HAL
open science

Intégration d'un modèle de situation de travail pour l'aide à la formation et à la simulation lors de la conception et l'industrialisation de systèmes

Mahmoud Shahrokhi

To cite this version:

Mahmoud Shahrokhi. Intégration d'un modèle de situation de travail pour l'aide à la formation et à la simulation lors de la conception et l'industrialisation de systèmes. Mécanique [physics.med-ph]. Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2006. Français. NNT : . tel-00429644

HAL Id: tel-00429644

https://theses.hal.science/tel-00429644v1

Submitted on 3 Nov 2009

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.

Ecole Centrale de Nantes *Université de Nantes*

ÉCOLE DOCTORALE

MÉCANIQUE, THERMIQUE ET GÉNIE CIVIL

Année 2006 N° B.U. :

Thèse de DOCTORAT

Diplôme délivré conjointement par
l'École Centrale de Nantes et l'Université de Nantes

Spécialité : Génie Mécanique

Présentée et soutenue publiquement par :
MAHMOUD SHAHROKHI

le 5 décembre 2006
à l'Ecole Centrale de Nantes

TITRE

Intégration d'un modèle de situation de travail pour l'aide à la formation et à la simulation lors de la conception et l'industrialisation de systèmes

JURY

Président :	Georges M. Fadel	Professeur, Clemson University, Clemson, USA
Rapporteurs :	Frederic Vanderhagen	Professeur, UVHC, LAMIH Valenciennes
	Elie Fadier	Dr HDR, INRS, Vandoeuvre
Examinateurs :	Damien Chablat	CR CNRS, IRCCyN, Nantes
	Patrick Martin	Professeur, LGIPM, ENSAM, Metz
	Pietro C. Cacciabue	Professeur, EC Joint Research Center, Ispra, Italie
	Alain Bernard	Professeur, IRCCyN, Ecole Centrale de Nantes

Directeur de thèse : Alain BERNARD
Laboratoire : IRCCyN UMR CNRS 6597

N° ED 0367-256

Remerciements

Ce travail a été effectué au sein de l'Institut de Recherche en Communications et en Cybernétique de Nantes (IRCCyN UMR CNRS 6597) dirigé par Monsieur le Professeur **Jean-François LAFAY**. Je l'en remercie sincèrement.

Je remercie tout particulièrement mon directeur de thèse, Monsieur **Alain BERNARD**, professeur des universités, responsable de l'équipe projet « Ingénierie Virtuelle pour le Génie Industriel » (IVGI) à l'IRCCyN, et directeur de la Recherche de l'Ecole Centrale de Nantes, qu'il reçoive toute l'expression de ma reconnaissance pour m'avoir proposé ce sujet de recherche, et pour tout son dynamisme et ses compétences scientifiques qui m'ont permis de mener à bien cette étude.

Je tiens également à remercier Monsieur **Nicolas PERRY**, Maître de Conférences à l'Ecole Centrale de Nantes et nouveau responsable de l'équipe IVGI, pour sa constante disponibilité, sa patience, ses remarques pertinentes qui m'ont permis de mener à bien ce travail. Je le remercie non seulement pour ses conseils avisés, mais aussi pour tout ce qu'il m'a appris au long de ces années.

J'exprime toute ma gratitude à Monsieur **Elie FADIER** du Laboratoire « Ergonomie et Psychologie Appliquées à la Prévention de Département Homme au Travail » de l'INRS d'avoir accepté d'être rapporteur. Je le remercie également de l'intérêt qu'il a montré pour cette thèse et de sa disponibilité pour réaliser son rapport.

Je remercie tout particulièrement Monsieur **Frédéric VANDERHAGEN**, Professeur des Universités à l'UVHC et chercheur au laboratoire LAMIH, d'avoir accepté de juger ce travail et d'en être le rapporteur.

Je suis très sensible à la présence dans ce jury de Monsieur **Pietro C. CACCIABUE**, Professeur de l'Institute for the Protection and Security of the Citizen Human Factors Sector, Ispra (VA), Italy.

Je tiens également à remercier Monsieur **Georges M. FADEL**, Professeur à l'Université de Clemson, USA, d'avoir accepté de participer au jury de cette thèse et de le présider.

Je veux adresser tous mes remerciements à Monsieur **Damien CHABLAT**, Chargé de Recherche CNRS à l'IRCCyN (Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes UMR CNRS 6597), pour sa participation à ce jury.

Je voudrais adresser mes remerciements à **Patrick MARTIN** Professeur des Universités au CER ENSAM de Metz et responsable de recherche au LGIPM pour sa participation à ce jury.

J'exprime toute mon amitié à Madame **Catherine DA CUNHA**, Maître de Conférences à l'Ecole Centrale de Nantes et qui a récemment intégré l'équipe IVGI, pour l'aide précieuse et la patience dont elle a fait preuve lors de la relecture du manuscrit de ma thèse.

Mes remerciements vont également à Monsieur **Philippe MUSTIERE** pour son travail inappréciable de relecture du manuscrit et ses propositions intéressantes.

Toute mon amitié à Madame **Magali MAUCHAND**, Monsieur **Yves KERARON**, et Monsieur **Victor VERGARA** avec qui j'ai partagé le bureau pendant ces années, et avec qui j'ai eu tant de discussions fructueuses.

Merci aussi à tous mes collègues et amis de longue date du laboratoire qui se reconnaîtront ici. Je leur exprime ma profonde sympathie et leur souhaite beaucoup de bien.

TABLE DES MATIERES

PARTIE I : INTRODUCTION GENERALE 11

1. Introduction 12

1.1. Problème 12

1.1.1. Sommaire de problème 13

1.1.2. But 13

1.1.3. Objectif 14

1.2. Hypothèses 14

1.3. Domaine de l'étude 15

1.4. Méthodologie 15

1.5. Résultats 16

1.6. Application 16

1.7. Plan du travail 16

PARTIE II : CONCEPTION DE SITUATION DE TRAVAIL 19

Chapitre I : La situation de travail 21

1. Approche systémique d'analyse de situation de travail 22

1.1. Définition du concept de situation de travail 22

1.1.1. Frontière du système de la situation de travail 23

1.1.2. Le but du système de la situation de travail 23

1.1.3. L'environnement de la situation de travail 23

1.1.4. Eléments du système de la situation de travail 24

I.. Solutions techniques 25

II. Equipes de travail 25

III Matériels 26

IV. L'environnement et les conditions de travail 26

1.2. Dynamique de la situation du travail 26

1.2.1. Evolution des situations de travail 27

1.3. Situation de travail : un système socio- technique 28

1.3.1. Ergonomie 29

1.3.2. Conception centrée sur l'utilisateur 29

1.4. Les processus de conception 30
1.4.1. Approche numérique 31
I. Usine numérique 31
II. Réalité virtuelle 32
1.5. Validation de la conception 33
2. Modélisation de la situation de travail 34
2.1. Performance 36
2.2. Sécurité 36
2.3. Facteur humain 37
2.4. Coût 37
2.5. Faisabilité 37
2.6. Fiabilité 38

Synthèse du chapitre I 39

Chapitre II : Modélisation de l'homme dans la situation de travail 41
1. Modélisation de l'homme 42
1.1. Concepts de base 42
1.1.1. Système et modèle 42
1.2. Modélisation de l'homme dans la situation de travail 43
1.3. Classification de modèles de l'homme 43
1.3.1. Modèle descriptif 44
1.3.2. Mannequin physique 45
1.3.3. Modèles mathématiques 46
I. La recherche opérationnelle 46
II. Modèle statistique 47
III. Modèle logique floue 47
IV. Réseau de neurones 48
V. Approche par réseaux de neurones flous 50
1.3.4. Les modèles de comportement corporel 50
I. Les modèles cinématiques 50
II. Les modèles biomécaniques 51
III. Les modèles statiques 51
IV. Les modèles dynamiques 51
1.3.5. Les modèles de sciences humaines 52

I. Les modèles anthropométriques 52
II. Les modèles physiologiques 53
III. Les modèles psychologiques 53
IV. Les modèles sociologiques 54
1.3.6. Les modèles assistés par ordinateur 54
I. L'Intelligence artificielle et les modèles de simulation cognitive 55
II. Mannequin numérique 55
III. La simulation numérique 57

Synthèse du chapitre II 58

Chapitre III : Système multi-agent – multi-échelle de la modélisation de l'homme 59
1. Les futurs modèles de l'homme 60
1.1. Intégration de modèle d'humain 60
1.1.1. Les futures exigences de la situation de travail 61
1.1.2. Exigences des futurs modèles d'humains 63
2. Les agents de modélisation de l'homme 65
2.1. Agent de modélisation anatomique 67
2.2. Agent de modélisation physiologique 67
2.3. Agent de modélisation psychologique 67
2.4. Agent de modélisation cinématique 68
2.5. Agent d'analyse de facteurs humains 68
2.6. Agent d'analyse de risque 69
2.7. Agent d'analyse de performance 69
2.8. Agent d'analyse économique 70
3. Les échelles de modélisation de l'homme 70
4. Architecture du système MA/ME pour modéliser l'homme dans la situation de travail 71

Synthèse du chapitre III 79

PARTIE III : ANALYSE DE RISQUE DANS LA SITUATION DE TRAVAIL 83
Chapitre I : Accident et risque 85
1. Accidents 86
1.1. Echec et défaillance 86

