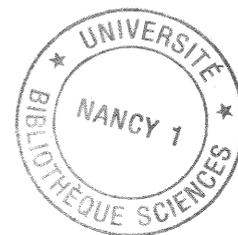
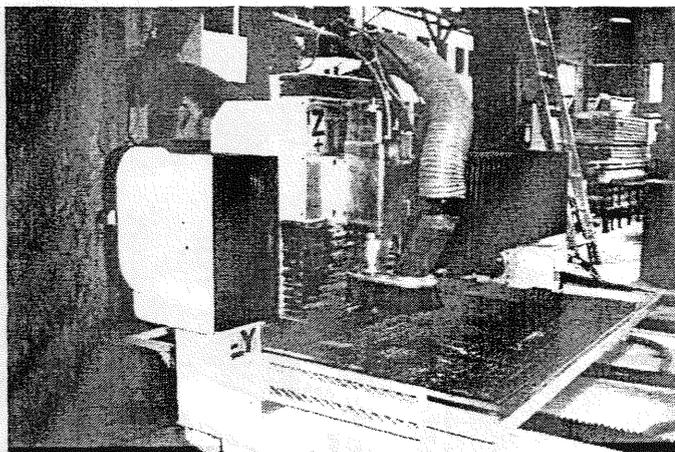
Comme la défonceuse travaille à partir d'un programme numérique, d'un essai à l'autre elle décrit exactement (à la précision près des axes de déplacement) le même parcours à la même vitesse. Nous avons donc une reproductivité quasi parfaite d'un essai à l'autre d'un point de vue machine. Chaque essai est effectué deux fois dans les mêmes conditions, à la même profondeur de passe.

Afin d'évaluer l'influence du débit d'air sur l'efficacité du système d'aspiration, nous avons travaillé avec deux débits différents d'aspiration. Etant limités par les systèmes d'aspiration à notre disposition, nous n'avons pu travailler avec des débits proches de ceux préconisés par les constructeurs de défonceuses à commande numérique (à savoir entre 3 000 et 4 000 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>).

## 1. RESULTATS AVEC LA CONFIGURATION D'ORIGINE

Dans un premier temps, avant de travailler à l'amélioration en conception du système de captage, la machine a été testée dans sa configuration initiale équipée de son système de captage d'origine (Figure 91) et pour deux configurations de débit : 400 et 700 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>.

Dès maintenant, nous pouvons dire que ces conditions de débit ne correspondent pas forcément à celles que nous rencontrons couramment dans l'industrie, mais là était également un challenge pour la conception : concevoir un système efficace avec un débit très faible (par rapport à ceux préconisés par les constructeurs), permettant ainsi de remettre en question la pertinence des débits préconisés.



*Figure 91 : Système d'origine.*

De plus, l'un des appareils (le "Grimm" sur la Figure 90) n'a pu servir aux mesures. En effet, cet appareil a été en saturation durant tous les essais que la ventilation fonctionnait ou non. Des trois appareils il était le plus exposé aux poussières car le plus proche de la source d'émission, et recevait donc une grande quantité de poussières qui le saturait rapidement. Il ne nous a donc pas été possible d'évaluer un indice d'assainissement avec cet appareil.

Les indices d'assainissement pour les débits de  $400 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  et de  $700 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  avec l'ancien système sont donnés dans le Tableau 10 ci-dessous (les valeurs complètes sont données en annexe) :

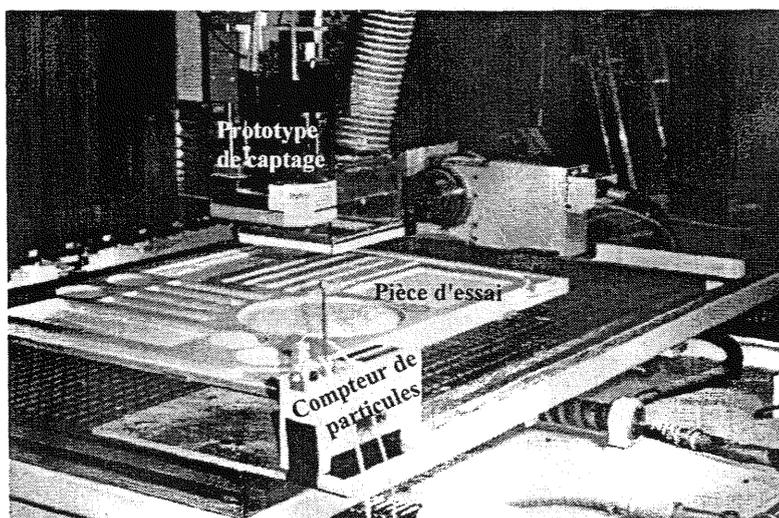
Passé	IA 400	IA 700
1	57.5	71.3
2	60.8	82.7
3	46.1	77.5
<b>Moyenne</b>	<b>54.8</b>	<b>77.2</b>

*Tableau 10 : Indice d'assainissement avec l'ancien système.*

## **2. RESULTATS AVEC LA NOUVELLE CONFIGURATION**

Nous avons, une fois le nouveau système développé, fabriqué et installé sur la défonceuse (Figure 92), effectué une campagne de tests similaire à celle menée avec l'ancien système.

Le système de ventilation ne pouvant assurer un débit suffisant (une forte perte de charge a pu être mesurée avec le nouveau système, les surfaces de passage de l'air étant réduites), nous avons alors raccorder le nouveau système de captage à un autre système de ventilation à proximité qui nous a permis de travailler à un débit proche du maximum précédemment utilisé avec l'ancien système, à savoir  $620 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Pour les mêmes raisons nous n'avons pu augmenter ce débit. Sinon les conditions de tests furent les mêmes que précédemment.



*Figure 92 : Nouveau système de captage.*

Cette fois-ci le "Grimm" n'a jamais saturé, permettant d'effectuer un calcul d'indice d'assainissement avec cet appareil en plus des deux photomètres.

Les indices d'assainissement pour les débits de  $400 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$  et de  $620 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$  avec le nouveau système est donné dans le Tableau 11 ci-dessous :

Passe	IA 400	IA 620
1	95.6	99.8
2	96.9	99.8
3	95.2	99.6
<b>Moyenne</b>	<b>95.9</b>	<b>99.7</b>

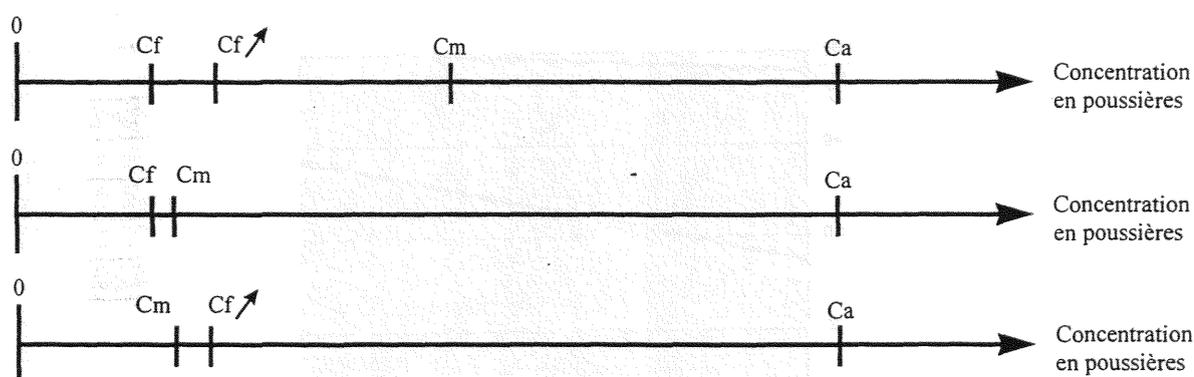
*Tableau 11 : Indice d'assainissement avec le nouveau système.*

Lors de nos essais avec le nouveau système, nous avons rencontré des difficultés à mesurer une concentration stable pour la mesure du niveau résiduel, d'un essai à l'autre. De plus, les valeurs résiduelles mesurées, étaient parfois plus importantes que celles mesurées avec la machine et son système d'aspiration en fonctionnement. Sans qu'il ne soit possible d'attribuer ces valeurs trop élevées à un empoussièrément de l'environnement par d'autres machines (aucune ne fonctionnait lors de nos essais), n'ayant pas rencontré ces phénomènes lors de la première campagne, il nous a fallu expliquer ces valeurs et les corriger. Le système d'aspiration n'étant pas le même que précédemment, nous nous sommes aperçus que les systèmes de filtration (filtres en tissu) n'étaient pas aussi efficaces qu'avec l'ancien système. Des particules aspirées dans un premier temps étaient alors rejetées dans l'atelier (le système d'aspiration étant dans cet atelier). Lors de la mise en marche de l'aspiration, un flux d'air était créé entre l'orifice de captage sur la machine et la sortie du ventilateur. Par ce flux d'air, les particules rejetées par le système d'aspiration, étaient entraînées vers la machine. Durant l'usinage, ces particules étaient en partie réaspirées. Mais une fois l'essai terminé, ces particules mises en suspension, retombaient sur la machine et venaient alors augmenter les concentrations résiduelles mesurées. Ainsi, les concentrations résiduelles étaient plus importantes que les concentrations mesurées lors de l'usinage d'une pièce. Ce phénomène n'a

pu être observé lors de l'usinage de pièce avec l'aspiration à l'arrêt, le niveau d'empoussièrément étant alors plus important que celui machine et aspiration en fonctionnement.

Ce même phénomène existait certainement lors de la première campagne, mais était masqué par l'empoussièrément causé par l'usinage. L'efficacité du nouveau système étant proche de 100%, les concentrations mesurées lors de l'usinage sont très proches des concentrations résiduelles et la moindre influence d'une perturbation extérieure au système, perturbe les mesures. Comme nous pouvons le voir sur la Figure 93, une petite variation de la concentration résiduelle n'a pas réellement d'influence sur le calcul de l'indice d'assainissement lorsque le système mesuré couplé à son aspiration ne permet pas d'être suffisamment efficace. Mais dès qu'un système et son aspiration permettent d'avoir un indice d'assainissement proche de 100%, une variation, même faible de la concentration résiduelle, peut fausser les valeurs et augmenter l'indice d'assainissement au delà de 100%. Il faut alors être capable de mesurer précisément cette concentration résiduelle afin de minimiser son influence sur le calcul de l'indice d'assainissement.

Pour remédier à ces problèmes, nous avons attendu entre deux mesures que les poussières rejetées par le système d'aspiration, aient le temps de retomber sur la machine, avant de réaliser un nouvel essai. Ainsi les valeurs qui sont données ci-dessus, intègrent ces niveaux résiduels mesurés.



**Figure 93 : Influence relative d'une variation de la concentration résiduelle.**

La norme définissant la méthode de mesure et de calcul de l'indice d'assainissement, ne définit pas de procédure fixe de mesure des différentes concentrations nécessaires. Ainsi, il n'est pas prévu de modification de la formule de calcul lorsque les mesures de concentrations ne sont pas effectuées à la suite, ou le même jour. Si la concentration  $C_m$  est mesurée un jour, et que la concentration  $C_a$  l'est le lendemain, la comparaison n'est plus possible étant donné que la référence (niveau résiduel  $C_f$ ) a pu très fortement changer d'un jour à l'autre.

De même, lorsque l'on mesure la concentration  $C_a$ , machine en marche mais ventilation à l'arrêt, le poste de travail est très fortement empoussiéré, augmentant d'autant le niveau résiduel. Pourtant la norme ne prévoit pas cette situation. Il faudrait pour palier ce problème, tenir compte du niveau résiduel entre chaque mesure de concentration, permettant ainsi de relativiser les mesures et d'effectuer un calcul d'indice d'assainissement tenant compte des variations possible du niveau résiduel entre deux mesures. Ainsi la formule du calcul de l'indice d'assainissement deviendrait :

$$I_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(C_{ai} - C_{fai}) - (C_{mi} - C_{fmi})}{C_{ai} - C_{fai}}$$

Avec :

$C_{ai}$  : concentration mesurée machine en fonctionnement et aspiration arrêtée,

$C_{fai}$  : concentration mesurée machine et aspiration arrêtées (niveau résiduel) juste avant la mesure de  $C_{ai}$ ,

$C_{mi}$  : Concentration mesurée machine en fonctionnement et aspiration en service,

$C_{fmi}$  : concentration mesurée machine et aspiration arrêtées (niveau résiduel) juste avant la mesure de  $C_{mi}$ ,

$n$  : nombre d'emplacements de mesure.

### 3. COMPARAISON DES RESULTATS :

Comme nous venons de le voir au travers du calcul de l'indice d'assainissement, l'efficacité du nouveau système est démontré (Figure 94). Mais au delà de cette mesure, dont les résultats sont à mettre en rapport avec les conditions d'essais, il nous paraît bon de décrire les impressions, les sensations éprouvées en travaillant avec ce système, au travers des différents essais que nous avons pu effectuer et des améliorations qu'il nous semble encore nécessaires.

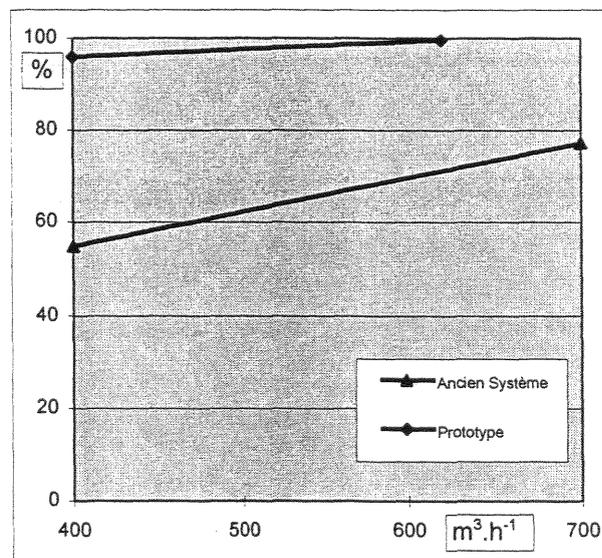
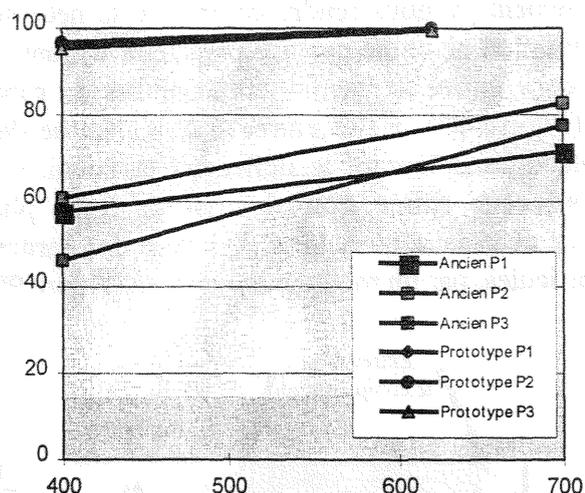


Figure 94 : Indices d'assainissement des deux systèmes.