1.2. Risque professionnel 86
1.3. Processus accidentel 87
2. Analyse d'accident 88
2.1. Classification des modèles d'analyse d'accident 89
2.2. Les causes de l'accident 89
3. Analyse de risque 90
3.1. Risque 90
3.2. Identification de risque 91
3.3. Evaluation de risque 92
3.3.1. Conséquence d'accident 93
3.3.2. Probabilité d'accident 93
3.3.3. Matrice de risque 94
3.3.4. Index de risque 94
4. Les modèles d'analyse de risque 94
4.1. Classification de modèles d'analyse de risque 95
4.2. Application de la réalité virtuelle dans le domaine de l'analyse de risque 96
4.3. Application de la logique floue dans le domaine de l'analyse de risque 96
4.4. Analyse de risque lors de la phase de conception 97
5. Mesures de sécurités (Barrières) 98
5.1. Classification de barrières 99
5.2. Attributs de barrières 102
6. Gestion de risque 102
6.1. Prévention de risques 103
6.2. Les niveaux de confrontation de risque 104

Synthèse du chapitre I 105

CHAPITRE II : MODELISER LE RISQUE DANS LA SITUATION DE TRAVAIL 107
1. Zone dangereuse floue 108
1.1. Les concepts de bases 108
1.1.1. L'ensemble flou 108
1.1.2. La zone dangereuse 109
1.1.3. Espace flou 111
1.2. Calculer les paramètres de la zone dangereuse 114
1.3. L'effet de la probabilité dans la définition de la zone dangereuse 118

1.4. Intégrer les espaces flous 121
1.5. Perspective de l'utilisation de la zone dangereuse dans la réalité virtuelle 122
2. Approche de l'impact 122
2.1. Développement de scénario 123
2.2. Modéliser un accident comme une interaction danger–cible 123
2.3. Facteur de dommage 124
2.4. Les modélisations dynamique et statique de risque 125
2.5. Modélisation de barrières 129
2.6. Discussion sur l'approche impact de l'agent de danger 133
3. L'intégration de modèle des entités de risque dans le modèle de la situation de travail 133
3.1. Les concepts de bases 134
3.2. Analyse de sécurité par ordinateur 135
3.3. Le modèle des entités de risques 135
3.3.1. La cible 136
3.3.2. La zone dangereuse 136
3.3.3. Agent de danger 137
3.3.4. Risque 138
3.3.5. Evénement dangereux 138
3.3.6. Barrière 139
3.4. Considération des effets de barrières dans l'analyse de l'arbre d'évènements 141
3.4.1. Description de modèle 143
3.4.2. Discussion sur l'intégration de barriers dans l'arbre d'évènements 144
3.5. Le modèle informatique 145
4. Analyses d'énergie 158
4.1. Méthodologie 158
4.2. Ensemble de barrières d'énergie 159
4.3. Discussion sur l'analyse d'énergie 161
5. Le modèle de zone de présence et la zone de danger 161
5.1. Introduction 162
5.2. Méthodologie 162
5.3. Discussion sur la zone de présence et la zone de danger 168
6. Analyse de point d'accumulation de risque 168
6.1. Analyse de risque lors de la conception 168

6.2. L'espérance de risque 169
6.3. Méthodologie 171
6.3.1. Graphe de maillons critiques 171
6.3.2. Algorithme d'amélioration 174
7. Optimisation de trajectoire 174
7.1. Les modèles d'optimisation 176
7.2. Discussion sur l'optimisation de trajectoire 178

Synthèse du chapitre II 181

PARTIE IV : CONCLUSION 185
1. Conclusion 186
2. Futures recherches 188

BIBLIOGRAPHIE 189

ANNEXE (Les diapositives de la présentation) 205

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1. Les photos schématiques d'un opérateur de scie à ruban 22

Figure 2. Le modèle d'interaction homme–situation de travail (PSA, 2005) 25

Figure 3. L'interaction de l'opérateur de scie à ruban avec autres sous-systèmes de SDT 28

Figure 4. Application de modèle humain dans la validation de système (Zachary et al., 2001a) 30

Figure 5. Comparaison du processus avec la méthode traditionnelle et avec utilisation de l'usine numérique (Shahrokhi et al., 2004a) 32

Figure 6. Un modele développé par (Bendahan, 2004) pour simuler le mouvement humain en utilisant le réseau de neurones 49

Figure 7. Une présentation schématique de relations entre les modèles d'humains virtuels et les autres technologies de modélisation de l'homme 64

Figure 8. L'application du système multi–agents pour calculer la fatigue et la charge de travail 69

Figure 9. Une illustration schématique de l'idée de multi-échelle 71

Figure 10. Le système multi–agents de modélisation de l'homme, y compris des agents de modélisation et des agents d'analyse 72

Figure 11. (a) Le diagramme de l'environnement, (b) Le diagramme de l'environnement dans une situation de travail avec les objets dangereux 73

Figure 12. La trajectoire d'un homme pour partir du point S vers le point E, en évitant un danger 74

Figure 13. Le changement de mode de coopération des agents, selon différents scénarios (E_1 : Marcher, E_2 : Marcher dans une situation dangereuse, E_3 : Marcher dans une situation dangereuse en portant une charge) 74

Figure 14. Une démonstration schématique de la définition du rôle des agents selon la configuration du système 75

Figure 15. Agent de mesure instantanée de risque, à l'échelle des organes du corps 76

Figure 16. L'algorithme de MA/ME pour la simulation de comportement humain 77

Figure 17. Elément de risque selon (EN, 1997a) 91

Figure 18. Les fonctions de sûreté de barrières et de réduction qui sont présentées dans le modèle de papillon (traduit) 100

Figure 19. Modèle d'accident par bris de barrières 101

Figure 20. Démonstration de zone dangereuse, pour un piéton, avec des approches traditionnelles 109

Figure 21. Les zones dangereuses précisées pour la machine « scie à ruban » par (EN, 2003) 110

Figure 22. Démonstration d'une zone dangereuse autour d'une automobile en appliquant l'approche floue 111

Figure 23. La zone dangereuse floue bidimensionnelle autour de la lame de la scie à ruban 112

Figure 24. La façon de définir les zones dangereuses tridimensionnelles : (a) appliquer des espaces flous uni et bidimensionnels et (b) appliquer deux espaces flous bidimensionnels 113

Figure 25. Les zones dangereuses floues, définies pour les parties indiquées par la norme européenne pour une scie à ruban 114

Figure 26. La méthode pour intégrer les attributs détaillés pour former les attributs intermédiaires et les paramètres de la zone dangereuse 117

Figure 27. L'interface utilisateur avec le système d'inférence floue pour définir les paramètres de la zone dangereuse 118

Figure 28. La zone dangereuse autour d'un conducteur d'électricité selon la définition traditionnelle 119

Figure 29. La démonstration de l'effet du niveau de confiance sur une zone dangereuse floue 120

Figure 30. L'effet de la réduction d'incertitude sur la réduction de distance de la confiance 120

Figure 31. La zone dangereuse floue, sans considérer l'effet de probabilité 120

Figure 32. Une démonstration de l'intersection de deux zones de danger floues, en deux dimensions 121

Figure 33. Une illustration de l'union de deux zones dangereuses, en deux dimensions 122

Figure 34. Méthode de calcul de l'index statique de risque 124

Figure 35. Calcul de l'index de risque basé sur l'arbre d'évènements et l'analyse de barrières (Shahrokhi et al., 2006d) 126

Figure 36. Les attributs des concepts "danger", "cible" et "mode d'impact" dans le mode instantané 126

Figure 37. Calcul de degré d'appartenance d'une cible dans la zone dangereuse 127

Figure 38. Diagramme de classes du modèle 128

Figure 39. La méthode de calcul de risque en cours de simulation tridimensionnelle 129

Figure 40. Une représentation schématique de la variété de barrières 130

Figure 41. Séparation des effets de barrières en analyse de risque 131

Figure 42. Une illustration schématique des entités de risque selon (Hasan, 2002) 136

Figure 43. Interrelations entre la zone dangereuse et les autres entités de risque 138

Figure 44. Les interrelations entre les évènements dangereux et les autres entités de risque 139

Figure 45. Les effets protecteurs d'utilisation des barrières successives 140

Figure 46. Une boite de dialogue d'entrée des attributs de barrières 141

Figure 47. a) Un schéma de l'arbre d'évènements et (b) un exemple d'arbre d'évènements 142

Figure 48. (a) La forme schématique de l'arbre d'évènements modifié et (b) l'arbre d'évènements modifié de l'exemple précédent 143

Figure 49. (a) Un diagramme bloc, et (b) son équivalent dans la forme de structure de barrières 144

Figure 50. L'arbre des spécifications de DELMIA 145

Figure 51. Les entités de base du système d'analyse de risque 146

Figure 52. La structure hiérarchique développée pour le risque et l'arbre d'évènements 146

Figure 53. Une structure de l'entité de HAZARD, pour la scie à ruban, avant modification 147

Figure 54. La boite de dialogue pour introduire/modifier le danger 148

Figure 55. Définition des paramètres de la barrière de danger 149

Figure 56. Fenêtre utilisée pour introduire les paramètres de risque 150

Figure 57. Définition des paramètres des barrières de probabilité d'accident 151

Figure 58. Définition des paramètres d'un ensemble de barrières qui limitent la sévérité d'un accident 151