Compte tenu de la dispersion des résultats, d'un essai à l'autre dans les mêmes conditions, il est difficile de corréler l'indice d'assainissement avec la passe, tant avec l'ancien qu'avec le nouveau système. La variation de passe, l'épaisseur de passe étant toujours la même mais le système de captage variant par rapport à la source d'émission, a une influence visuelle sur la génération de poussières et donc sur l'efficacité de captage, mais les mesures n'ont pu mettre en évidence ce phénomène (Figure 95). Ce point mériterait plus de tests afin de quantifier tant l'influence de la variation de hauteur de passe que la variation d'épaisseur de passe. En effet, avec les défonceuses à commande numérique, il est possible d'usiner, par exemple avec un outil du type de celui que nous avons employé (à savoir une mèche de défonçage), des usinages de quelques millimètres à des épaisseurs de plusieurs dizaines de

millimètres. L'efficacité de captage est nécessairement influencée par ces variations importantes dans les conditions d'usage.



**Figure 95 : Variations de l'indice d'assainissement en fonction de la passe effectuée.**

Il faut souligner, comme nous l'avons démontré dans le chapitre précédent, que chacun des acteurs a une part importante dans le développement. Ceci est confirmé par le résultat concrétisé par ce nouveau système de captage. D'un principe nous arrivons à un prototype qui ne demande qu'à être amélioré et à démontrer qu'il est possible d'améliorer les systèmes de captage de ces machines. Cette collaboration de points de vue nombreux et variés s'est également traduite par une mise au point réduite, une installation très rapide et des essais qui, en dehors des problèmes liés aux systèmes de ventilation, se sont déroulés dans les meilleures conditions.

#### 4. AMELIORATIONS POSSIBLES

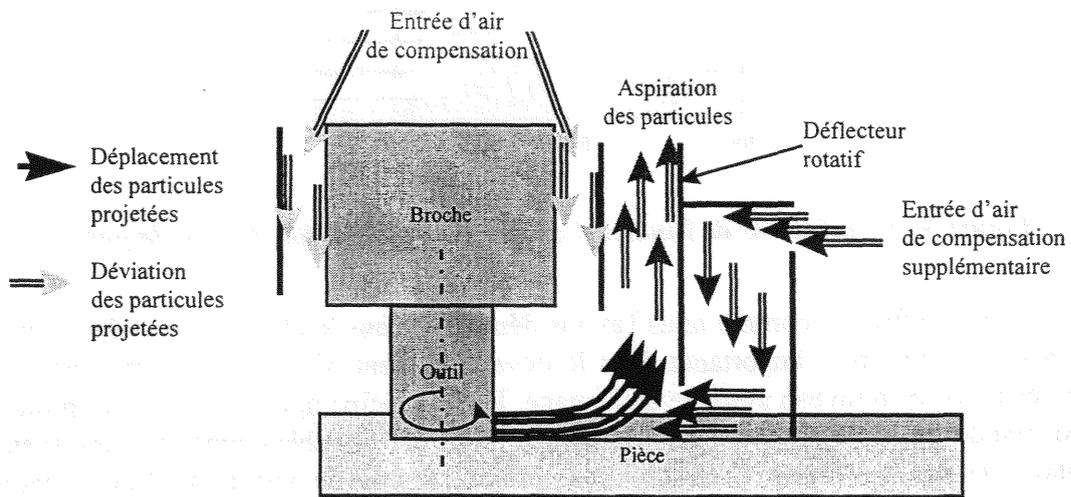
Nous avons effectué de plus amples essais avec d'autres types d'outils, de matériau, de configuration. Ainsi nous avons pu constater qu'un système d'aspiration ne délivrant que  $620 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  n'était pas suffisant lors du travail avec des outils de plus fort diamètre ou de forme différente. Ainsi, l'outil avec lequel nous avons travaillé (mèche de défonçage de diamètre 20 mm) possédait un angle d'hélice entraînant les particules vers le haut, et donc vers le capteur, facilitant d'autant le captage. Lors de l'essai avec un outil de plus fort diamètre (50 mm) à plaquette verticale, nous avons pu constater que l'efficacité de notre système était diminuée. Deux raisons peuvent expliquer cette diminution :

- le diamètre étant plus important, la vitesse de projection des particules est plus importante (même vitesse de rotation en  $\text{tr} \cdot \text{mn}^{-1}$  avec les deux outils),
- la direction de projection étant parfaitement verticale, le phénomène de remontée de particules par l'outil dans la direction de captage ne se produit plus.

Par une augmentation du débit d'aspiration, jusqu'à environ  $1000$  à  $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , la vitesse de l'air au niveau du capteur serait augmentée (à diamètre de conduit de d'aspiration constant) venant compenser l'augmentation de la vitesse de projection des particules

permettant ainsi d'avoir une efficacité aussi bonne que lors des essais quantifiés précédemment.

Nous avons également pu nous rendre compte de la nécessité d'avoir une entrée d'air pour que le débit d'aspiration ne chute pas. Ce paramètre n'ayant pas été évalué par l'étude à priori. Actuellement, cette entrée s'effectue par le dessus du capteur, entre la broche et le fourreau du capteur (**Figure 83**). Cette entrée d'air s'effectue dans l'ensemble de la zone délimitée par les protections entourant le déflecteur et l'outil. Il est possible que par une modification judicieuse, cette entrée d'air se fasse de façon plus localisée au niveau du déflecteur. Ainsi, cet air nécessaire au débit d'aspiration des particules, pourrait venir contrer la projection de ces particules, par un mouvement opposé (**Figure 96**).



**Figure 96 : Modification de l'entrée d'air de compensation.**

# CONCLUSIONS PERSPECTIVES

---

Comme il se doit, nous souhaitons présenter, au terme de ce mémoire, un certain nombre de conclusions relatives aux travaux présentés d'une part, et des perspectives de recherche et de valorisation d'autre part.

Nous avons souhaité, par notre travail, apporter, comme nous l'avions indiqué au début de ce mémoire, des éléments pragmatiques contribuant à une proposition de démarche méthodologique d'amélioration de la sécurité sur les machines à bois semi-automatisées autour du maître mot de l'intégration des aspects sécuritaires à la conception. Cette démarche d'intégration s'appliquant en quatre étapes, nous allons présenter quelques éléments de conclusion pour chacune de ces étapes.

La première étape d'identification nous aura permis d'approcher le travail des défonceuses à commande numérique par l'aspect sécuritaire au travers de l'analyse des données d'accidents puis par quelques éléments permettant de positionner les exigences réglementaires dans un processus de conception.

Cette étape est nécessaire dans notre travail pour permettre de situer le problème à résoudre dans un contexte totalement différent de celui, essentiellement technique, dans lequel sont habituellement les fabricants de ces machines. De même, la présentation des différentes démarches socio-techniques visait à bien positionner le concepteur de machine face à l'identification de l'aspect humain dans le système de production et dans le processus de conception.

La seconde étape vise à l'analyse du couple homme-machine par l'analyse des tâches de l'opérateur et des éléments techniques de la machine. Cette vision multiple (ergonomique et technique) devant permettre une connaissance très importante du travail effectué par ce couple dans des conditions réelles d'exploitation. Au delà des résultats mis en évidence dans ce

mémoire, nous souhaitions pouvoir démontrer tout l'intérêt d'une démarche couplant l'aspect ergonomique à l'aspect technique. Trop souvent ces deux domaines s'ignorent alors qu'ils ont beaucoup à partager en vue de l'amélioration des conditions de travail des opérateurs sur machines.

La démarche que nous avons mise en œuvre pour permettre l'intégration des aspects sécuritaires à la conception, par l'analyse de la conduite des machines en conditions réelles d'exploitation, permet d'identifier et d'analyser très précisément les défaillances du couple ainsi que leurs causes et conséquences. Ce travail permet de situer et de positionner précisément l'opérateur au travers des actions qu'il effectue dans la conduite de telles machines. Il permet de mettre en évidence le rôle prépondérant qu'il a dans l'utilisation effective de ces machines. La nécessité de l'opérateur, intervenant dans la conduite de telles machines tant en phase de réglage qu'en phase d'usinage proprement dit, n'a pu être mise en évidence qu'au travers de l'analyse ergonomique et fonctionnelle effectuée dans des conditions réelles d'exploitation.

Cette analyse comporte nécessairement de nombreuses limites liées aux aléas du travail visualisé et aux limites liées à l'entreprise analysée. Pourtant, à partir de cette analyse, il est possible d'extrapoler un certain nombre de résultats à d'autres situations d'exploitation, en tenant compte de la variabilité liée à la situation. Ainsi, il est possible d'envisager transposer, avec toute la prudence liée à une telle démarche d'extrapolation, les résultats que nous avançons dans ce mémoire, à d'autres machines à bois semi-automatisées (défonceuses, perceuses multi-broches, centres d'usinage) et à d'autres situations de travail.

La seconde partie de l'analyse du travail sur défonceuse a débouché sur une modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle. Cette modélisation nous a directement servi à approfondir la connaissance des interactions entre l'homme et la machine et plus particulièrement à l'acteur fonctionnel lors de l'expérience de conception que nous avons menée. Par la mise en place fonctionnelle des éléments, des actions de l'opérateur et des interactions qu'ils supportent, la modélisation a permis à l'acteur fonctionnel d'acquérir très rapidement une connaissance fonctionnelle et dysfonctionnelle précise du couple homme-machine. Cette connaissance lui aura servi au cours de l'expérience dans l'élaboration des fonctions régissant le système de captage dans son intégration sur la machine d'étude.

Mais au delà de cet intérêt immédiat pour notre travail, cette modélisation peut être le support à diverses analyses de sûreté de fonctionnement. Etant donné que chaque élément de la machine et chaque action de l'opérateur sont modélisés tant fonctionnellement que par les différentes défaillances possibles de l'un ou de l'autre, il serait possible, simplement, d'effectuer diverses analyses mettant en évidence les causes et les conséquences des multiples défaillances identifiées, ainsi que des analyses de fiabilité quantifiant certains indicateurs tant de fiabilité que de disponibilité, de maintenance, ou de diagnostic.

Il est également possible d'imaginer l'extrapolation de cette modélisation à d'autres couples homme-machine et à d'autres situations de travail. Non que cette modélisation effectuée soit une modélisation universelle, mais moyennant quelques aménagements, il est possible d'obtenir une modélisation particulière du couple homme-machine en fonction de la machine étudiée, des éléments qui la composent, ainsi que des conditions de travail, du processus d'usinage employé, ... changeant selon la machine et les conditions de travail rencontrées. Il serait alors possible de travailler à l'amélioration de la sécurité de ces machines par la prise en compte des données de fiabilité liées à chacun des éléments de la machine.

La modélisation que nous avons effectuée porte sur une machine particulière de l'industrie du bois. Nous avons modélisé une machine faisant appel à un certain nombre d'éléments techniques spécifiques à l'industrie visée et une situation de travail de type

manufacturière monoposte. Le maintien des pièces par dépression, le rapport très faible entre les temps unitaires d'usinage et les temps de préparation, l'aspect exposition de l'opérateur aux poussières de bois, ainsi que les habitudes de travail mises en évidence par l'analyse terrain, sont autant de limites à une extrapolation de la modélisation. Cependant, les actions de l'opérateur dans la conduite des machines ayant été modélisées comme des éléments génériques, peuvent facilement être extrapolées à une situation différente de travail, avec une machine semi-automatisées de même type architectural, non seulement du secteur bois, mais également de la mécanique (centre d'usinage notamment) faisant appel à des éléments techniques disposés de façon semblables et nécessitant des actions de l'opérateur de même types que celles modélisées.

La troisième étape de la démarche d'intégration que nous proposons porte sur l'intégration des aspects sécuritaires à la conception. Cette intégration, comme nous l'avons vue, ne peut s'effectuer simplement dans un processus de conception traditionnel. Il faut alors se tourner vers des démarches de conception basées sur l'ingénierie simultanée. Cette approche, par les principes qui la régissent, permet l'intégration de métiers non systématiquement intégrés dans le processus de conception. L'expérience que nous avons menée après avoir identifié un modèle de conception distribuée, par le fait qu'elle a fait intervenir huit acteurs différents durant une période importante, démontre l'applicabilité d'un tel modèle de conception dans un cadre quasi industriel. Par la distribution, la prise en commun des décisions, l'auto-organisation, le déroulement de l'expérience, nous avons pu démontrer expérimentalement l'intégration des différents acteurs et leur implication dans le processus de conception d'un nouveau système de captage. Cette expérience a pu démontrer l'intégration des acteurs garants de la sécurité, mais également l'application des exigences issues de cette intégration, par la mise en évidence des interventions qu'ils ont effectuées et également par les résultats qu'ils ont induits.

Notre expérience apporte un réel plus par rapport aux autres expérience menées auparavant selon le principe du MCD. En effet, de par la limitation dans leur déroulement (quelques heures), le nombre d'acteurs (regroupés dans trois modules), le support des communications, les autres expériences pouvaient être assimilées à des "expériences de laboratoire". En cela, nous avons franchi un pas vers "l'industrialisation" d'une telle approche, en intégrant de nouveaux acteurs et en étendant notre expérience à une durée de plus de cinq cents heures. Il faudrait encore tester cette démarche au travers d'une expérience de conception non limitée par le support écrit comme seul moyen de communication entre acteurs.