Figure 59. Définition des paramètres d'une barrière de sévérité qui limite la sévérité d'un accident 152

Figure 60. Définition des paramètres des barrières qui protègent une cible 152

Figure 61. Définition des paramètres d'un arbre d'évènements 153

Figure 62. Définition des paramètres des évènements dangereux 154

Figure 63. Définition des paramètres de l'ensemble de barrières d'un évènement dangereux 154

Figure 64. Définition des paramètres d'une barrière d'évènement 155

Figure 65. Définition des paramètres d'une zone de danger 156

Figure 66. Définition des paramètres d'une barrière de zone de danger 156

Figure 67. Définition des paramètres des évènements dangereux 157

Figure 68. Modèle de processus d'accident comme défaillance de barrières 158

Figure 69. Un exemple de barrières en série et parallèles 159

Figure 70. La présentation schématique de ZD, TP et SS à une dimension, pour une séquence de simulation spécifiée 163

Figure 71. Une présentation schématique de zone dangereuse (ZD), de zone de présence (TP), et de risque (SS) dans un espace mono–dimensionnel 164

Figure 72. Quelques illustrations schématiques de barrières de danger (a, b, c) et de barrières de cibles (d, e, f) 165

Figure 73. ZD et TP de l'exemple 1 166

Figure 74. (a) Barrières de zones dangereuses (DBi), et barrière de zone dangereuse effective (EDB), (b) complément de zone dangereuse effective (¬EDB) de l'exemple 1 166

Figure 75. Espace flou EZD calculé à base de min (ZD, EDB) 167

Figure 76. (a) Barrière de présence (TB_*) et barrière effective de présence (ETB), (b) complément de barrière effective de présence (¬ETB) dans l'exemple 1 167

Figure 77. Espace flou EPZ (ligne pleine) 167

Figure 78. Fonction de risque (RF) calculée à base de EZD∩EPZ 167

Figure 79. Le déroulement de la conception et de l'analyse de risque 169

Figure 80. Un exemple d'arbre d'événements 172

Figure 81. Un exemple de GMC 173

Figure 82. L'exemple de GMC instancié 173

Figure 83. Déroulement du processus d'analyse de points d'accumulation de risque 174

Figure 84. Définition des cellules rectangulaires 176

Figure 85. La fonction d'appartenance d'une zone dangereuse floue avant et après avoir appliqué les effets de barrières 176

Figure 86. Une trajectoire complexe d'un opérateur 177

Figure 87. Calcul de risque pour une sous-trajectoire, en utilisant les outils géométriques, dans l'environnement DELMIA 178

Figure 88. Un exemple pour le problème d'optimisation de la trajectoire, en présentant les Zij 180

Figure 89. La solution trouvée 180

LISTE DES TABLES

Table 1. Les échelles d'application des agents de modélisation de la situation de travail 35

Table 2. Méthode de modélisation des paramètres de l'exemple 1 132

Table 3. Les relations possibles entre les entités PPR et les entités de risque 140

PARTIE I : INTRODUCTION GENERALE

1. Introduction

Au cours de ces dernières années, une évolution importante s'est produite dans le domaine de la conception des situations de travail (SDT). Cette évolution provient principalement du progrès technologique et méthodologique, et des nouveaux critères socio–techniques qui ont un effet direct sur les méthodes de conception.

Le développement de nouvelles technologies a permis d'intégrer de plus en plus les différents systèmes de modélisation, qui étaient jusqu'à aujourd'hui séparés. Ceci fournit la possibilité d'avoir un regard multidisciplinaire, avec des critères et des objectifs variés, sur la même plate–forme de conception.

Dans un cas idéal, les informations peuvent être utilisées pour effectuer un ensemble d'analyses : essentiellement analyse de faisabilité, analyse de performance, analyse économique, et analyse de risque. Le but de ces analyses est de tenter d'optimiser différents aspects d'une SDT en considérant sa durée de vie.

Ce travail s'inscrit dans une volonté d'expliquer les conditions, les exigences, les aspects relatifs à la relation entre l'homme et les systèmes techniques, et la façon de les considérer lors de la conception d'une SDT.

La SDT est vue comme un système socio–technique formé de plusieurs sous–systèmes, et analysable en différents points de vue : productivité, sécurité, coût et facteurs humains.

Nous nous concentrerons sur des aspects concernant les êtres humains et leurs relations avec les systèmes techniques, de façon à faire le meilleur compromis entre cet aspect et d'autres aspects dans les situations de travail.

Nous nous intéresserons particulièrement à examiner les aspects suivants représentés par (CVU, 2006), lors de la conception d'un système :

- L'interaction entre les humains et leurs outils, les machines et les processus de travail,
- La façon dont la conception de la SDT affecte les humains, la productivité et la sécurité,
- Les exigences physiques et mentales de l'opérateur d'un travail,
- L'adéquation des conditions du travail avec l'opérateur,
- La compatibilité dans la relation humain–système.

Dans le cadre de ce travail, différentes techniques de modélisation des attributs et comportements de l'homme sont envisagées et sont regroupées dans une architecture multi–agents et multi–échelles. Dans le cadre du développement de l'agent d'analyse de risque, plusieurs méthodes d'analyse de risque sont développées, spécifiquement, pour être intégrées dans les systèmes de conception industrielle.

1.1. Problème

Des techniques de modélisation sont typiquement employées pour faire les analyses et pour évaluer ou comparer des conceptions candidates (ONR, 2000). En étudiant les applications courantes de conception de situations de travail, il apparaît que parfois le développement de ces outils n'était pas homogène pour accéder à tous les objectifs, et que ces outils étaient plutôt utilisés pour faire des analyses de faisabilité et des paramètres techniques.

Nos observations sur la modélisation de l'aspect humain montrent que bien que les applications de conception de situations de travail soient riches en outils d'évaluation des facteurs humains en simulant le comportement physique, il se trouve que, pour faire l'analyse de performance, de sécurité et économique, on doit toujours s'adresser à d'autres outils et méthodes, à l'extérieur de l'application. Ceci veut dire que ces outils sont développés pour répondre aux questions traditionnelles au niveau du travail et des facteurs humains et que la maturité de ces outils n'est pas suffisante pour évaluer les objectifs au niveau processus et système.

Pour développer les nouvelles applications, il faut d'abord avoir une idée des futurs situations de travail, de leurs objectifs et des critères qu'ils imposeront.
Il est évident que pour optimiser la SDT, il y a de plus en plus convergence vers les approches d'optimisation globale de système, en s'appuyant sur les mesures organisationnelles et systémiques (Savic, 2001). Pour faire des analyses de ce niveau, dans l'environnement dynamique de conception, il faut développer des systèmes « intelligents » pour intégrer différents agents de modélisation et les analyser par rapport à des objectifs et des contraintes de modélisation.
Ce travail global nécessite un temps très important, évidemment trop élevé pour être faisable dans le cadre d'une seule thèse de doctorat. Par contre, la nécessité pour définir les caractéristiques d'application courante, identifier les objectifs et les critères de futures situations de travail, et présenter une architecture pour ces systèmes sont des problèmes envisageables dans le cadre de ce travail.
Lors de ce travail, on développe des nouvelles méthodologies, techniques et outils, pour concevoir l'agent de l'analyse de risque, en partageant la même base de données que le système de conception technique, afin d'en faciliter l'utilisation, avec un coût et un temps acceptable pour le concepteur.
Ce travail appartient à une série de travaux qui se réalisent dans le cadre de l'équipe IVGI (Ingénierie Virtuelle pour le Génie Industriel), avec l'objectif de proposer des concepts, modèles et méthodes dans le but de développer des outils et des techniques pour faire l'analyse économique, l'analyse de performance et l'analyse de risque, au niveau du système, lors de la conception industrielle.

1.1.1. Sommaire de problème

Actuellement de grandes catégories de modèles sont développées pour modéliser les divers aspects reliés à la présence de l'homme dans la SDT. Cette diversité est le résultat du fait d'utiliser différents moyens scientifiques et technologiques pour atteindre différents objectifs. Ces modèles séparés et indépendants ne conviennent pas aux besoins des concepteurs pour faire l'optimisation globale et multi–critère simultanée aux niveaux d'analyses technique, de productivité, de sécurité, des facteurs humains et de coût.
Un modèle plus complet, adaptable et applicable, est nécessaire pour s'intégrer dans les applications industrielles.

1.1.2. But

Dans ce travail, l'objectif est de présenter les approches et outils de modélisation de SDT appropriés pour la formation et la simulation lors de la conception et l'industrialisation de systèmes.
Dans une vue globale, on s'intéresse à toutes les méthodes de modélisation de l'aspect humain, et de manière plus précise, on développe des méthodes pour intégrer des analyses simultanées de risque et performance.
Le but de ce travail est de proposer un méta–modèle qui constitue la base de nouvelles méthodologies, modèles, et outils pour améliorer le niveau de prise en compte de l'homme dans les situations de travail, suivant les aspects suivants :

- Faisabilité : adaptation de la SDT (travail, solution technique, environnement et conditions de travail) avec la force, les attributs et le savoir–faire de l'opérateur,
- Sécurité : évaluation de risque pour garantir d'avoir le niveau du risque professionnel minimum et inférieur au niveau acceptable,
- Performance : avoir le meilleur résultat qualitatif, quantitatif avec les ressources minimums ou données,

- Facteurs humains : optimisation du confort, du bien–être et de la charge de travail de l'humain dans la SDT.

Ces aspects seront mesurés pour comparer et optimiser les configurations de systèmes.
En plus, les modèles développés doivent être compatibles avec d'autres modèles utilisés dans la conception du système pour le transfert des données statiques, et exécuter les modèles interactifs et les simulations ((ONR, 2000) et (Shahrokhi et al., 2006a))

1.1.3. Objectif

Nous nous sommes intéressés aux sujets suivants :

- La définition et les caractéristiques des situations de travail suivant une vue multi–agents,
- Les applications et les outils de modélisation de l'homme dans la situation du travail,
- La proposition d'une architecture multi–agents pour de futurs systèmes de modélisation de l'homme dans la SDT,
- L'intégration de l'analyse de risque lors de la conception de système,
- Le développement des outils d'optimisation multi–objectifs pour optimiser la sécurité et la productivité lors de la conception.

Nous allons essayer également de répondre aux questions suivantes posées par (Fadier, 2003) : *«*

- *Comment les concepteurs et le processus de conception, pensent à la sécurité et approchent la résolution des problèmes de dangers potentiels ?*
- *Devraient-ils changer leur manière de penser, de façon fondamentale ?*
- *Comment pouvons-nous soutenir des concepteurs et des processus de conception de sorte que le risque soit mieux contrôlé ?*
- *Comment pouvons-nous aider à faire que le processus de traitement des risques, lors de la conception, soit plus explicite, transparent et cohérent?*
- *Quels sont les outils, approches et informations qui aident dans ce processus ? »*

1.2. Hypothèses

Ce travail est composé de différentes parties, et pour chaque partie, certaines hypothèses seront discutées, séparément. Dans le même temps, les hypothèses suivantes sont valables pour toutes les parties :

- La SDT est un système socio–technique composé de plusieurs sous–systèmes.
- Les frontières de ce système sont définies géographiquement, avec l'espace qui est occupé par ses sous–systèmes, de manière temporaire ou permanente.
- Les aspects intéressés dans cette étude sont indépendants des effets extérieurs ; donc on n'étudie pas les interactions du système de SDT avec les éléments externes.
- Le système de SDT peut être dans des modes variés (e.g. normal, dégradé, en panne, et accidentel (ONR, 2000)).
- L'humain est un sous–système naturel, dynamique, ouvert, et adaptatif, mais en même temps ses comportements et attributs sont supposés prédictibles. Donc on peut les modéliser (des sous–systèmes ouverts sont regardés en tant que composants en corrélation qui sont maintenus dans un état d'équilibre dynamique par des boucles de rétroaction d'information et de commande (Leveson, 2004)).
- L'opérateur humain est un sous–système raisonnable et intelligent, qui cherche à optimiser ses objectifs.

1.3. Domaine de l'étude

Ce rapport détaille les aspects suivants par leur prise en compte dans les processus de conception de la SDT :

- Modélisation et simulation de l'homme et de son travail,
- Evaluation et prévention de risque,
- Optimisation de la performance en modifiant la configuration (Lay-out) de la SDT.

Les concepts suivants ne sont pas considérés dans ce travail :

- Le système de développement des solutions techniques, sauf pour ce qui est des parties qui sont en relation directe avec l'homme ou avec sa sécurité,
- La politique et la stratégie de gestion de l'entreprise,
- L'organisation et la planification du travail dans le temps,
- Le coût, sauf pour l'estimation des conséquences d'accidents.

1.4. Méthodologie

Comme cela a été dit précédemment, la SDT est considérée comme un système. C'est un système complexe et dynamique. Dans ce système, on distingue un groupe de sous–systèmes en interaction. Les modèles de ces sous–systèmes peuvent être construits en utilisant une grande variété de méthodologies, technologies et sciences. Le comportement du système de modélisation de SDT est une combinaison simultanée de ses composants.

On se concentre presque exclusivement sur le sous–système de modélisation de l'homme, sans oublier son appartenance au système de modélisation totale de la SDT.

On décrit les domaines, applications, méthodes, outils, objectifs et résultats d'agents de modélisation et agents d'analyse, développés pour modéliser l'homme dans la SDT.

On introduit une architecture multi–agents pour regrouper ces agents.

Tout particulièrement, on envisage les systèmes de modélisation d'agent d'analyse de risque lors de la conception. Dans ce cadre, on fournit un ensemble d'approches qui peuvent être intégrées dans le processus de conception.

Ces approches sont complémentaires et sont développées pour former un système combiné. Pour faciliter la présentation, elles sont organisées dans les sections indépendantes suivantes :

- Approche de zone dangereuse : définir la zone dangereuse, comme un ensemble flou, pour considérer l'effet de la distance de l'objet dangereux et l'effet accumulé de plusieurs dangers et barrières, lors de la simulation.
- Le modèle des entités de risques : développer un système d'information hiérarchique d'entités de risque, intégrable dans le système d'information de logiciels de conception, en s'appuyant sur la modélisation du rôle de barrières.
- Approche impact : introduire une méthodologie permettant de calculer l'index de risque pour les différentes parties du corps de l'opérateur, au cours de la simulation du cycle de production.
- Analyses d'énergie : améliorer les concepts traditionnels d'analyse d'énergie, en modélisant les effets de barrières.
- Analyse de point d'accumulation de risque : développer une méthode pour identifier les évènements les plus critiques dans l'arbre d'évènements pour guider le concepteur dans le processus d'optimisation de risque total.
- Les modèles de zone de présence et de zone de danger : introduire la base théorique pour avoir une évaluation géométrique de la distribution des agents de danger et la présence de l'opérateur dans la SDT, et les effets de barrières sur eux.
- Considération des effets de barrières dans l'analyse de l'arbre des événements : modéliser les effets de réduction de la probabilité de risques par les barrières dans l'arbre d'évènements.

- L'optimisation de la trajectoire (optimisation risque/productivité) : développer un algorithme pour trouver la trajectoire la plus courte du déplacement d'un homme au sein de la SDT en minimisant le risque

1. 5. Résultats

Les résultats de ce travail peuvent être définis de la manière suivante :

- Une classification conceptuelle de techniques de modélisation de l'homme,
- Une architecture pour un système de modélisation multi–agents/ multi–échelle, pour modéliser l'homme et faire les analyses de facteurs humains, de risque, de performance et d'économie
- Une méthodologie pour analyser le risque lors de la conception, l'examiner sur la plate–forme de Delmia, pour comparer les alternatives de configuration de situations de travail.

1.6. Application

Les résultats de ce travail peuvent être utilisés pour développer des méta–modèles pour modéliser la SDT, et plus précisément pour modéliser l'homme et ses interactions avec d'autres éléments du système de SDT.
Les méthodes d'analyse de risque peuvent être utilisées dans les applications de modélisation de système de travail, et particulièrement pour la sélection de solutions techniques, de processus de productions, de lay-out ou de procédures. Elles peuvent aussi être utilisées pour évaluer le risque et proposer des mesures de prévention et des barrières pour diminuer le risque professionnel, pendant toute la vie du système.

1.7. Plan du travail

Dans cette thèse, il convient de suivre une démarche hiérarchique. Ce processus commence en regardant la SDT comme un système socio–technique. Ensuite, on décompose ce système en plusieurs sous–systèmes, parmi lesquels l'équipement de travail. Finalement, on s'intéresse à l'analyse de risque professionnel pour ce sous–système et on va développer plusieurs techniques d'analyse de risque qui peuvent être appliquées dans un agent d'analyse de risque, pour un système multi–agent de modélisation de la SDT.
La partie II concerne la présentation d'une approche systémique pour étudier le système de SDT. Le système de la SDT, ses frontières, son but, son environnement et ses éléments sont expliqués, et les facteurs relatifs à la dynamique dans la SDT sont envisagés.
Une focalisation particulière sur l'aspect humain nous conduit à définir les concepts d'ergonomie, d'ingénierie humaine, et finalement de conception centrée sur l'utilisateur.
Ensuite, on s'intéresse au processus de conception, aux mesures de validation et aux approches utilisées lors de la conception. Parmi ces approches, on envisage les concepts d'usine numérique et de réalité virtuelle.
Dans le deuxième chapitre de cette partie, on s'intéresse de plus en plus à l'aspect humain, en définissant le modèle de l'homme dans le contexte industriel. On étudie pourquoi on utilise les modèles de l'homme, et quels sont les points les plus importants pour valider cette utilisation.
Une classification de différentes techniques de modélisation de l'homme est présentée. Lors de cette classification, on va discuter les applications de chaque technique, ses contraintes, ses avantages et ses inconvénients. Cette discussion nous guidera vers le fait de savoir que chaque modèle est strictement limité à une utilisation dans un domaine et un contexte spécifié.
Dans le chapitre III, on essaye de regrouper les résultats des réflexions précédentes, en présentant une approche multi–agent et multi–échelle pour modéliser la SDT.