Une des limitations que nous avons pu mettre en avant est liée à la multitude de points de vues métiers intégrés dans notre expérience. Cette intégration se traduit nécessairement par des différences dans le langage utilisé par chacun des acteurs. Ce langage est propre à chaque métier, à chaque acteur, et nécessite une traduction pour qu'une compréhension puisse exister. Cette traduction est parfois lourde en temps, en effort, parfois impossible sans faire appel à un support de communication différent : oral, visuel (représentation 2D, 3D, prototypage rapide, ...), schématique, ... Par une non limitation des communications au seul support écrit, le modèle de conception distribuée verrait certainement son intérêt encore grandir. Cela supposerait certainement des moyens informatiques plus importants pouvant supporter l'ensemble des communications entre les acteurs et gérer les différents objets intermédiaires nécessaires à la conception.

De même, il serait bon d'analyser plus finement les échanges communicationnels entre les acteurs afin de mieux comprendre encore le processus de communications qui régit l'ensemble de l'expérience. Une telle analyse permettrait de mieux préciser les données échangées, éventuellement de mettre en évidence des étapes dans le processus (biaisées dans notre cas par le support écrit comme seul moyen de communiquer), ainsi que l'évolution de certains objets intermédiaires clés de tout processus de conception.

Il serait également intéressant de quantifier plus précisément les apports d'une telle démarche de conception par rapport aux méthodes traditionnellement séquentielles. Certes notre expérience s'est très bien déroulée, le système développé remplit complètement les objectifs fixés, sa mise en place sur la machine ainsi que les tests se sont déroulés dans les meilleures conditions, limitant le temps d'adaptation au minimum, mais qu'en aurait-il été dans un processus de conception de type séquentiel ? Qu'en aurait-il été de la solution développée ? L'amélioration apportée aurait-elle été aussi importante ? ... Tant de questions auxquelles il nous est difficile de répondre dans l'absolu. Pourtant nous souhaiterions pouvoir préciser que cette expérience, par l'intégration effective des différents acteurs, tant "sécuritaires" que "non-sécuritaires", a permis d'aboutir à un système de captage performant en terme de solution employée et d'efficacité évaluée. Que ce résultat soit le résultat de l'application du MCD et de l'intégration d'acteurs multi points de vue (dont sécuritaires), nous n'en doutons point. Il nous est difficile par contre de savoir si le même résultat aurait pu être obtenu par une démarche séquentielle de conception. Pour cela il faudrait pouvoir, avec une importante relativité, mener deux expériences en parallèle, ayant le même objectif, les mêmes moyens en termes de personnes et de temps à consacrer à l'expérience, et de comparer le déroulement de ces deux expériences, les résultats obtenus au final, l'intégration des différents acteurs et de leur métier respectif.

Le dernier résultat que nous avons présenté est un nouveau système de captage des particules de bois émises lors de l'usinage sur une défonceuse à commande numérique. Ce résultat de l'expérience MCD étendu à huit acteurs, traduction de l'intégration des acteurs "sécuritaires" dans la conception, démontre qu'il est possible, par une prise en compte adéquate des caractéristiques d'émission des particules, de disposer d'un système de captage efficace même si couplé avec un système de ventilation à faible débit d'air. Ce résultat pouvant intéresser directement les constructeurs de machines par la déclinaison d'une voie de solution efficace, les utilisateurs dans l'utilisation à moindre coût de leurs machines à des conditions acceptables, mais aussi les préventeurs dans leur quête constante d'exemples pour illustrer leur démarche auprès des industriels.

L'analyse de l'émission des particules est indispensable à tout développement de système de captage, de même que l'analyse ergonomique terrain est un préalable à l'intégration de la sécurité à la conception d'un système de production nécessitant l'intervention d'opérateur dans sa conduite.

La première voie possible de valorisation du système de captage développé est l'exploitation du principe de captage par orientation de la buse de captage face à la direction de projection des particules. Ce principe découlant de l'identification des variations de l'émission des particules au cours d'un usinage. Cette valorisation par les caractéristiques d'émission va se concrétiser par l'édition d'un guide sur l'amélioration des systèmes de captage de l'ensemble des machines à bois existantes. Ce guide, élaboré par un groupe de travail

regroupant des spécialistes de la ventilation des CRAM et de l'INRS, a pour cible tant les constructeurs que les utilisateurs de telles machines.

La seconde voie est une valorisation directe du prototype développé, pouvant intéresser les constructeurs de machines du même type que celle avec laquelle nous avons travaillé. Elle s'effectuera par une sensibilisation auprès des constructeurs de machines à bois semi-automatisées, afin qu'ils puissent mettre en œuvre cette voie de solution en l'intégrant dans leur développement de futures machines. Le prototype développé démontre techniquement la faisabilité d'une telle solution pour l'amélioration des systèmes de captage des particules sur les défonceuses à commande numérique, même s'il mérite des améliorations à plusieurs niveaux. Ces améliorations pourront être possibles par la prise en compte au plus tôt dans le cycle de développement d'une nouvelle machine. Ainsi, les concepteurs auront une part de manœuvre plus importante que celle que nous avons eue dans notre expérience (limitée par l'environnement existant avec la machine d'étude à notre disposition).

Les éléments que nous avons identifiés et mis en œuvre pour constituer une approche pragmatique pour l'intégration des aspects sécuritaires à la conception de machines, ont été identifiés dans le cadre d'une étude sur les machines à bois semi-automatisées. Cette étude trouve tout son intérêt dans un tel secteur industriel. Cette démarche, par les quatre phases identifiées, peut être intéressante pour d'autres secteurs industriels tels que celui de la mécanique. Les situations de travail étant comparables à celles que nous avons pu rencontrer. En effet, cette industrie, de type manufacturière comme l'industrie du bois, possède de nombreuses machines similaires aux machines à bois semi-automatisées, tant d'un point de vue architectural que technologique ou dans les modes opératoires. Il est possible alors de penser que les principes que nous proposons peuvent s'adapter simplement à l'industrie de la mécanique, de nombreux éléments de résultats pouvant s'extrapoler vers de telles situations de travail. Cette action a déjà débuté au travers d'un projet Prosper encadré par l'INRS visant à l'intégration de la sécurité dans le conception de machines d'imprimerie s'inscrivant dans des lignes automatisées de production.

Nous espérons enfin que les industriels du secteur bois (et d'autres secteurs) s'accaparent les résultats de notre travail pour la conception de leur futures machines et ainsi que notre travail contribue à l'amélioration des conditions de travail des opérateurs sur les machines à bois semi-automatisées dans un futur plus ou moins proche.





---

# BIBLIOGRAPHIE

---

**BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE** ----- **144**

**BIBLIOGRAPHIE NORMATIVE** ----- **153**

## ***BIBLIOGRAPHIE GENERALE***

---

[812 CEI 85]

"*Technique d'analyse de la fiabilité des systèmes. Procédure d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE)*", Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale, Genève, 1985, 41 p.

[Batt\_96]

C. BATT, "*Modélisation fonctionnelle des systèmes de production : tentative d'intégration du facteur humain*", DESS Sûreté des systèmes industriels, ISI INRS, Nancy, 1996, 47 p.

[Béranger\_87]

P. BERANGER, "*Les nouvelles règles de la production*", Editions DUNOD, Paris, 1987, 212 p.

[Blaise\_96]

J.C. BLAISE, "*Outils et méthodes permettant de révéler, représenter et vérifier la sémantique d'un discours*", Centre de Recherche en Automatique de Nancy, INRS, Université Henri Poincaré Nancy I, DEA en production automatisée, Nancy, juil-96, 32 p.

[Blanco\_98]

E. BLANCO, "*L'émergence du produit dans la conception distribuée. Vers de nouveaux modes de rationalisation dans la conception de systèmes mécaniques*", Institut National Polytechnique de Grenoble, Mémoire de Thèse en Génie Industriel mention Génie Mécanique, Grenoble, 1998, 200 p.

[Bonnevie\_98]

L. BONNEVIE, "*Conception Ergonomique d'Outils à Main : Modèles, outils et propositions d'actions pour l'intégration de l'ergonomie au processus de conception*", Rapport de stage INRS; UTC, Nancy, juil-98, 87 p.

**[Brissaud\_98]**

D. BRISSAUD, O. GARRO, *"Conception distribuée, émergence"*, Conception de produits mécaniques, méthodes, modèles et outils, Editions HERMES, Paris, 1995, pp. 105-114, ISBN 2-86601-694-7

**[Bucarelli\_94]**

L. BUCARELLI, *"Designing engineers"*, MIT Press, 1994,

**[Caelen\_95]**

J. CAELEN, K. ZREIK, *"Le communicationnel pour concevoir"*, Europa Productions, 1995, 330 p., ISBN 2-909285-04-9.

**[Cerezuela\_96]**

C. CEREUZUELA, *"Contribution à l'élaboration de méthodes et d'outils d'aide à la conception et la fabrication dans une perspective d'ingénierie concurrente : le cas du câblage électrique"*, Université d'Aix-Marseille III, Doctorat en productique et informatique, oct-96, 176 p.

**[Ciccotelli\_97]**

J. CICCOTELLI, *"Vers des machines et systèmes plus sûrs. Quelques perspectives de recherche et de développement"*, Cahier de Notes Documentaires. Hygiène et Sécurité au travail, 1er Trim. 1997, pp. 189-200

**[Circulaire\_91-14]**

*"Circulaire n 91-14 du 5 juillet 1991"*, Textes officiels, classification TE 1 161, n 358, Ministère du travail, de l'emploi et de la formation professionnelle, 1991, 1 p.

**[Daniellou\_89]**

F. DANIELLOU, *"Méthodes d'introduction de l'ergonomie dans la conception des postes de travail"*, L'ergonomie de conception De Keyser V. et Van Daele A, Editions De Boeck University, 1989, pp. 81-89

**[Daviet\_98]**

B. DAVIET, *"Le plan marché-produit dans un contexte de co-conception avec les équipementiers et les constructeurs automobiles"*, L'ingénierie simultanée : Une démarche compétitive et collective pour l'entreprise dans ses dimensions stratégiques, organisationnelles et opérationnelles, PRÉCI : Pôle Régional de Conception et d'Innovation Belfort 11 et 12 Mars 1998,

**[Demor\_96]**

S. DEMOR, *"Les risques et leur gestion au cours de la récupération de dysfonctionnements dans un système automatisé de production séquentielle"*, Mémoire de DEA, CNAM, Paris, oct-96, 70 p.

**[Demor\_97]**

S. DEMOR, *"Etude ergonomique préliminaire des activités de conduite des défonceuses dans une ébénisterie"*, INRS, Rapport interne, nov-97, 25 p.

**[Dir\_89/392/CEE]**

*"Directive 89/392/CEE : Directive Européenne du 14 juin 1989 concernant le rapprochement des législations des Etats membres relatives aux machines"*, J.O.C.E n L 183 du 29 juin 1989, , pp. 9-32

**[Dir\_91/368/CEE]**

*"Directive 91/368/CEE : Directive Européenne du 20 juin 1991 modifiant la directive 89/392/CEE concernant le rapprochement des législations des Etats membres relatives aux machines"*, J.O.C.E n L 198 du 22 juillet 1991, , pp. 16-32

**[Dir\_93/44/CEE]**

*"Directive 93/44/CEE : Directive Européenne du 14 juin 1993 modifiant la directive 89/392/CEE concernant le rapprochement des législations des Etats membres relatives aux machines"*, J.O.C.E n L 175 du 19 juillet 1993, , pp. 12-20

**[Dir\_97094 CO40]**

*"L'ingénierie centrée sur l'homme"*, Ministère de l'Industrie, de la Poste et des Télécommunications. Direction générale des stratégies industrielles. Réf : 97094 CO40, févr-97, 138 p., ISSN 0767-5380.

**[Dir\_98/37/CE]**

*"Directive 98/37/CE : Directive Européenne du parlement européen et du conseil du 22 juin 1998 concernant le rapprochement des législations des Etats membres relatives aux machines"*, J.O.C.E n L 207 du 23 juillet 1998, , pp. 1-46

**[EMB\_93]**

*"MDF Guide d'utilisation. Fabrication, disponibilité et mise en œuvre du panneau de fibres de moyenne densité dans l'ameublement, l'aménagement intérieur et la construction"*, Euro MDF Board (EMB) et Centre Technique du Bois et Ameublement (CTBA), Paris, nov-93, 153 p. ISBN 2-85684-016-7

**[Evbuomwan\_94]**

N.F.O. EVBUOWAN, S. SIVALOGANATHAN, A. JEBB, *"A state of the art report on Concurrent Engineering"*, Concurrent Engineering : Research and Applications, London, 1994, pp. 35-44,

**[Fadier\_92]**

E. FADIER, *"Les pratiques françaises en matière de sûreté de fonctionnement"*, Cindynics 92, Institut européen de cindyniques, Cannes, 1992, pp. 489-496

**[Fadier\_94]**

E. FADIER, *"MAFERGO : Méthode d'Analyse de Fiabilité et ERGonomie Opérationnelle"*, Sécurité et Médecine du travail n 101, AFTIM, Paris, 1994, pp. 40-46

**[Fadier\_96]**

E. FADIER, M. NEBOIT, "*Proposition d'une méthode d'analyse de la fiabilité opérationnelle intégrant l'analyse ergonomique*", 10ème Colloque de Fiabilité et Maintenabilité, Editions SEE Saint-Malo, oct-96, pp. 336-345,

**[Feschotte\_98]**

D. FESCHOTTE, "*Présentation : architecture du colloque*", L'ingénierie simultanée : Une démarche compétitive et collective pour l'entreprise dans ses dimensions stratégiques, organisationnelles et opérationnelles, PRéCI : Pôle Régional de Conception et d'Innovation Belfort 11 et 12 Mars 1998,

**[Foulard\_94]**

C. FOULARD, "*La modélisation en entreprise. CIM-OSA et ingénierie simultanée*", Editions HERMES, Paris, 1994, 215 p.

**[Garro\_95]**

O. GARRO, I. SALAU, P. MARTIN, "*Distributed Design Theory and Methodology*", Concurrent Engineering Revue Vol. 3 N 1, 1995, pp. 43-54

**[Gauthier\_95]**

F. GAUTHIER, "*Les méthodes de conception sécuritaire*", Université de Sherbrooke (Québec), 252 p.

**[Hatchuel\_92]**

A. HATCHUEL, J.C. SARDAS, "*Les grandes transitions contemporaines des systèmes de production. Une démarche typologique*", Terssac G., Dubois P. "Les nouvelles rationalisations de la production", Collection Automation et Production CEPADUES Editions, Toulouse, 1992,

**[Hazard\_96]**

C. HAZARD, J.P. BARETTE, J. MAYER, "*Mémotech : Bois et matériaux associés*", Collection A. Capliez, Editions CASTEILLA, Paris, 1996, 455 p. ISBN 2-7135-1645-5

**[Heye\_94]**

P. HEYE, "*Risques professionnels, mesures de prévention, amélioration des conditions de travail sur les centres d'usinage grandes capacités travaillant en petites et moyennes séries*", Mémoire technique, Caisse Régionale d'Assurance Maladie région Nord-Picardie, Lille, oct-94, 56 p.