A l'échelle la plus large, on décompose le système de modélisation de SDT en plusieurs agents : les agents d'analyse de productivité, de sécurité, le facteur humain, l'économie, et la faisabilité. On définit le rôle et l'importance de chacun de ces agents d'analyse.
En poursuivant notre démarche, dans une échelle plus précise, nous nous intéressons au système de modélisation de l'homme et à ses exigences dans les futures situations de travail.
On essaie de répondre aux questions suivantes :

- Quels seront les critères et les objectifs de modélisation d'humain ?
- Quel changement aura lieu dans l'environnement d'utilisation de modèles d'humain ?
- Quels progrès technologique et social affecteront les futurs modèles d'humain ?

Ces questions nous amènent à présenter une approche multi–agent/multi–échelle, pour modéliser l'homme dans les futures situations de travail.
Dans cette approche on distingue les agents de modélisation et les agents d'analyse, et, en présentant une architecture pour un méta–modèle, on regroupe ces agents autour d'un système de contrôle et d'échange centralisé.
Dans la suite de cette partie, notre regard se portera sur l'agent d'analyse de risque pour l'humain.
Dans la partie III, l'utilisation des modèles d'humain lors de l'analyse de risque est envisagée.
D'abord, dans le chapitre I, nous mettons l'accent sur la définition de l'accident, l'analyse d'accidents et les causes des accidents.
Dans le chapitre II, un autre concept, le risque, est précisément étudié. Les étapes d'analyse de risque, l'identification, l'évaluation et la gestion de risque font l'objet de notre discussion.
La chapitre III concerne le développement de plusieurs approches d'analyse de risque pour être appliquées lors de la conception.
Dans la première section de ce chapitre, en définissant une nouvelle définition pour la zone dangereuse, on essaie d'introduire une technique pour présenter les dangers dans l'environnement 3D.
La deuxième section concerne la présentation d'un modèle pour intégrer les nouvelles entités issues du méta-modèle au sein du modèle général de type « produit, processus, ressources » utilisé dans le système DELMIA pour la conception de systèmes industriels.
Dans la troisième section, partie caractérisant le danger et la cible, on développe un modèle pour quantifier la sévérité du risque.
La quatrième section concerne le développement de la technique d'analyse d'énergie, pour modéliser les effets de barrières sur la probabilité et la sévérité de barrières.
Dans la section 5, on propose un modèle pour intégrer la fonction la distribution de la probabilité de présence de la cible dans la zone dangereuse et l'ensemble flou de la zone dangereuse pour identifier les points les plus dangereux dans la situation du travail.
La section 6 concerne la démonstration d'une méthode pour identifier les évènements les plus critiques par l'analyse de l'arbre d'évènements.
La section 7 de ce chapitre concerne la présentation d'une application spécifique d'optimisation simultanée risque/performance pour définir la trajectoire de l'homme dans la SDT dangereuse et encombrée, présentée dans le chapitre IV.
Une synthèse des apports et des résultats, des discussions, des conclusions et des perspectives sont présentées dans la partie IV.

PARTIE II : CONCEPTION DE SITUATION DE TRAVAIL

CHAPITRE I : LA SITUATION DE TRAVAIL

1. Approche systémique d'analyse de situation de travail

Le mot « système » vient de la langue grecque, et il signifie un tout consisté de plusieurs de parties ou un arrangement (Chen, 2003).
Nous utilisons l'approche d'analyse systémique pour décomposer les systèmes complexes en sous–systèmes plus petits et plus simples, afin qu'ils soient plus compréhensibles et plus faciles à traiter (ONR, 1998a). Dans cette approche, on essaye de définir le système, en déterminant les buts ou les objectifs et les possibilités globales du système et de l'environnement dans lesquels le système doit fonctionner, et en déterminant pour quelles fonctions de base le système a été prévu.

1.1. Définition du concept de situation de travail

Généralement, la SDT est définie par ses frontières géographiques. Selon (Oklahama, 2002), la SDT signifie n'importe quel espace défini, à l'intérieur ou en dehors d'un bâtiment ou de toute autre structure, permanente ou provisoire, où n'importe quel employé exécute n'importe quelle activité professionnelle.
(Paques, 2003) propose une définition systémique pour la SDT, en la définissant comme un ensemble d'entités physiques dans un environnement commun, liées avec le matériel agissant l'un sur l'autre, le logiciel et les éléments humains fonctionnant pour réaliser un but défini.
De notre point de vue, la SDT contient autant les aspects mentaux, d'organisations et conditions que les aspects physiques.
On accepte la définition présentée par (Licht et al., 2005) qui a défini la SDT pour un opérateur comme un ensemble comprenant l'environnement ambiant de travail et également ses outils et matériaux, ses méthodes de travail, l'organisation de son travail, et les interactions psychologiques et sociologiques.
La SDT est un système artificiel, socio–technique, dynamique, ouvert. Ses entrées sont des matériaux, de l'énergie, du travail et de l'information, et ses sorties sont les produits, et les matériaux secondaires.
Les pollutions, et les conséquences des accidents sont des sorties indésirables de ce système.

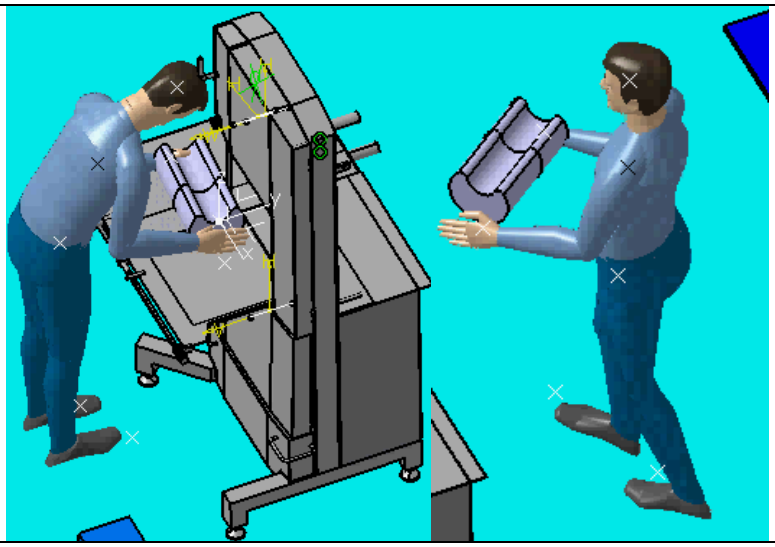


Figure 1. Les photos schématiques d'un opérateur de scie à ruban

Pour illustrer l'application de nos propositions, dans ce rapport, on introduit et on utilise les concepts et caractéristiques relatifs à une machine de type « scie à ruban » qui est utilisée par

un opérateur pour couper la viande (figure 1). C'est une situation de travail générique et on l'appellera STG. Les spécifications de cette machine sont présentées dans (EN, 2003).

1.1.1. Frontière du système de la situation de travail

Le système de SDT, selon nos hypothèses, est limité géographiquement par l'emplacement de solutions techniques, matérielles et des équipes de travail.
En fonction de l'objectif de l'étude, les systèmes de soutien et de service technique et administratif pour ce système de base peuvent être considérés comme une partie du système ou comme des systèmes séparés.
Une usine, et dans une échelle plus petite un poste de travail avec un opérateur qui déplace des matières peuvent être des exemples d'une SDT.
Pour ce qui concerne la relation homme – environnement, dans cette étude, nous supposons qu'il y a au minimum une personne qui travaille (l'opérateur de production, de contrôle ou de maintenance) dans cet environnement.
D'un point de vue social, notre définition de la SDT sera comme un système de production avec les gens qui travaillent seuls ou en groupe, suivant une forme d'organisation et de coopération définie.
Les frontières géographiques de la STG se définissent par l'espace balayé par l'opérateur, les matériels qu'il porte, et la machine, les outils et les accessoires qu'il utilise lors de son travail. On ajoute les espaces temporaires occupés par les membres des équipes de maintenance et de supervision, lorsqu'ils travaillent pour réparer et contrôler ce système.

1.1.2. Le but du système de la situation de travail

Sur le plan technico-économique, le but du système de SDT est de mieux utiliser les ressources (ou minimiser les ressources) pour avoir le maximum de valeur ajoutée, en minimisant les sorties indésirables et les risques dans le système.
Dans ce cas, l'énergie, la matière, le temps, l'espace et les ressources humaines sont globalement considérés comme des ressources. Réduire les ressources, les sorties indésirables et le risque, ceci parfois n'est pas formulé sous forme d'objectifs, mais sous forme de contraintes, en définissant une limite maximale pour eux.
Mais de notre point de vue, nous ajoutons que la sécurité et la satisfaction de l'équipe de travail, qui sont considérés actuellement comme des critères dans les sociétés modernes, doivent trouver leurs places parmi les objectifs et le but du système.
Le but de STG est de couper la viande le plus rapidement possible, en respectant la qualité et la sécurité de travail.

1.1.3. L'environnement de la situation de travail

La SDT est entourée par :

- L'environnement naturel, qui impose les conditions climatiques, et météorologiques,
- L'environnement social qui directement détermine les conditions et les règlements locaux du travail et des opérations, et qui indirectement a des effets sur les spécifications des ressources humaines,
- L'environnement économique, qui entraîne une évolution des contraintes et des objectifs au niveau des problèmes d'optimisation,
- L'environnement technologique, qui détermine les modes de communication et de coopération avec les systèmes externes,
- L'environnement politique et juridique, qui détermine la stratégie de développement et de contrôle.

Comme cela a été souligné dans l'introduction, il paraît important de rappeler que ce travail ne considère pas les relations de la SDT avec l'environnement externe.
L'environnement de la STG se définit par l'aire autour de STG, les autres personnels ayant des contacts avec l'opérateur, la situation économique de l'usine, et les éléments technologiques, politiques et juridiques du monde extérieur qui ont un effet sur le système.

1.1.4. Eléments du système de la situation de travail

Selon la théorie du système, un système a certaines fonctions et peut être divisé en sous–ensembles (Chen, 2003). Selon (Leveson, 2004), la définition du système nécessite d'avoir des structures hiérarchiques entre le système et ses sous–systèmes, où chaque niveau impose des contraintes à l'activité du niveau inférieur. (Leveson, 2004) constate que ces contraintes ou le manque de contraintes à un niveau plus élevé permet ou commande le comportement de niveaux plus bas, ce qu'exige la définition des processus de contrôle de fonctionnement aux interfaces entre les niveaux.
Spécifiquement, et c'est ce qui nous intéresse, il y a un grand effort pour modéliser les relations homme– système et définir les interfaces correspondantes.
La SDT est considérée par (Määttä, 2003) et (Kennedy, 1998) comme un système homme – machine, ce qui veut dire une combinaison d'un ou plusieurs êtres humains et composants physiques agissant l'un sur l'autre pour former des sorties désirées.
Selon (Kennedy, 1998), la SDT est un mélange des composants physiques (par exemple équipements, lieux), de la structure d'organisation et des « attributs » des employés travaillant (par exemple qualifications, connaissance, attitudes).
(PSA, 2005) a une vue systémique –organisationnelle, quand il décrit la SDT avec les sous–ensembles suivants (figure 2) :

- Technologie,
- Equipe de travail,
- Environnement organisationnel,
- Organisation,
- Individus,
- Relations entre eux.

Dans ces définitions, le système comporte deux sous–ensembles essentiels, les systèmes technologiques et les systèmes sociaux, qui se complètent. Cette définition distingue l'humain, pour appuyer sur son rôle, son importance et ses besoins dans la SDT.
Les systèmes technologiques sont eux considérés comme plate–forme de travail. Ces systèmes ont besoin d'énergie, de matériels, de maintenance et de conditions favorables d'utilisation.
Le regard de (Leveson, 2004), essentiellement, n'est pas très loin de cette vue, quand il considère un système de production en tant que quatre sous–ensembles : physique, humain, informationnel et de gestion.
Le second type de structuration de SDT peut être basé sur les composants de processus de production, faite par (O'Hara, 1995), partageant les sous–composants : (1) Service, (2) Unité opérationnelle, (3) Équipement et outils, (4) Équipe de travail, (5) Matériel, et (6) Énergie.
En partant de la même base, (Viganò et al., 2004) a décomposé un système de production en modules des unités de production et les unités d'environnement et leurs composants.
Ces classifications sont basées sur un concept générique techno-centré, avec l'objectif de faciliter le processus de conception et l'analyse de production.
Pour envisager, plus précisément, l'interaction de l'homme avec les autres éléments, nous considérons la SDT comme étant composée des sous–ensembles suivants :

1. Des équipes de travail,
2. Des solutions techniques (solutions physiques et solutions logiques),

3. Des matériels,
4. Des conditions de travail,
5. L'environnement de travail.

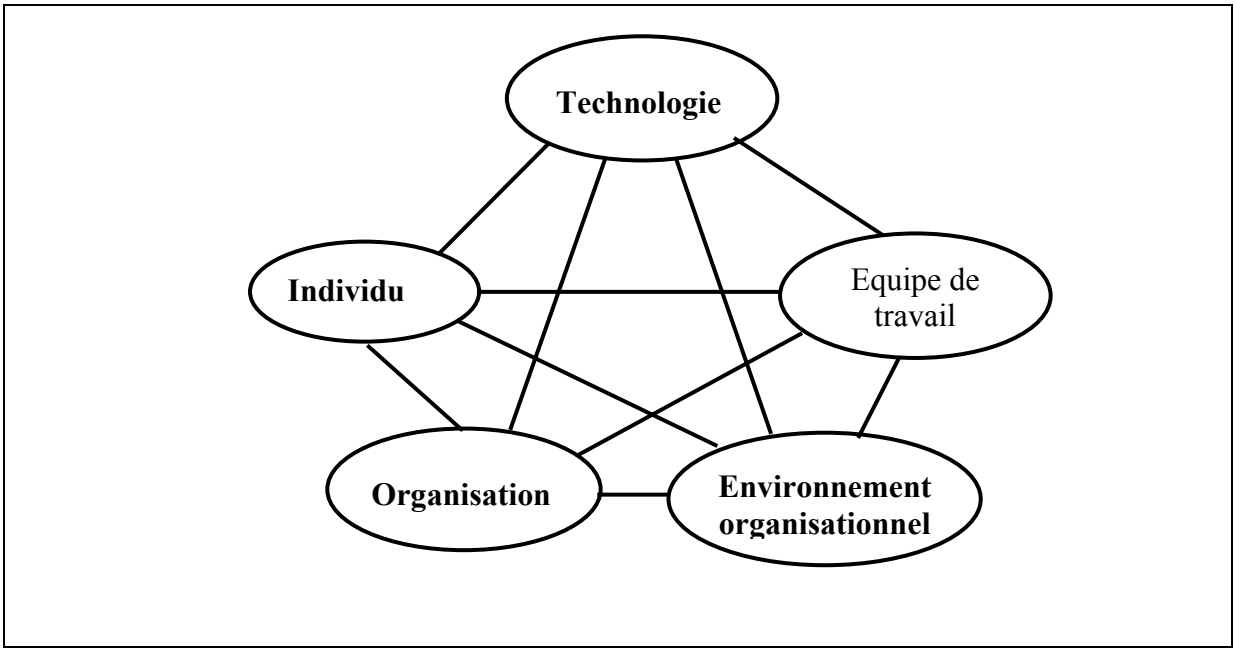


Figure 2. Le modèle d'interaction homme–situation de travail (PSA, 2005)

On considère que l'énergie et l'information font toujours partie d'un des sous–systèmes déjà définis, car elles accompagnent toujours une solution technique physique, un matériel ou une équipe de travail.
Les éléments de la STG sont l'opérateur, l'équipe de maintenance et de supervision, les éléments matériels qu'ils traitent (e.g. la viande) ou utilisent, et la machine, les outils, les accessoires et les procédures et normes qu'ils utilisent, lors de leur travail.

I. Solutions techniques

D'une manière logique, (Harrissona et al., 2003) sépare les aspects « hardware et software » de la solution technique, en la définissant comme un concept hybride qui inclut des outils et des machines d'une part, et des procédés et des procédures de production de l'autre.
A notre avis, les solutions techniques sont utilisées pour mener à bien des travaux. Ce peuvent être des solutions physiques, comprenant des machines, des outils et/ou des accessoires ou des solutions logiques relatives au logiciel d'ordinateur, des procédures, des normes et des instructions de travail.
Les équipements de sécurité, les bâtiments, et tous les équipements qui délivrent un service au système de production pour le contrôler et le maintenir sont des solutions techniques.

II. Equipes de travail

L'équipe de travail inclut toutes les personnes qui travaillent pour rendre et maintenir le système de production opérationnel tel que des opérateurs, des ingénieurs et le personnel d'entretien. La définition de l'opérateur a évolué au cours de temps. La première définition avait concerné les personnes qui sont impliquées directement dans les processus de production. Bien que la nouvelle technologie de commande augmente la distance physique et conceptuelle entre les opérateurs et les systèmes d'opération (Leveson, 2004), la prise de

décision humaine doit encore être explicitement considérée dans les cas de sécurité, dans les systèmes de production complexes (Jo et al., 2003). Ce changement dans le mode d'intervention de l'homme augmente le niveau de définition de concept de l'opérateur comme un contrôleur de processus de production ; mais d'autre part, selon (Leveson, 2004), cette distance, c'est une source de danger, car beaucoup d'informations sont perdues par les opérateurs, puisqu'ils ne peuvent plus sentir directement l'état des processus avec leurs propres sens. Même dans le futur, avec l'augmentation de l'automatisation, et de la concentration du rôle des opérateurs sur des dépannages et des interventions dans les situations d'urgence et accidentelles, la caractéristique unique de capacité d'adaptation et de prise de décision dans les situations inconnues augmente l'importance des humains (Van der Schaaf, 1995).

III Matériels

Les matériels peuvent être utilisés directement dans les produits ou être consommés lors de la production ou alors être une partie secondaire de produit.
Dans ce travail, les matériels (ou matériaux) qui sont consommés, lors de la production, (sans être présents dans le produit final), et les consommables qui sont utilisés pour maintenir les équipements ne sont pas distingués ; et tous sont regroupés dans une même catégorie. C'est parce que ces classifications ne sont pas essentielles dans les propositions de ce travail.