**[Idelmerfaa\_96]**

Z. IDELMERFAA, E. RONDEAU, J. RICHARD, "*Communication and control modelling for collaborative engineering*", 2nd IEEE/ECLA/IFIP, International Conference on Architectures and Design Methods for Balanced Automation Systems, BASYS'96, Chapman and Hall Editions, Lisbonne, juin-96, pp. 425-432

**[Iribarne\_96]**

A. IRIBARNE, "*Technologie, organisation, performance*", La performance économique en entreprise, Editions HERMES, Paris, 1996, pp. 55-69, ISBN 2-86601-566-5

**[ISdF\_94]**

E. FADIER, et al., "*L'état de l'art dans le domaine de la fiabilité humaine*", Ouvrage réalisé par l'Institut de Sécurité de Fonctionnement, OCTARES Editions, Toulouse, 1995, 446 p. ISBN 2-906769-14-2

**[Jeantet\_98]**

A. JEANTET, J.F. BOUJUT, "*Approche socio-technique*", Conception de produits mécaniques, méthodes, modèles et outils, Editions HERMES, Paris, 1995, pp. 115-138, ISBN 2-86601-694-7

**[Jouffroy\_98a]**

D. JOUFFROY, J. CICCOTELLI, P. MARTIN, "*Contribution of a distributed design method to the safety of numerically controlled woodworking machines*", IMS. Europe 1998, First International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Lausanne, avr-98, pp. 449-458

**[Jouffroy\_98b]**

D. JOUFFROY, S. DEMOR, J. CICCOTELLI, P. MARTIN, "*An approach to integrate safety at the design stage of numerically controlled woodworking machines*", IDMMME'98, Second International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, UTC Compiègne, mai-98, pp. 1107-1114 ISBN 2-913087-03-5.

**[Kennedy\_62]**

KENNEDY, "*Psychology and system development*", Gagné et al., psychological principles in systems development, New-York, ,

**[Lacore\_93]**

J.P. LACORE, "*Le principe d'intégration de la sécurité et de la norme EN 292*", Sécurité des équipements de travail : Les nouvelles règles techniques européennes et leur transposition en droit français, CETIM Senlis, 14 et 15 déc-1993, pp. 85-97 ISBN 2-85400-291-1

**[Le Moigne\_94]**

J.L. LE MOIGNE, "*La théorie du système général. Théorie de la modélisation*", Presses Universitaires de France, juin-94, 338 p., ISBN 2-13-046515-3.

**[Lehner\_92]**

F. LEHNER, "*Anthropic production systems : the European response to advanced manufacturing and globalization*", Commission of the European communities, Luxembourg, 1992, 123 p. ISBN 92-826-3809-X

**[Leleu-Merviel\_97]**

S. LELEU-MERVIEL, *"La conception en communication. Méthodologie qualité"*, Editions HERMES, Paris, 1997, 202 p. ISBN 2-86601-631-9

**[Leplat\_90]**

LEPLAT, DE TERSSAC, *"Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes"*, Editions OCTARES, Marseille, 1990, 385 p.

**[Lhoste\_94]**

P. LHOSTE, *"Contribution au génie automatique : concepts, modèles, méthodes et outils"*, Université Henri Poincaré Nancy I, Mémoire d'Habilitation à diriger des recherches, Nancy, févr-94, 147 p.

**[Lhote\_93]**

F. LHOTE, M. DULMET, J. ORTIZ-HERNANDEZ, *"Faiblesse et paradoxes de l'approche technocentrée des systèmes de production : vers un recentrage de la place de l'intelligence humaine au sein des systèmes fortement automatisés"*, Actes Le dossier des technologies. Le entretiens de la technologie. Atelier 17 : Productique Intégrée, Nantes, mai-93, pp. 15-29

**[LIS\_96]**

J.C. LAPRIE, et al., *"Guide de la sûreté de fonctionnement"*, LIS :Laboratoire d'Ingénierie de la Sûreté de fonctionnement, CEPADUES Editions, Toulouse, janv-96, 369 p., ISBN 2-85428-341-4.

**[Martin\_89]**

P. MARTIN, *"La productique et les industries du bois"*, Collection Technologies de pointe, Editions HERMES, Paris, 1995, 62 p. ISBN 2-86601-192-9

**[Mer\_94]**

S. MER, *Processus de conception de produit :Expérimentation du concept "d'objet intermédiaire" dans la conception* Mémoire de DEA en génie industriel, Grenoble, 1994,

**[Mer\_95]**

S. MER, S. TICHKIEWITCH, A. JEANTET, *"Les objets intermédiaires de la conception : modélisation et communication"*, Le communicationnel pour concevoir, Europa Productions, Paris, 1995, pp.21-42, ISBN 2-909285-04-9.

**[Merlaud\_92]**

C. MERLAUD, et al., *"La sûreté des machines et installations automatisées"*, APAVE, Télémécanique, SADAVE éditeur, Paris, 1992, 333 p. ISBN 2-906319-24-4

**[Morel\_88]**

G. MOREL, M. ROESCH, M. VERON, "*Génie productique. Génie X. Quelle automatique dans les industries manufacturières*", AFCET Congrès automatique Grenoble, oct-88, pp. 319-330

**[Neboit\_90]**

M. NEBOIT, H. GUILLERMAIN, E. FADIER, "*De l'analyse du système à l'analyse de l'interaction opérateur x tâche : proposition méthodologique*", Leplat, de Terssac "Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes", Editions OCTARES, Marseille, 1990, 385 p.

**[Neboit\_93]**

M. NEBOIT, E. FADIER, C. POYET "*Analyse systémique et analyse ergonomique. Application à la reconception d'une cellule robotisée d'usinage*", Les notes scientifiques et techniques de l'INRS INRS juil-93, 200 p. ISSN 0397-4529

**[Ortiz-Hernandez\_95]**

J. ORTIZ-HERNANDEZ, "*Les systèmes de production automatisés : une approche socio-technique*", Université de Franche-Comté, Doctorat en productique et informatique, nov-95, 117 p.

**[Part\_98]**

J. M. PART, "*Prototypage rapide et conception de produits dans un contexte d'ingénierie simultanée*", L'ingénierie simultanée : Une démarche compétitive et collective pour l'entreprise dans ses dimensions stratégiques, organisationnelles et opérationnelles, PRÉCI : Pôle Régional de Conception et d'Innovation Belfort, 11 et 12 Mars 1998,

**[Poyet\_91]**

C. POYET, J. LEPLAT, "*Mixed technologies and management of reliability*", New technology, Safety and Systems reliability, B. Wilpert and Th. Ovale Eds, Chichester, ,

**[PRIMECA\_98]**

"*Conception de produits mécaniques, méthodes, modèles et outils*", Editions HERMES, Paris, 1998, 560 p. ISBN 2-86601-694-7

**[Ris\_98]**

G. RIS, "*Etude de cas : le jeu des CMAOISTES*", Conception de produits mécaniques, méthodes, modèles et outils, Editions HERMES, Paris, 1995, pp. 537-550, ISBN 2-86601-694-7

**[Sagot\_98]**

J.C. SAGOT, S. GOMES, P. ZWOLINSKI, "*Innover en intégrant l'ergonomie dans le processus de conception de produits*", Actes de la journées de sensibilisation à l'ergonomie et la prévention dans le processus d'innovation, Institut National de Recherche et de Sécurité, Institut Polytechnique de Sévenans, Laboratoire d'Ingénierie de Produits, Nancy, juin-98, pp. 31-36

**[Salau\_95]**

I. SALAU, "*La conception distribuée : théorie et méthodologie*", Université Henri Poincaré Nancy I, Doctorat en production automatisée, mars-95, 128 p.

**[Seck\_96]**

A. SECK, "*La fiabilité industrielle a ses outils informatiques*", MESURES n 686 Paris, juin-96, pp. 75-78,

**[Sohlenius\_92]**

G. SOHLENIUS, "*Concurrent Engineering*", Annales du CIRP 41, juin-05, 11 p.

**[Sourisse\_96]**

C. SOURISSE, L. BOUDILLON, "*La sécurité des machines automatisées. Tome 1 : Notions fondamentales. Réglementation. Normes. Techniques de prévention*", Collection Technique. Groupe Schneider, juil-96, 236 p., ISBN 2-907314-29-7

**[Statistiques\_97]**

"*Statistiques financières et technologiques des accidents du travail : années 1993-1994-1995*", Caisse Nationale de l'Assurance Maladie des Travailleurs Salariés, 1997, 405 p.

**[Tichkiewitch\_93]**

S. TICHKIEWITCH et al., "*Ingénierie simultanée dans la conception de produits*", Compte rendu des universités d'été du pôle productique Rhône-Alpes, 1993,

**[Tomiyama\_97]**

T. TOMIYAMA, "*A note on research directions of design studies*", Congrès international ICED Tampere, 1997, pp. 29

**[Tourneur\_96]**

J.C. TOURNEUR, "*Management des systèmes : la FMDS à la portée de tous ?*", ENJEUX n 168 Paris, oct-96, pp. 53-56,

**[Vadcard\_96]**

P. VADCARD, "*Aide à la programmation de l'utilisation d'outils en conception de produits*", Ecole nationale supérieure des arts et métiers, Paris, Doctorat en génie industriel, nov-96, 167 p.

[Vallet\_98]

G. VALLET, "*Démarche de mise en œuvre d'une organisation projet*", L'ingénierie simultanée : Une démarche compétitive et collective pour l'entreprise dans ses dimensions stratégiques, organisationnelles et opérationnelles, PRéCI : Pôle Régional de Conception et d'Innovation Belfort 11 et 12 Mars 1998,

[Van Gheluwe\_93]

VAN GHELUWE, "*La directive machines*", Sécurité des équipements de travail : Les nouvelles règles techniques européennes et leur transposition en droit français, CETIM Senlis 14 et 15 déc-1993, pp.5-13 ISBN 2-85400-291-1

[Van Handenhoven\_98]

E. VAN HANDENHOVEN, "*La satisfaction du client consommateur dans une organisation en ingénierie simultanée*", L'ingénierie simultanée : Une démarche compétitive et collective pour l'entreprise dans ses dimensions stratégiques, organisationnelles et opérationnelles, PRéCI : Pôle Régional de Conception et d'Innovation Belfort 11 et 12 Mars 1998,

[Villemeur\_88]

A. VILLEMEUR, "*Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Fiabilité - Facteurs humains. Information*", Collection de l'a direction des études et recherches d'électricité de France, Editions EYROLLES, Paris, 1988, 795 p.

[Wobbe\_92]

W. WOBBE, "*What are anthropocentric production systems ? Why are they a strategic issue for Europe*", Commission of the european communities, Luxembourg, 1992, 83 p. ISBN 92-826-3810-3

[Zwingelstein\_95]

G. ZWINGELSTEIN, "*Diagnostic des défaillances. Théorie et pratique pour les systèmes industriels* Traité des Nouvelles Technologies. Série Diagnostic et Maintenance, Editions HERMES, Paris, 1995, 601 p. ISBN 2-86601-463-4

## **BIBLIOGRAPHIE NORMATIVE**

---

Sont regroupées dans cette bibliographies les différentes normes citées dans le mémoire

[EN 1037\_95]

*"Sécurité des machines. Prévention de la mise en marche intempestive"*, AFNOR, Paris, oct-95, 16 p.

[NF EN 1050\_97]

*"Sécurité des machines. Principes pour l'appréciation du risque"*, AFNOR, Paris, janv-97, 28 p.

[NF EN 1088\_96]

*"Sécurité des machines. Dispositifs de verouillage associés à des protecteurs. Principes de conception et de choix"*, AFNOR, Paris, juin-96, 39 p.

[NF EN 1093-3\_96]

*"Sécurité des machines. Evaluation de l'émission de substances dangereuses véhiculées par l'air. Partie 3 : Débit d'émission d'un polluant donné. Méthode sur banc d'essai utilisant le polluant réel"*, AFNOR, Paris, juin-96, 7 p.

[NF EN 1093-4\_96]

*"Sécurité des machines. Evaluation de l'émission de substances dangereuses véhiculées par l'air. Partie 4 : Efficacité de captage d'un système d'aspiration. Méthode par traçage"*, AFNOR, Paris, juin-96, 12 p.

[NF EN 1760-1\_97]

*"Sécurité des machines. Dispositifs de protection sensibles à la pression. Partie 1 : Principes généraux de conception et d'essai des tapis et planchers sensibles à la pression"*, AFNOR, Paris, oct-97, 48 p.

[NF EN 292-1\_91]

"*Sécurité des machines. Notions fondamentales. Principes généraux de conception. Partie 1 : Terminologie de base, méthodologie*", AFNOR, Paris, déc-91, 33 p.

[NF EN 292-2/A1\_95]

"*Sécurité des machines. Notions fondamentales. Principes généraux de conception. Partie 2 : Principes et spécifications techniques*", AFNOR, Paris, juin-95, 71 p.