IV. L'environnement et les conditions de travail

Selon nos définitions, l'environnement est un ensemble de facteurs incontrôlables qui sont les résultats de la nature du travail ou de la conception non modifiable du système.
Par contre, les conditions de travail sont les facteurs contrôlables dans la situation du travail, qui produisent un effet sur l'équipe de travail ou sur d'autres sous–systèmes, et incluent des conditions physiques, d'organisation, et psychologiques.
L'organisation a une place importante qui contrôle la majorité des conditions de travail. Selon (Harrissona et al., 2003), l'organisation est toute entité structurale opérationnelle ou de gestion qui exerce le contrôle du système, mais non limité aux étapes de développement, conception, fabrication, essai, entretien, opération, et disposition du système.
Pour nous, les plus importants de ses facteurs sont la planification, les horaires de travail, la définition de groupes de travail, les modes d'intervention, la qualité du travail, la supervision, la communication et la documentation.
Les différentes dimensions de la dynamique de la SDT sont également très importantes et cela nous amène à devoir comprendre l'importance de l'adaptabilité et de la flexibilité de techniques pour modéliser ces aspects.

1.2. Dynamique de la situation du travail

La dynamique est décrite par (Ranta, 2004) comme l'évolution de l'état des systèmes et comment les commandes agissent.
Pour un système industriel, cette dynamique peut être influencée par plusieurs facteurs dont les principaux sont : le cycle de vie de la SDT, le cycle de vie du produit et le cycle de production.
On définit le cycle de vie comme un ensemble de périodes qui définit les processus de naissance, maturation et mort d'un concept.
(Määttä, 2003) a présenté les phases suivantes pour le cycle de vie d'une SDT :

1. planification,
2. étude préliminaire,

3. développement du système,
4. création du système,
5. installation du système,
6. implantation du système,
7. fonctionnement du système,
8. remplacement du système.

Notre travail est consacré aux développements des modèles pour être appliqués dans les quatre premières phases de cette liste, qui concernent (Määttä, 2003) : la définition de l'ensemble des demandes et les orientations pour concevoir le système, l'évaluation de la possibilité technique du système, le développement de la technologie choisie, pour satisfaire les demandes appropriées et la détermination des paramètres et des spécifications opérationnelles des systèmes.

Le cycle de vie d'un produit qui s'appuie sur des SDTs est composé de plusieurs phases : recherche de marché, analyse, conception, production (ou installation) et destruction/démantèlement (TUC, 2006). Une SDT peut produire plusieurs produits. La sélection de la combinaison idéale, pour la diversité de produits et la flexibilité du système de production, est une caractéristique du niveau de complexité de la conception de situations de travail.

On définit « le cycle de la vie de la production d'un produit » comme la durée de l'évolution des matériels pour former le produit final. Il se caractérise par un ensemble de processus, sous la forme des séquences d'activités de production.

Chaque processus, en lui même, se fait sous forme d'une série organisée de tâches physiques, cognitives ou combinées (CVU, 2006). La définition des processus et des taches explique la façon d'accomplir, l'ordre, les ressources et les conditions de l'exécution des activités (Martin et al., 2002). (Hasan, 2002) présente une définition de la tâche, en la distinguant de l'activité, selon cette définition, la tâche est « *un but à atteindre, qui concerne un changement déterminé de l'état d'un objet, mais l'activité est le comportement d'un acteur, déterminé en situation de travail* ».

1.2.1. Evolution des situations de travail

Les situations de travail sont des systèmes fortement affectés par les progrès technologiques et l'apparition de méthodes de gestion. D'autres facteurs importants sont la demande de marché et de ressources et les règlements imposés pour chaque pays.

L'évolution des situations de travail induit un certain nombre de modifications à plusieurs niveaux (Fadier, 2003) :

1. Au niveau technique : augmenter la fiabilité théorique des composants techniques et l'optimisation de la productivité du système
2. Au niveau économique : une réduction des coûts et une compétitivité industrielle
3. Au niveau de l'organisation : nouveaux systèmes de gestion (basés sur la technologie informatique)
4. Au niveau de la prévention (sécurité) : une augmentation des normes techniques pour l'intégration de la sûreté dans la conception, une chute significative du nombre d'accidents, une évolution réglementaire vers la nouvelle approche (engagement de résultat)
5. Au niveau de l'activité humaine : une modification de la nature de l'activité de travail (travail plutôt mental que physique, intervention en mode dégradé, travail collectif, utilisation croissante des interfaces homme–machine)
6. Au niveau de la conception : l'apparition des outils d'ingénierie concourante, la réduction des délais et des coûts de conception

Lors de ces évolutions, l'importance augmente pour structurer le travail avec un ensemble d'outils, pour soutenir la décision basée sur la connaissance empirique (Cunha, 2001), et pour améliorer la communication multidisciplinaire lors de la conception.

1.3. Situation de travail : un système socio-technique

Dans les anciens systèmes, les solutions techniques étaient construites du point de vue du logiciel et de la technologie matérielle et indépendante de point de vue des opérateurs. Les opérateurs étaient placés dans le système seulement pour contrôler la fabrication (Määttä, 2003).

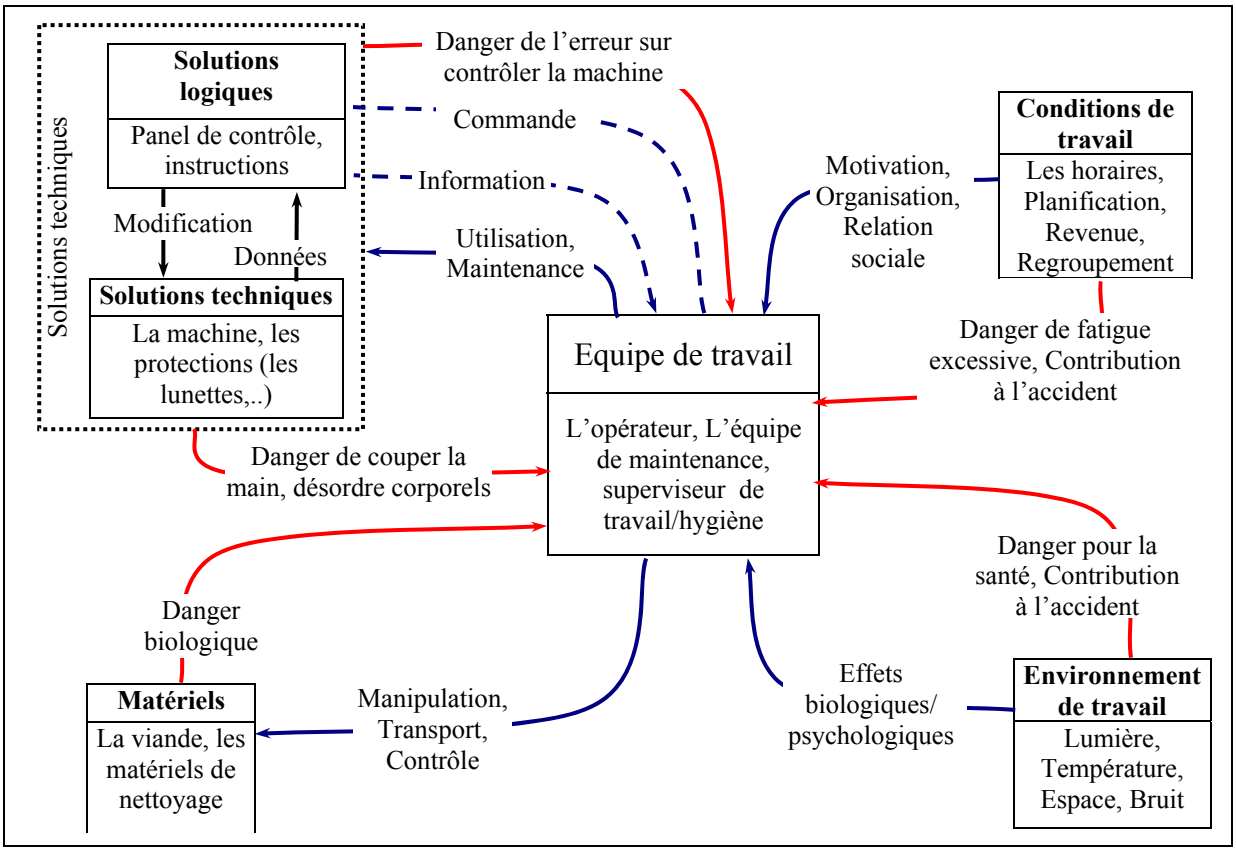


Figure 3. L'interaction de l'opérateur de scie à ruban avec autres sous-systèmes de SDT

L'approche de conception socio–technique a été introduite comme une alternative à l'approche purement technique, basée sur l'idée qu'un système de production est efficace seulement si les deux sous – ensembles, l'humain et la technologie, fonctionnent et sont bien coordonnés (Määttä, 2003). Actuellement, le rôle de l'homme augmente de plus en plus, et l'humain est une partie essentielle des systèmes de production fortement automatisés. La raison principale est la créativité et la flexibilité de l'humain pour identifier de nouveaux problèmes et les résoudre. Ces capacités naturelles de l'homme sont essentielles pour prévenir et limiter les dangers avant que les dommages ne se produisent (Van der Schaaf, 1995). Dans beaucoup de systèmes modernes, des humains constituent la partie le plus intuitive, flexible et capable (ONR, 2000). Pour qu'un système utilisé par l'humain soit plus productif, efficace, fiable, et robuste, il faut tenir compte des possibilités, des limitations, des caractéristiques et

des besoins humains autant que des conditions et des limitations des technologies (TUC, 2006).
Cet aspect devient une exigence importante, présente même dans les lois. Un exemple est le contenu des lois suédoises d'environnement de travail, déclarant que « l'opérateur devrait avoir la possibilité de participer dans la conception de ses conditions de travail et du développement du travail qui concerne son activité professionnelle » (Gulliksen, 1998). La figure 1 illustre le travail d'un opérateur de scie à ruban de viande, et la figure 3 illustre les interactions entre cet opérateur et d'autres sous-systèmes de la SDT. Les principes de sécurité pour cette machine sont expliquées par la norme européenne NF EN 12268, présentées par (EN, 2003).