[NF EN 294\_92]

"*Sécurité des machines. Distances de sécurité pour empêcher l'atteinte des zones dangereuses par les membres supérieurs*", AFNOR, Paris, sept-92, 13 p.

[NF EN 349\_93]

"*Sécurité des machines. Ecartements minimaux pour prévenir les risques d'écrasement du corps humain*", AFNOR, Paris, sept-93, 7 p.

[NF EN 418\_93]

"*Sécurité des machines. Equipement d'arrêt d'urgence, aspects fonctionnels. Principes de conception*", AFNOR, Paris, févr-93, 10 p.

[NF EN 481\_93]

"*Atmosphère des lieux de travail. Définition des fractions de taille pour le mesurage des particules en suspension dans l'air*", AFNOR, Paris, nov-93, 11 p.

[NF EN 547\_97]

"*Sécurité des machines. Mesures du corps humain*", AFNOR, Paris, févr-97, 52 p.

[NF EN 574\_97]

"*Sécurité des machines. Dispositifs de commande bimanuelle. Aspects fonctionnels. Principes de conception*", AFNOR, Paris, avr-97, 34 p.

[NF EN 60204-1\_93]

"*Sécurité des machines. Equipement électrique des machines. Partie 1 : Règles générales*", AFNOR, Paris, févr-93, 105 p.

[NF EN 614-1\_95]

"*Sécurité des machines. Principes ergonomiques de conception. Partie 1 : Terminologie et principes généraux*", AFNOR, Paris, avr-95, 19 p.

[NF EN 61496-1\_98]

"*Sécurité des machines. Equipements de protection électro-sensible. Partie 1 : Prescriptions générales et essais*", AFNOR, Paris, avr-98, 65 p.

[NF EN 61496-2\_98]

"*Sécurité des machines. Equipements de protection électro-sensible. Partie 2 : Prescriptions particulières pour les équipements utilisant des dispositifs protecteurs opto-électroniques actifs*", AFNOR, Paris, avr-98, 65 p.

[NF EN 626-1\_94]

"*Sécurité des machines. Réduction des risques pour la santé résultant de substances dangereuses émises par des machines. Partie 1 : Principes et spécifications à l'intention des constructeurs de machines*", AFNOR, Paris, déc-94, 12 p.

[NF EN 626-2\_96]

"*Sécurité des machines. Réduction des risques pour la santé résultant de substances dangereuses émises par des machines. Partie 2 : Méthodologie menant à des procédures de vérification*", AFNOR, Paris, sept-96, 9 p.

[NF EN 811\_96]

"*Sécurité des machines. Distances de sécurité pour empêcher l'atteinte des zones dangereuses par les membres inférieurs*", AFNOR, Paris, déc-96, 11 p.

[NF EN 953\_97]

"*Sécurité des machines. Protecteurs. Prescriptions générales pour la conception et la construction des protecteurs fixes et mobiles*", AFNOR, Paris, déc-97, 30 p.

[NF EN 954-1\_97]

"*Sécurité des machines. Parties des systèmes de commande relatives à la sécurité. Partie 1 : Principes généraux de conception*", AFNOR, Paris, févr-97, 38 p.

[pr EN 1218-2\_97]

"*Sécurité des machines à bois. Tenonneuses. Partie 2 : Machines à tenonner et/ou à profiler doubles à chaînes*", AFNOR, Paris, févr-97, 41 p.

[pr EN 1218-4\_97]

"*Sécurité des machines pour le travail du bois. Tenonneuses. Partie 4 : Machines à plaquer sur chant à chaîne(s)*", AFNOR, Paris, mars-97, 42 p.

[pr EN 1760-2\_96]

"*Sécurité des machines. Dispositifs de protection sensibles à la pression. Partie 2 : Principes généraux de conception et d'essai des bords et barres sensibles*", AFNOR, Paris, nov-96, 70 p.

[pr EN 1870-2\_95]

"*Sécurité des machines pour le travail du bois. Machines à scies circulaires. Partie 2 : Scies circulaires à panneaux horizontales à presseur et scies à panneaux verticales*", AFNOR, Paris, mars-95, 67 p.

[pr EN 847-1\_94]

"Outils pour le travail du bois. Exigences de sécurité. Partie 1 : Outils de fraisages, lames de scies circulaires", AFNOR, Paris, sept-94, 42 p.

[pr EN 999\_93]

"Sécurité des machines. Positionnement des dispositifs de protection en fonction des vitesses d'approche des parties du corps humain", AFNOR, Paris, janv-93, 25 p.

[pr EN ISO 13407\_97]

"Processus de conception centrés sur l'individu pour les systèmes interactifs", AFNOR, Paris, 1997, 39 p.

[pr NF EN 12415\_96]

"Machines-outils. Sécurité. Tours à commande numérique et centres de tournage de petites dimensions", AFNOR, Paris, mai-96, 48 p.

[pr NF EN 12417\_96]

"Machines-outils. Sécurité. Centres d'usinage", AFNOR, Paris, mai-96, 41 p.

[pr NF EN 1921\_95]

"Système d'automation industrielle. Sécurité des systèmes de fabrication intégrés. Prescriptions fondamentales", AFNOR, Paris, juil-95, 27 p.

[pr NF EN 848-3\_96]

"Sécurité des machines. Perceuses et défonceuses à Commande Numérique", AFNOR, Paris, mars-96, 49 p.

[pr NF ISO 10791-6\_96]

"Conditions d'essai pour centres d'usinage. Partie 6 : Précision des avances, vitesses et interpolations", AFNOR, Paris, juil-96, 13 p.

[pr NF ISO 230-2\_96]

"Code d'essai des machines-outils. Partie 2 : Détermination de la précision et de la répétabilité de positionnement des axes des machines-outils à commande numérique", AFNOR, Paris, mai-96, 21 p.

[pr NF ISO 230-4\_96]

"Code d'essai des machines-outils. Partie 4 : Essais de circularité des machines-outils à commande numérique", AFNOR, Paris, août-96, 12 p.

# ANNEXES

**ANNEXE SOFIA** ----- **158**

1. BLOCS FONCTIONNELS	159
2. FONCTIONS	160
3. ETATS	160
4. POLYNÔMES	162
5. RÉSEAU FONCTIONNEL	163
6. RÉSEAU DES ETATS	164
7. AMDEC	165
8. SAFETY	165
9. DIAGFIA	166
10. DIAGSYS	167

**ENCHAÎNEMENTS DES ACTIONS MODÉLISÉES** \_ **169**

**COMMUNICATIONS ENTRE ACTEURS** ----- **174**

**ANNEXE VENTILATION** ----- **180**

# ANNEXE SOFIA

SOFIA est un progiciel destiné aux ingénieurs devant maîtriser la complexité de certains systèmes faisant souvent appel à plusieurs technologies.

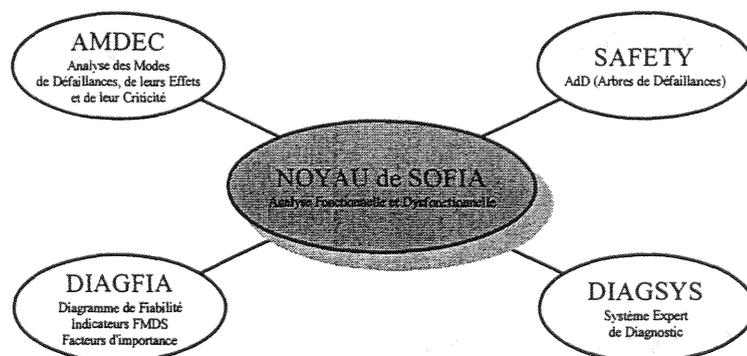
Il s'appuie sur la synthèse de différents langages et méthodes d'analyse fonctionnelle. A parti de l'acquisition de connaissances, il permet de simuler le comportement global d'un système en utilisant les principes de l'Intelligence Artificielle.

A partir de connaissances modélisées, il rend automatique :

- ~ l'analyse des modes de fonctionnement dégradés,
- ~ l'écriture des tableaux AMDEC, des AdD (Arbres de Défaillances) et des diagrammes de fiabilité,
- ~ l'analyse et l'évaluation des indicateurs FMDS.

Il s'agit d'un logiciel qui s'inscrit dans une démarche de l'amélioration de la qualité de fonctionnement, pour un système en conception ou pour un système existant. Logiciel avant outil de spécification et de définition, il mémorise et gère les données saisies par l'utilisateur.

Son principe de fonctionnement est d'articuler plusieurs modules autour d'un noyau constitué par la modélisation (Figure 1). Chaque application (AMDEC, AdD, ...) sont des modules qui nécessitent le noyau de SOFIA pour leur utilisation.



*Figure 1 : Noyau et modules de SOFIA.*

Nous allons voir dans un premier temps, les différents éléments constituant le noyau de SOFIA, avant de présenter rapidement les différents modules s'articulant autour de ce noyau.

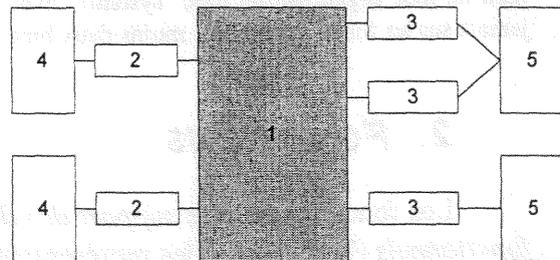
Nous allons décrire les différents éléments qui permettent de construire une modélisation sous SOFIA dans l'ordre suivant :

- ~ les blocs fonctionnels,
- ~ les fonctions,
- ~ les états de bloc fonctionnel et de fonction,
- ~ les polynômes des fonctions et des états.

## 1. BLOCS FONCTIONNELS

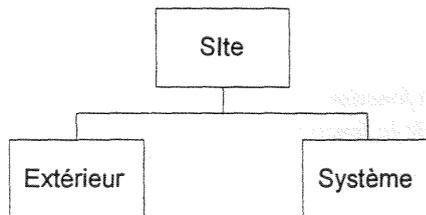
Il s'agit de l'entité de base de la modélisation sous SOFIA. Il est la *représentation fonctionnelle ou physique d'un élément du système modélisé*. Il est susceptible de recevoir ou de produire des fonctions (Figure 2).

- ① Bloc fonctionnel,
- ② Fonctions en entrée du bloc fonctionnel,
- ③ Fonctions en sortie du bloc fonctionnel,
- ④ Blocs fonctionnels origines des fonctions entrées,
- ⑤ Blocs fonctionnels destinations des fonctions sorties.



**Figure 2 : Bloc Fonctionnel**

Toute modélisation est basée sur 3 blocs : le bloc *système*, le bloc *extérieur*, fils tous deux d'un bloc *site* (Figure 3).



**Figure 3 : Modélisation de base de SOFIA.**

Les blocs sont structurés de façon arborescente. Ils sont reliés entre eux par des liens hiérarchiques selon le principe généalogique "père-fils" (un bloc peut contenir un ou plusieurs autre(s) bloc(s) mais ne peut être contenu que dans un seul) (Figure 4). Il est possible de visualiser cette décomposition hiérarchique dans sa totalité ou seulement une grappe de cette modélisation (cette grappe est définie par son bloc sommet qui peut être n'importe quel bloc de la décomposition globale). Cette arborescence de blocs fonctionnels est unique pour une modélisation donnée et constitue la charpente de cette modélisation.

Chaque bloc fonctionnel est identifié par un code et un nom.

- ① Bloc fonctionnel sommet (bloc site) contenant les blocs ②,
- ② Blocs fonctionnels (blocs système et extérieur) contenant les blocs ③,
- ③ Blocs fonctionnels feuilles ne contenant aucun autre bloc fonctionnel.

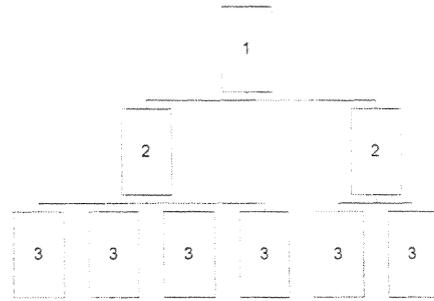


Figure 4 : Arborescence des blocs fonctionnels.

Remarque : Il faut savoir que le logiciel travaillera avec les fonctions dépendantes du bloc *système*, les fonctions liant un bloc dépendant du bloc "système" avec un ou plusieurs bloc(s) dépendant(s) du bloc "extérieur", mais jamais sur les fonctions liant au moins deux bloc "extérieurs" entre eux.

## 2. FONCTIONS

Les fonctions sont le *support des différents types d'interactions exercées entre les blocs fonctionnels* (Figure 5). Elles représentent des actions exprimées par rapport à leur finalité.

Elles peuvent être de nature informationnelle, électrique, électromagnétique, mécanique, ou représentent un flux de matière (air, liquide,...). Une fonction a pour origine un et un seul bloc fonctionnel mais peut avoir pour destination plusieurs blocs. Elle est identifiée, comme le bloc fonctionnel, par un code et un nom.

Les fonctions ne décrivent des interactions qu'entre blocs fonctionnels du même niveau hiérarchique. Les analyses s'effectuent donc de manière transversale sur ce seul niveau.

- ① Fonction,
- ② Bloc fonctionnel origine de la fonction,
- ③ Bloc fonctionnel destination de la fonction.

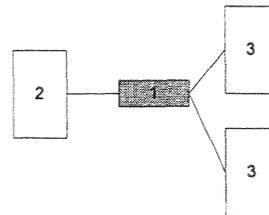


Figure 5 : Fonction.

## 3. ETATS

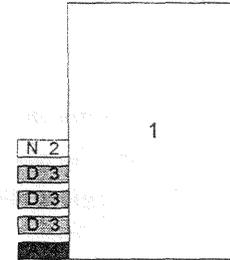
Un état est une *information qualitative associée à un bloc fonctionnel ou à une fonction*. Il peut prendre trois types de valeur :

- **Etat nominal** : il caractérise une situation de bon fonctionnement du bloc ou de la fonction,
- **Etat absent** : état correspondant à l'absence (la défaillance, la déficience) totale du bloc ou de la fonction,
- **Etat dégradé** : état intermédiaire entre les deux précédents qui permet de caractériser un dysfonctionnement partiel du bloc ou de la fonction.

Ces états sont exclusifs entre eux : ni un bloc ni une fonction ne pourra être en fonctionnement nominal et dégradé simultanément. Chaque bloc et chaque fonction peut posséder plusieurs états nominaux, un seul état absent et plusieurs états dégradés (Figure 6, Figure 7).

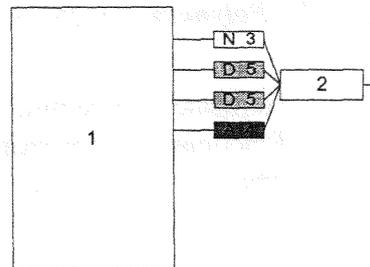
Automatiquement, lors de la création d'un bloc ou d'une fonction, SOFIA génère deux états (un état nominal et un état absent) associés chacun à un code et un nom que le modélisateur peut ensuite modifier à sa guise. Il peut ensuite créer un ou plusieurs autre(s) état(s) (dégradé et nominal) dont il définira le code et le nom.

- ① Bloc fonctionnel,
- ② Etat nominal ou état de bon fonctionnement du bloc fonctionnel,
- ③ Etat dégradé de fonctionnement du bloc fonctionnel,
- ④ Etat absent ou dégradation totale du bloc fonctionnel.



**Figure 6 : Etats de bloc fonctionnel.**

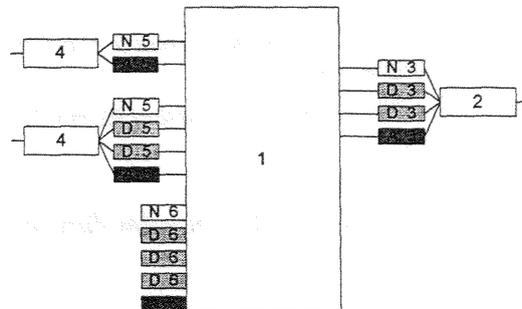
- ① Bloc fonctionnel,
- ② Fonction sortie du bloc fonctionnel,
- ③ Etat nominal de la fonction sortie,
- ④ Absence de la fonction sortie,
- ⑤ Etat dégradé de la fonction sortie.



**Figure 7 : Etats de fonction**

Il est possible, sur une même représentation, de visualiser les états d'un bloc fonctionnel sélectionné ainsi que les états de toutes les fonctions d'entrées et de sorties (avec leurs fonctions d'attache) liées à ce bloc (Figure 8).

- ① Bloc fonctionnel,
- ② Fonction sortie du bloc fonctionnel,
- ③ Etats de la fonction sortie du bloc fonctionnel,
- ④ Fonctions entrées du bloc fonctionnel,
- ⑤ Etats des fonctions entrées du bloc fonctionnel,
- ⑥ Etats du bloc fonctionnel.



**Figure 8 : Etats de bloc fonctionnel et des fonctions rattachées à ce bloc.**

## 4. POLYNOMES

Les polynômes sont des *liens constituants des expressions logiques booléennes internes aux blocs fonctionnels*. Dans SOFIA, ces polynômes booléens sont des polynômes logiques développés (sommés de monômes), utilisant des portes logiques "OU" et "ET".

Trois types de polynômes sont utilisés dans SOFIA :

- les **polynômes des fonctions** (Figure 9) reliant les fonctions de sorties d'un bloc aux fonctions d'entrées de ce même bloc (indépendamment des états de ces fonctions et de ce bloc),

- ① Fonction de sortie du bloc fonctionnel,
- ② Fonctions entrées causes de la fonction de sortie,
- ③ Porte "OU" logique définissant le polynôme de la fonction de sortie,
- ④ Porte "ET" logique définissant les monômes du polynôme de la fonction de sortie.

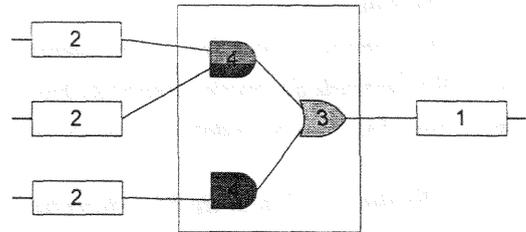


Figure 9 : Polynôme des fonctions.

Lorsque l'utilisateur détermine le polynôme logique associé à une fonction sortie (polynôme des fonctions), il s'interroge sur les fonctions entrées nécessaires à la réalisation de cette fonction sortie.

- les **polynômes des états des fonctions** (Figure 10) qui relient les différents états des fonctions de sorties d'un bloc aux états des fonctions d'entrées et aux états du bloc.

- ① Etat d'une fonction de sortie sur lequel est défini le polynôme cause,
- ② Etat de bloc cause de l'état de fonction de sortie,
- ③ Etats de fonctions entrées causes de l'état de fonction de sortie,
- ④ Porte "OU" logique définissant le polynôme développé de l'état de fonction,
- ⑤ Porte "ET" logiques définissant les monômes du polynôme.

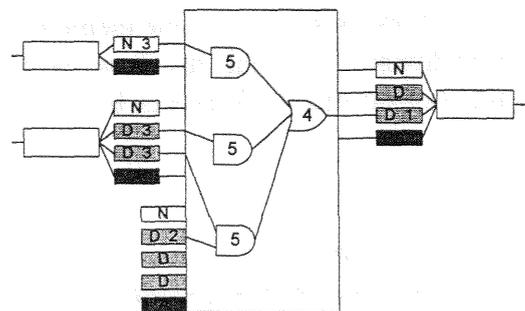
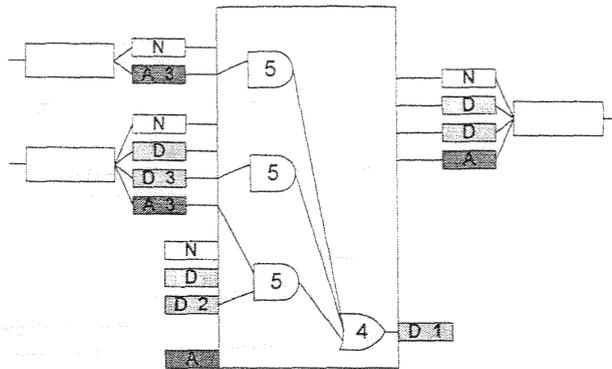


Figure 10 : Polynôme des états de fonctions.

- les **polynômes des états des blocs fonctionnels** (Figure 11) qui peuvent relier un état de bloc fonctionnel aux états des fonctions d'entrées du bloc et aux autres états du même bloc.

- ① Etat de bloc fonctionnel sur lequel est défini le polynôme cause,
- ② Etat de bloc cause de l'état de bloc,
- ③ Etats de fonctions entrées causes de l'état de bloc,
- ④ Porte "OU" logique définissant le polynôme développé de l'état de bloc,
- ⑤ Porte "ET" logiques définissant les monômes du polynôme.



**Figure 11 : Polynôme des états de bloc fonctionnel.**

Lorsque l'utilisateur détermine le polynôme logique associé à un état (de bloc ou de fonction sortie), il s'interroge sur les causes (états de bloc ou de fonctions entrées) susceptibles de le provoquer.

Il existe une possibilité de générer automatiquement les polynômes des fonctions. Pour cela, SOFIA appliquera les règles suivantes :

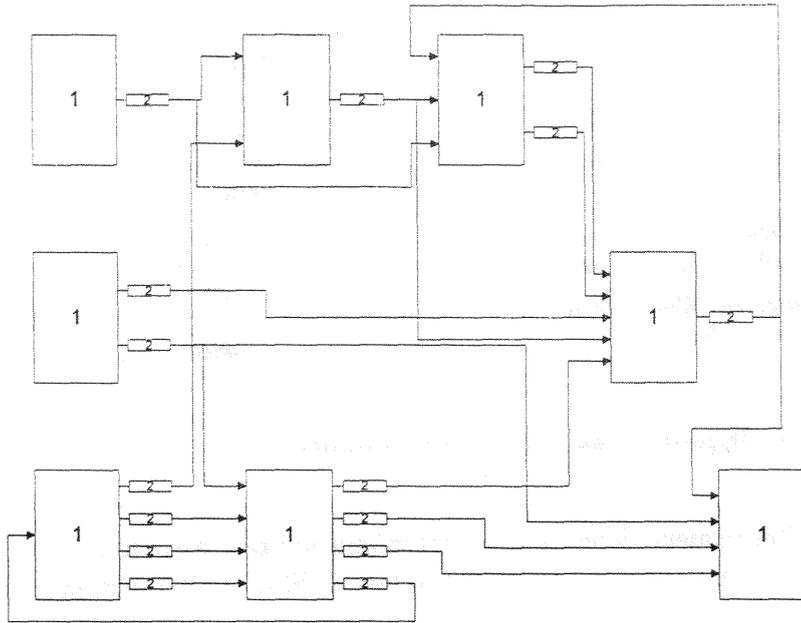
- pour qu'une fonction de sortie soit dans un état nominal il faut que toutes les fonctions d'entrées soient dans un état nominal,
- pour qu'une fonction de sortie soit dans un état absent, il suffit qu'une des fonctions d'entrée soit dans un état absent.

Il est également possible de générer automatiquement les polynômes des états à partir des polynômes des fonctions. Les polynômes reliant les états nominaux des fonctions de sorties aux états nominaux des fonctions d'entrées est le polynôme des fonctions complété par l'état nominal du bloc fonctionnel. Le polynôme des états absents étant le dual du polynôme des états nominaux.

Outres les représentations permettant de visualiser les différents éléments développés précédemment (blocs fonctionnels, fonctions, polynômes, ...), SOFIA offre deux autres modes de présentation :

## 5. RESEAU FONCTIONNEL

Ce mode de visualisation montre les attachements fonctionnels (fonctions) entre les différents blocs fonctionnels sélectionnés d'un même niveau hiérarchique (Figure 12). Il est aussi un bon indicateur de la complexité des interactions à l'intérieur du système étudié.



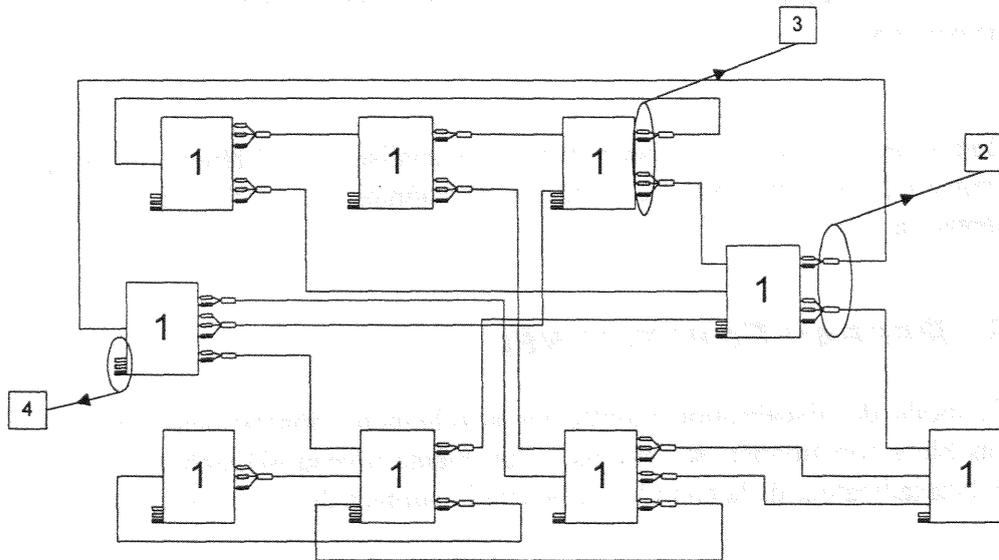
① Blocs fonctionnels,

② Fonctions.

**Figure 12 : Réseau fonctionnel**

## 6. RESEAU DES ETATS

Cette visualisation est basée sur les mêmes principes que la représentation du réseau fonctionnel, mais en y ajoutant les états des blocs fonctionnels et des fonctions (Figure 13).



① Blocs fonctionnels,

② Fonctions,

③ Etats de fonctions.

④ Etats de blocs.

**Figure 13 : Réseau des états.**

Il est possible avec cette représentation, de suivre la propagation avale ou amont d'un état donné et ainsi d'observer et de valider les informations concernant les états de fonctionnement d'une partie du système ou de sa totalité.

Après avoir constitué la modélisation (noyau de SOFIA), l'utilisateur peut étudier le système à l'aide des différents modules mis à sa disposition.

Auparavant, il est nécessaire de définir une *mission* : étape impérative pour l'utilisateur avant de pouvoir lancer une analyse.

La notion de *mission* permet de définir l'état de fonctionnement opérationnel du système. Une mission est composée de phases pour lesquelles l'utilisateur définit un environnement opérationnel (par sélection des états acceptables) pour un système donné et une durée donnée. Une mission standard peut être générée par SOFIA, dans ce cas les états nominaux des fonctions de sorties du système sont considérées comme acceptables et le profil de la mission est défini par les états nominaux des blocs fonctionnels du système et des entrées du système. C'est ensuite à partir de la durée de ces phases, que sont calculées les différentes valeurs de SdF (MTTR, MDT, ...). Pour chaque mission, l'utilisateur choisit l'ensemble du système ou seulement une partie de ce système.

## 7. AMDEC

SOFIA génère automatiquement les tableaux AMDEC à partir du noyau du logiciel. Le principe est d'identifier les effets par une propagation avale d'un ou de plusieurs états sélectionnés et d'analyser la criticité de la gravité de ces effets.

SOFIA met à disposition de l'utilisateur un certain nombre de colonnes à partir desquelles il peut construire sur mesure son propre tableau dont le contenu est généré automatiquement. Ainsi il est possible de visualiser :

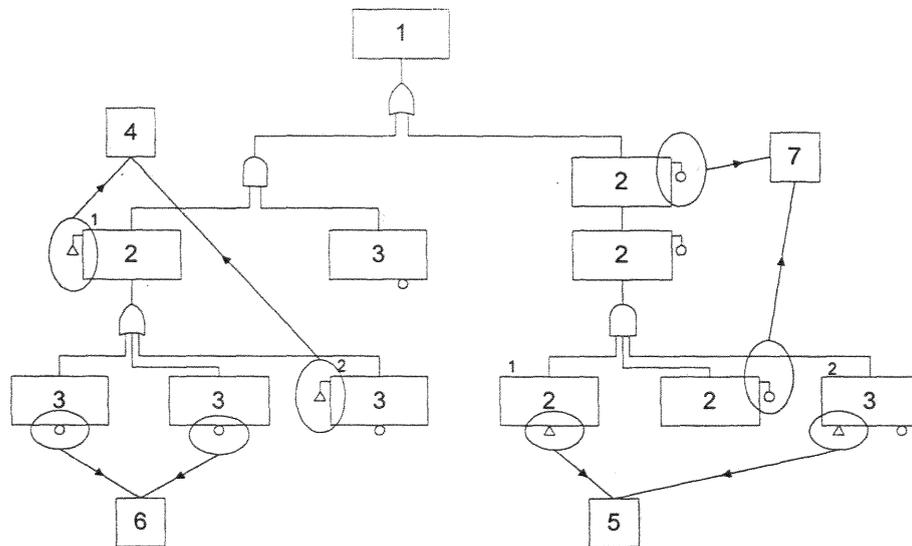
- les effets locaux d'un mode de défaillance, correspondants aux sorties du bloc contenant le mode de défaillance,
- les effets intermédiaires d'un mode de défaillance, relatifs aux sorties du bloc du niveau supérieur,
- les effets finaux (externes) d'un mode de défaillance, relatifs aux sorties du système;
- les effets finaux internes d'un mode de défaillance, correspondants aux états propagés n'ayant aucun effets en sortie du système,
- les dégradations internes d'un mode de défaillance, constituant les modes de défaillances propagés par le mode de défaillance initial,
- les diverses criticités calculées suivant les méthodes françaises ou américaines, par mode de défaillance ou par article, et par phase de mission ou par mission globale ; en tout, huit calculs de criticité différents.

## 8. SAFETY

Le module SAFETY détermine et trace automatiquement l'arbre des causes pour un événement donné (panne, marche, dégradation) et pour une mission donnée (Figure 14). Il s'agit donc soit d'un arbre de défaillances, soit d'un arbre de bon fonctionnement.

L'arbre global reflète le mieux la propagation amont de l'événement sommet. Il suit méthodiquement la propagation des états les uns après les autres. Il est possible de limiter le nombre d'état intermédiaires d'un arbre des causes en les filtrant en fonction de leur niveau de passage (d'un bloc frère à un autre, d'un bloc cousin à un autre). Combiné aux possibilités de filtrage, un certain nombre d'opérations booléennes peuvent être effectuées sur les arbres des causes. Ainsi, il est possible de factoriser, développer et absorber les arbres des causes.

Avec SAFETY, il est possible de déterminer, pour un événement donné, la longueur et le nombre de coupes minimales, la probabilité d'occurrence de l'événement sommet, les facteurs d'importance des coupes.



- ① Événement sommet de l'arbre des causes,
- ② Événements intermédiaires dans l'arbre,
- ③ Événements feuilles de l'arbre,
- ④ Symbole d'élément faisant l'objet d'un renvoi,
- ⑤ Symbole d'élément renvoyé,
- ⑥ Symbole d'élément terminal,
- ⑦ Symbole de boucle.

**Figure 14 : Arbre des causes.**

## 9. DIAGFIA

SOFIA génère des diagrammes de fiabilité soit à partir de la modélisation fonctionnelle, soit à partir de la modélisation dysfonctionnelle. Il est possible d'avoir, avec ce module, toutes les valeurs de fiabilité (probabilité qu'un système fonctionne dans l'intervalle de temps  $[0,t]$ ), maintenabilité (probabilité qu'un système soit réparé dans l'intervalle de temps  $[0,t]$ ), disponibilité (probabilité qu'un système soit non défaillant à l'instant  $t$ ) et facteurs d'importance (importance relative d'un élément par rapport au système au regard de critères comme l'influence sur les pannes, le temps de réparation, ...) qui sont calculées à partir des données entrées par l'utilisateur (MTTF et  $\mu$ ). Ce module est donc le plus intéressant d'un point de vue analyse quantitative.

## **10. DIAGSYS**

Ce module permet la génération automatique d'un logiciel d'aide au diagnostic de panne et de maintenance. Il permet l'aide au diagnostic par l'utilisation de DIAGSYS en tant que système expert d'aide au diagnostic de pannes, par l'exploitation de DIAGSYS en liaison avec un logiciel de documentation électronique multimédia ou la génération externe d'un code informatique exploitable en dehors de SOFIA, sur un autre équipement informatique fonctionnant en autonome.

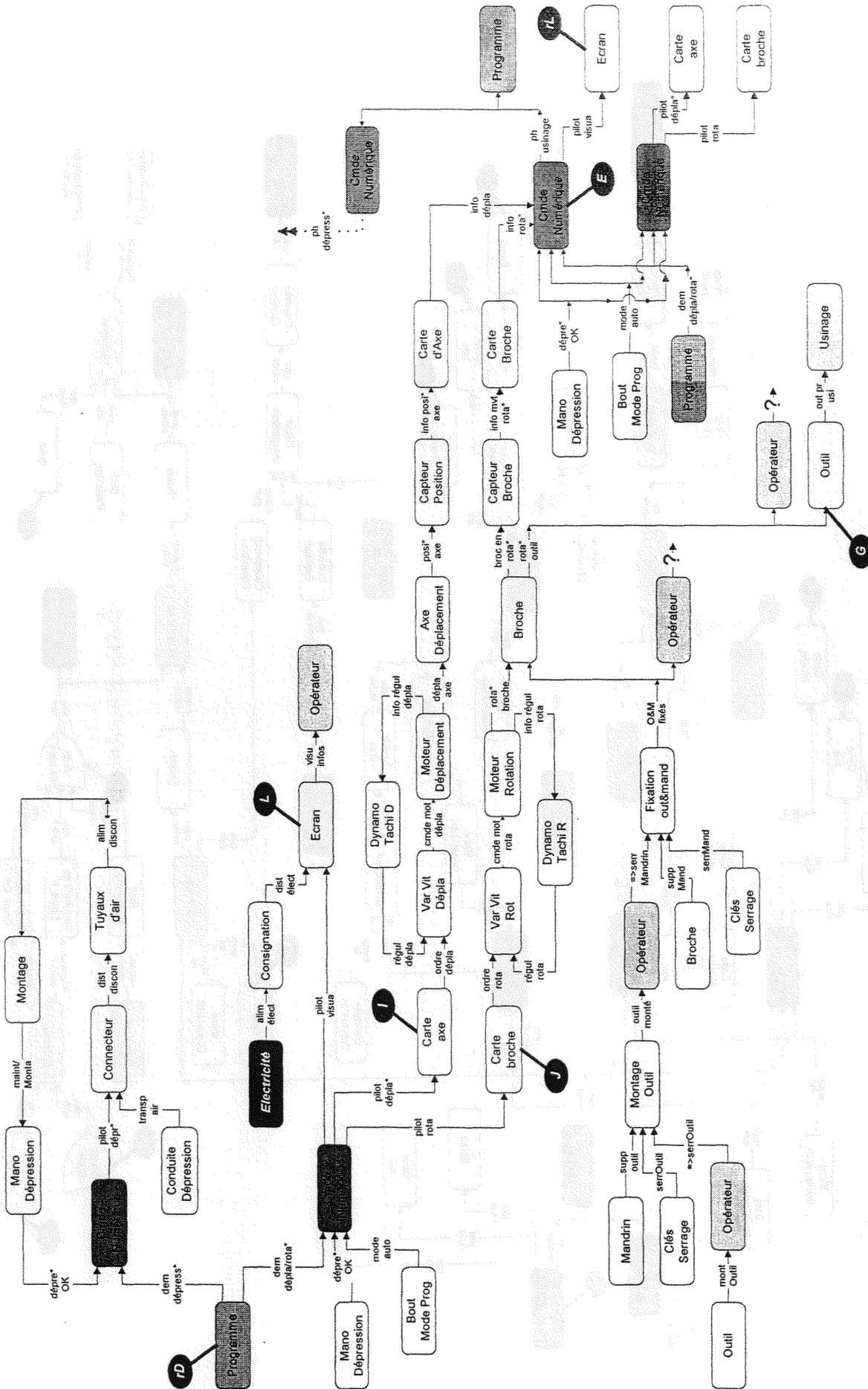


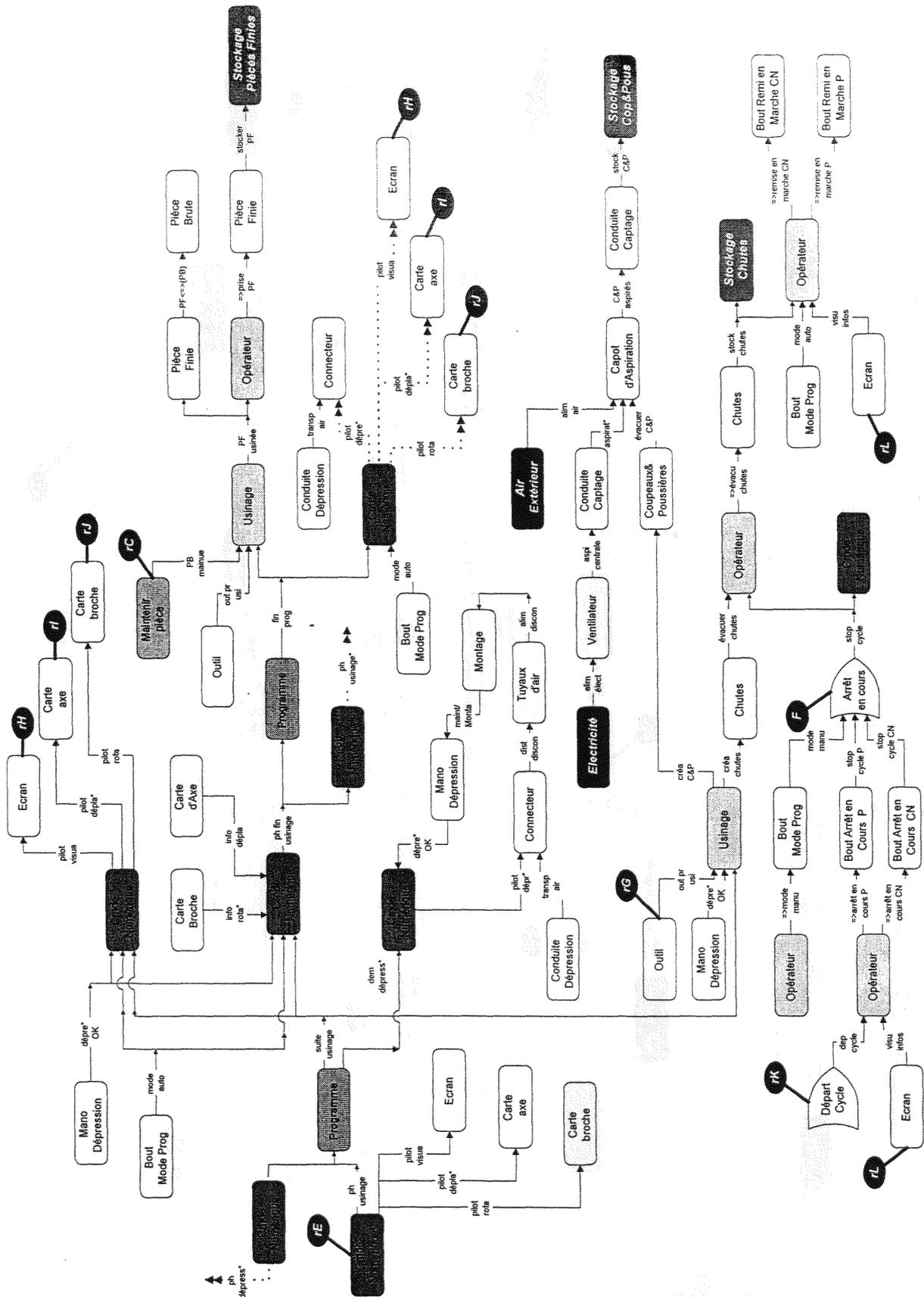
# ***ENCHAINEMENTS DES ACTIONS MODELISEES***

---

Sont reproduit ci-après l'ensemble des graphes d'enchaînements des actions modélisées fonctionnement.









## ***COMMUNICATIONS ENTRE ACTEURS***

---

Communications illustrant le processus décisionnel commun donné en exemple dans le rapport au chapitre "*Intégration*".

***Réponse n°1 de l'ergonome :***

"...

Lors du changement de série et/ou lors du test d'un nouveau programme, l'opérateur a besoin de prendre visuellement les opérations suivantes :

- Identification de l'outil,
- Hauteur de travail de l'outil,
- Sens de rotation de l'outil,
- Trajectoire de l'outil,
- Contact entre la pièce et l'outil.

..."

***Question n°4 du fonctionnel :***

"Voici les principales fonctions et contraintes auxquelles doit satisfaire le dispositif à concevoir.

...

Fonction n°2 : le dispositif doit également permettre :

- L'identification de l'outil,
- La hauteur de travail de l'outil,
- Le sens de rotation de l'outil,
- La trajectoire de l'outil,
- Le contact avec la pièce.

Ces inspections visuelles sont particulièrement importantes lors d'un changement de pièce et/ou lors d'un nouveau programme d'usinage.

..."

**Réponse n°3 de l'ergonome :**

"...

Dans tous les cas, le dégagement du système de captage doit pouvoir se faire "à volonté", quand l'opérateur le désire, si possible vers le haut.

..."

**Question n°8 du fonctionnel :**

"...

Aspect ergonomique :

Par ailleurs, il est demandé par l'acteur ERGONOME que, dans la mesure du possible, le dispositif de captage possède les fonctions suivantes :

Dégagement (vers le haut si possible) du dispositif de captage doit pouvoir se faire "à volonté", quand l'opérateur le sollicite,

Maniement du dispositif pourrait être selon les opérations (réglage, test programme, production ...), soit manuel, soit automatique,

Mise en service du captage automatique dès qu'il y a émission de copeaux et/ou poussières."

**Question n°4 du structurel :**

"...

Pourrais tu me fournir le mode d'emploi du réglage manuel du carter d'aspiration ?

...

Pourra-t-on piloter le vérin électrique pour la commande de la monte et baisse de la buse ? afin d'assurer le rapprochement maximum de la buse en fonction du point zéro et de la profondeur de passe de l'outil.

..."

**Question n°6 du structurel :**

"Pourrais tu me donner les normes ou des données sur les matières transparentes qui résisteraient au bris d'outil de diamètre 80 mm maxi et de longueur de 80 à 150 mm."

**Réponse n°7 du structurel :**

"...

Pour la protection périmétrique contre les risques d'éclatement de l'outil et la projection de chutes, je préférerais le polycarbonate à la tôle pour des raisons de visibilité. Je voudrais privilégier la vision et le captage par une buse cylindrique rotative avec une partie captage qui suivrait la projection des copeaux selon l'angle d'attaque de la fraise et se déplacerait en hauteur suivant la profondeur de passe ou l'usinage extérieur."

**Réponse n°2 de la réglementation :**

"A question simple ... réponse très difficile.

Pour commencer la directive machine 89/392 à l'article 1.3.2 "Risque de rupture" identique que les matériaux utilisés doivent présenter une résistance suffisante, adaptée aux caractéristiques du milieu d'utilisation.

Une norme EN953 intitulée "Protecteurs" indique :

### 5.1.3 Rétention des projections d'éléments

*En présence d'un risque prévisible de projections d'éléments (par exemple fragments d'outils ou pièces) à partir de la machine, le protecteur doit, dans toute la mesure du possible, être conçu et construit à partir de matériaux appropriés, permettant de retenir de telles projections.*

On est toujours pas plus avancé !

### 5.11 Transparence

*Les matériaux utilisés pour voir le fonctionnement de la machine doivent être, autant que possible, choisis parmi ceux qui conservent leur transparence malgré le temps et l'utilisation. Les protecteurs doivent être conçus pour permettre le remplacement des matériaux détériorés.*

*Certaines applications peuvent exiger de choisir des matériaux ou des combinaisons de matériaux résistant à l'abrasion, aux produits chimiques, aux rayonnements ultraviolets, à la poussière attirée par l'électricité statique ou aux dépôts superficiels de fluides gênant la transparence.*

On avance très légèrement mais on ne sait toujours pas quoi utiliser.

### 5.5.2 Résistance aux chocs

*Les protecteurs doivent être conçus pour résister aux chocs raisonnablement prévisibles des éléments de machines, pièces travaillées, fragments d'outils cassés, solides ou fluides éjectés, coups donnés par l'opérateur, etc. Les matériaux et méthodes de fixation des éléments transparents des protecteurs doivent être spécialement étudiés; Les propriétés des matériaux doivent être sélectionnées de manière à assurer la résistance à la masse et à la vitesse de l'objet ou du matériau projeté.*

A partir de cet article, on peut déjà en déduire que la question posée n'est pas assez précise pour apporter une réponse car on ne connaît pas la masse, ni la vitesse de l'outil, ni le type d'éclatement (total ou partiel).

### 8.2 Résistance aux chocs

*Il peut être nécessaire de vérifier la résistance des protecteurs aux chocs dus aux personnes, parties d'outils, fluides sous haute pression, etc. Avant d'effectuer ces vérifications, il est nécessaire d'identifier les chocs auxquels le protecteur risque d'être soumis, par exemple des heurts à faible vitesse par des personnes, des chocs à vitesse élevée par des fragments d'outils cassés ou des impacts provenant de projections de fluide sous haute pression.*

*Lors de la vérification de la résistance aux chocs, il est nécessaire de prendre en compte les propriétés des matériaux constitutifs du protecteur. Cela doit inclure la résistance des assemblages, des points de fixation, des glissières, etc., par lesquels le protecteur est relié à la machine ou à toute autre structure.*

*Lorsque des normes de Type C existent, elles doivent préciser la méthode de vérification à mettre en œuvre.*

La norme C dans notre cas, est la norme "Défonceuse" Pr EN 848-3 qui indique :

5.2.7.5 Caractéristiques requises pour les protecteurs et le dispositifs de protection

Les protecteurs d'outils doivent être réalisés dans les matériaux suivants ou d'une combinaison de ceux-ci :

- a) en acier de résistance minimale à la rupture de  $350 \text{ N/mm}^2$  et avec une épaisseur de paroi d'au moins 2 mm.
- b) En alliage léger de résistance minimale à la rupture de  $185 \text{ N/mm}^2$  avec une épaisseur de paroi d'au moins 5 mm.
- c) En polycarbonate avec une épaisseur de paroi d'au moins 8 mm.
- d) En fonte de résistance minimale à la rupture de  $350 \text{ N/mm}^2$  avec une épaisseur de paroi d'au moins 5 mm.
- e) En panneau de particule avec une épaisseur de paroi d'au moins 19 mm.

Oh surprise, il n'y a pas de méthode de vérification; Par contre, si l'on veut une matière transparente, il n'y a qu'une possibilité, le polycarbonate de 8 mm d'épaisseur. Pourquoi ?  
Je ne sais pas ..."

**Question n°9 du structurel :**

"...

Comment peut-on concilier l'escamotage ou l'ouverture du dispositif de capteur/protecteur, pour des raisons de visibilité pendant la phase de réglage avec une aspiration correct et constante des copeaux ?

"..."

**Réponse n°4 de l'ergonome :**

"...

Ce qui me semble fondamental c'est de pouvoir dégager le capotage (vers le haut?) par une commande à distance lors e l'usinage demandant la visualisation durant un instant même de courte durée.

"..."

**Réponse n°5 de l'ergonome :**

"...

En complément à ma réponse précédente, je me permets de te proposer un schéma de principe d'un protecteur/capteur qui pourrait être constitué d'une buse d'aspiration fixée à la broche et terminée en partie basse par un matériau souple ? et de trois volets mobiles au moyen d'un vérin également terminés par une partie souple ?"

**Réponse n°5 de l'utilisateur :**

"...

Précision en hauteur de la buse selon l'épaisseur de la pièce : je pense que le millimètre est amplement suffisant.

"..."

**Questions n°11 à 17 du structurel :**

"...

Sur ces dessins de principe ne figurent pas le système piloté de monte et baisse de l'ensemble, ni le carter transparent et escamotable demandé par l'ergonome qui permettra de retenir la

casse d'outil et de voir le bon déroulement du cycle grâce à une action sur l'organe de service prévu à cet effet.

Merci de me donner votre avis."

**Réponse n°21 du structurel :**

"...

La partie fixe devrait avoir un portillon manoeuvrable par un électro-aimant par une action volontaire de l'opérateur sur un organe de service prévu à cet effet, dans des phases de réglage par exemple.

Cet ensemble pourra se déplacer verticalement de bas en haut pour les différentes épaisseurs de passe, par l'intermédiaire d'un vérin électrique piloté également par l'automate.

..."

**Question n°4 de la réglementation:**

"...

Le volet escamotable permettra effectivement à l'utilisateur une meilleure visibilité à l'attaque de la pièce à usiner.

Cependant doit-il avoir la possibilité de pouvoir relever cet élément à tous moments lors du fonctionnement de la machine ? Si la réponse est affirmative, différentes contraintes s'imposent :

l'opérateur ne devra pas pouvoir atteindre l'outil lorsque le volet est relevé,  
la panne du dysfonctionnement du volet ne devra pas créer de situation dangereuse.

Ces nouvelles contraintes risquent de compliquer le dispositif actuel.

..."

**Réponse n°8 de l'ergonome :**

"...

Le protecteur doit pouvoir être escamotable pour permettre à l'opérateur de prendre visuellement un certain nombre d'informations parmi lesquelles :

identification de l'outil,  
hauteur (profondeur) de travail de l'outil,  
sens de rotation,  
trajectoire,  
contact avec la pièce,

...

En particulier pour contrôler la programmation lors d'une nouvelle fabrication aussi bien "en l'air" qu'en usinage pour des raisons de qualité d'état de surface par exemple.

L'escamotage du protecteur doit justement éviter à l'opérateur de se trouver à proximité de l'outil, situation préjudiciable à sa sécurité.

Il faut donc situer la commande de relevage du protecteur de telle façon que l'opérateur se trouve éloigné de l'outil tout en lui permettant d'avoir les informations nécessaires.

Mais il peut être intéressant de "chiader" le système pour le fiabiliser au maximum.

..."

**Réponse n°5 de la réglementation :**

"...

Après étude de ton plan et consultation de l'acteur ergonome, qui m'a expliqué que le volet escamotable devait pouvoir être relevé fréquemment pour différents contrôles aussi bien en

phase réglage que en fonctionnement, il conviendra de tenir compte des points suivants lors de l'utilisation du volet :

l'opérateur ne devra pas pouvoir atteindre l'outil lorsque le volet sera escamoté  
tenir compte des différentes positions possibles de la tête d'usinage,

en cas de panne du volet en position ouverte, la machine ne devra pas pouvoir fonctionner et son arrêt devra être provoqué.

..."

**Réponse n°27 de la fabrication :**

"...

Voici les modifs des plans du montage de l'électro-aimant actionnant le volet escamotable pour voir l'outil,

..."

**Réponse n°33 de la fabrication :**

"...

Ci-joint, en complément au plans déjà envoyés, la disquette contenant le plan de détail des charnières de carter relevable

..."

## ANNEXE VENTILATION

Sont données ici les différentes valeurs de concentrations de particules mesurées lors des tests effectués avec l'ancien et le nouveau système de captage montés successivement sur la défonceuse étudiée :

### Systeme d'origine :

Indice d'assainissement pour un débit de  $400 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  :

Passe	Hund 1	Hund 2	Grimm	Indice d'assainissement
1	54.3	60.7	*	57.5
2	55.1	51.5	*	53.3
3	48.1	44.0	*	46.1
<i>Moyenne</i>				<i>54.8</i>

\*Le compteur de particules (Grimm) étant en saturation durant tous les essais, il n'a pas été possible de calculer l'indice d'assainissement avec cet appareil dans ces conditions. En effet, c'était l'appareil le plus exposé aux particules (car le plus proches de la source d'émission).

Indice d'assainissement pour un débit de  $700 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  :

Passe	Hund 1	Hund 2	Grimm	Indice d'assainissement
1	64.9	77.7	*	71.3
2	88.1	77.3	*	82.7
3	80.7	74.4	*	77.5
<i>Moyenne</i>				<i>77.2</i>

**Systeme prototype :**

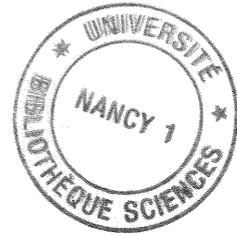
Les valeurs d'indice d'assainissement données ci-dessous, tiennent compte de la concentration résiduelle standard, comme indiqué dans le document.

Indice d'assainissement pour un débit de  $400 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  :

Passe	Hund 1	Hund 2	Grimm	Indice d'assainissement
1	92.2	98.2	96.3	95.6
2	97.3	98.9	94.55	96.9
3	92	99.0	94.7	95.2
			<b>Moyenne</b>	<b>95.9</b>

Indice d'assainissement pour un débit de  $620 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  :

Passe	Hund 1	Hund 2	Grimm	Indice d'assainissement
1	100	100	99.3	99.8
2	100	100	99.5	99.8
3	100	99.5	99.3	99.6
			<b>Moyenne</b>	<b>99.7</b>



Monsieur Damien JOUFFROY

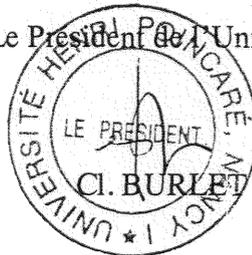
DOCTORAT de l'UNIVERSITE HENRI POINCARÉ, NANCY-1

en SCIENCES et TECHNOLOGIES INDUSTRIELLES

VU, APPROUVE ET PERMIS D'IMPRIMER

Nancy, le 29 mars 1999 n° 200

Le Président de l'Université



## RÉSUMÉ FRANCAIS

Les machines à bois semi-automatisées (défonceuses à commande numérique, perceuses multibroches, machines multifonctions, ...) présentent, malgré leur degré d'automatisation, des risques pour le (ou les) opérateur (s) amené (s) à évoluer dans leur environnement. En s'appuyant sur des données issues d'analyses ergonomiques et fonctionnelles, cette étude propose une démarche de conception visant à intégrer au plus tôt, dans un cycle de développement des machines, les principes d'hygiène, de sécurité et d'ergonomie. Cette démarche, développée dans un cadre d'ingénierie concourante, exploite une méthode de conception dite distribuée. Afin de mesurer l'intérêt et l'apport d'une telle méthode, une application pratique est envisagée sur un élément de machine particulier, le dispositif de captage de poussières d'une défonceuse à commande numérique. Après validation, l'efficacité de captage du dispositif ainsi conçu est améliorée comparativement au dispositif initial.

## MOTS CLÉS

Sécurité des machines – Ingénierie simultanée – Conception distribuée – Ergonomie – Machine-outil – Poussières de bois – Captage

## ENGLISH SUMMARY

The automated woodworking machineries, in spite of their degree of automation, present risks for the operators who evolve in their environment. While being based on data resulting from ergonomic and functional analyses, this study proposes a design approach. This approach aims at integrating as soon as possible, in the cycle of development of the machines, the hygiene, safety and ergonomics principles. This process, developed within a framework of concurrent engineering, exploits a distributed design method. To measure the interest and the contribution of this method, a practical application is carried out on the device of dust control of a NC router. After validation, the efficiency of the device designed is improved compared to the initial device.

## KEY WORDS

Machine Safety – Concurrent Engineering – Distributed Design – Ergonomy – Machine-tool – Wood dust – Capture