1.3.1. Ergonomie

En 1857, Jastrzebowski de Pologne a proposé de créer une science séparée afin d'obtenir à partir de cette science le meilleur travail avec le moindre effort et avec la satisfaction la plus élevée pour les opérateurs. Il a appelé cette nouvelle branche scientifique : « ergonomie » (ERG, 2003). Ce mot s'inspire de mots grecs : « ergon » (signifiant « travail ») et « nomos » (signifiant « loi »). Ce nom, cependant, a été oublié plus tard. Ce n'est qu'en 1949 que le scientifique britannique K.F.H. Murrell « a réinventé » le mot « ergonomie » ((Stewart, 2002), (ERG, 2003)).
Le conseil de la certification dans l'ergonomique professionnelle définit l'ergonomie comme : « un corps de la connaissance au sujet des capacités, des limitations et d'autres caractéristiques humaines qui sont définies à la conception » (TUC, 2006). L'ergonomie peut être définie, aussi, comme (CVU, 2006) « l'étude de l'interaction entre les opérateurs et leurs outils, les machines, et les procédés de travail ».
Selon (Nigay, 2002), l'ergonomie vise à l'adaptation du travail à l'homme en augmentant la confort, l'efficacité et la sécurité lors de la conception d'outils, de machines, et de dispositifs.
Les ingénieurs emploient l'ergonomie pour s'assurer que les conditions opérationnelles n'excèdent pas les capacités humaines, et pour considérer la tolérance de la performance humaine et tendre vers une minimisation des risques et une maximisation du confort de l'opérateur, en assurant la quantité et la qualité optimale de travail (Licht et al., 2005).
Appliquer l'ergonomie permet d'améliorer les lieux de travail techniquement avancés et par conséquent d'améliorer l'économie, la productivité et le niveau de sécurité (Lee, 2003). (Zink, 2003) considère que l'hygiène et la sécurité professionnelle comme une des matières les plus importantes de l'ergonomie.
D'après (TUC, 2006), l'ergonomie est une partie de domaine secondaire des facteurs humains qui traite davantage des attributs physiques de l'humain et moins des attributs cognitifs, et un ergonome a typiquement la connaissance étendue de l'exécution, de la biomécanique et des facteurs anthropométriques humains.
Mais selon (Merino et al., 2005), cette situation a changé et maintenant les aspects cognitifs et physiologiques constituent l'étude principale de la science ergonomique.
Nous poursuivons notre vision systémique en définissant l'ergonomie comme une combinaison de la science de l'art qui s'occupe de redéfinir les interactions entre l'humain et les autres sous-systèmes. L'aide du système de SDT a pour but d'atteindre les objectifs d'amélioration des facteurs humains.

1.3.2. Conception centrée sur l'utilisateur

L'introduction des approches de conception centrées sur utilisateur (CCU), pendant les années 80 (Cacciabue, 2004), a permis d'améliorer simultanément la sécurité et le confort de l'utilisateur ainsi que la rentabilité des systèmes globaux ((Lee, 2003) et (Zink, 2003)).

En réalité, les utilisateurs sont souvent impliqués seulement dans le processus de scénario et les évaluations d'un prototype complet (figure 4).
Ceci signifie qu'ils sont invités au début et à la fin de la phase de développement ((Zachary et al., 2001a) et (Gulliksen, 1998)).
Comme (Keates et al., 2005) l'a indiqué, en général, les approches de conception de systèmes ont les étapes de base suivantes :

1. définir le problème,
2. développer une solution,
3. évaluer la solution.

Selon l'approche CCU, des aspects humains doivent être considérés très tôt et pendant le processus de conception, et avant que les détails d'une conception soient déterminés ((CAM, 2002a), (ONR, 2000), (Zachary et al., 2001b) et (Määttä, 2003)).

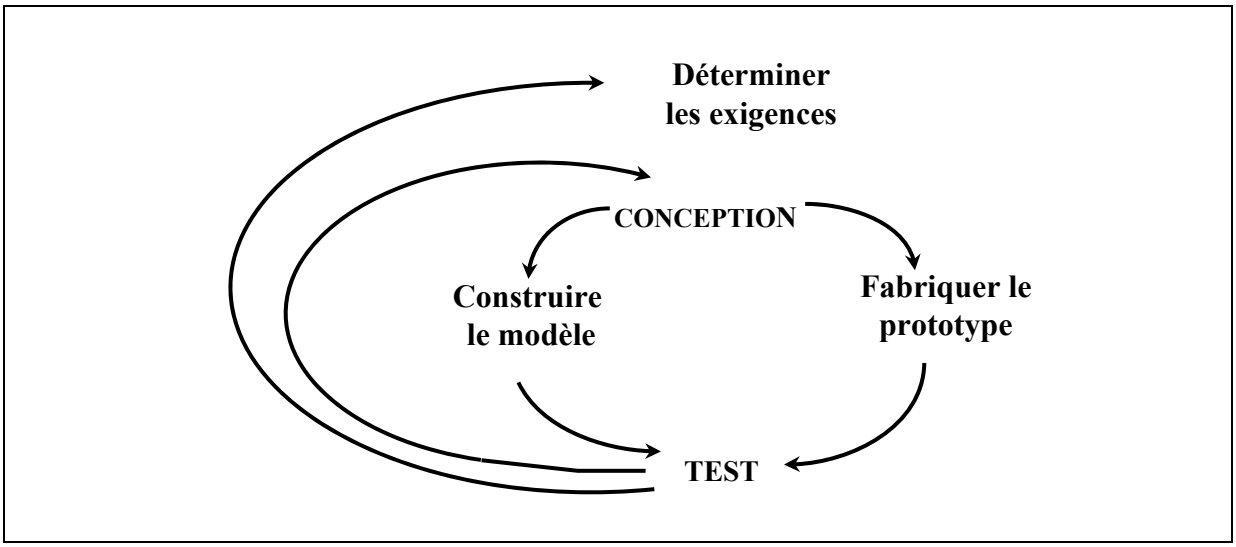


Figure 4. Application de modèle humain dans la validation de système (Zachary et al., 2001a)

L'identification des contraintes humaines est l'un des aspects les plus essentiels et les plus difficiles dans cette approche (Gulliksen, 1998), qui implique des domaines tels que la conception ergonomique, la conception sensorielle, l'ergonomie cognitive, etc. (Maxant et al., 2005).
Les principes de base de l'approche anthropocentrée sont (Gulliksen, 1998):

1. une attribution appropriée de fonction entre l'utilisateur et le système,
2. une participation active des utilisateurs,
3. des itérations des solutions de conception
4. des équipes de conception multidisciplinaires

La meilleure manière d'obtenir la rétroaction des utilisateurs représentatifs est de leur fournir des exemples de la façon dont le système serait actionné et de ce que l'interface utilisateur pourrait inclure (ONR, 2000).
Pour répondre à ces conditions, des scénarios pour l'usage du système doivent être définis en intégrant le point de vue de l'utilisateur.

1.4. Les processus de conception

Des processus de conception peuvent être définis en tant qu'une série systématique d'actions pour concevoir un produit, un système ou un projet (Jensen, 2002).

La conception de situations de travail est une collection d'efforts multidisciplinaires qui incluent la conception des espaces et des machines physiques, des matériels, des processus et des organismes pour produire la valeur ajoutée. Elle se compose des activités itératives et fortement interactives et organisées (Zha et al., 2003).
(Zachary et al., 2001b) a catégorisé la conception « conventionnelle » et la conception « révolutionnaire ». Pour la conception conventionnelle, il propose une approche basée sur l'utilisation des informations et des bases de données déjà élaborées. Pour la conception révolutionnaire, il propose une analyse systématique en décomposant le projet en tâches élémentaires, en analysant et en concevant ces tâches élémentaires, en intégrant les résultats, et en effectuant des simulations évaluatives.
L'idée de décomposition successive des systèmes est poursuivie, aussi, par (Tong et al., 2002) et (Zha et al., 2003), qui affirment que la conception industrielle est itérative et fortement interactive, en décomposant le système en sous–ensembles, qui sont eux–mêmes décomposés dans des sous–ensembles secondaires, etc.
Cette idée, aussi, est utilisée par (ONR, 2000) pour des fonctions qui doivent continuer jusqu'au moment où les attributs des sous–fonctions sont nécessaires pour soutenir des décisions de conception.
Mais, d'un autre coté, la décomposition complique les processus d'échange de l'information, lors de la conception, car l'information doit être diffusée à travers la hiérarchie.
De ce fait, la gestion des informations de conception de situations de travail est une tâche complexe et coûteuse (Giannini et al., 2003).

1.5. Approche numérique

Les approches numériques sont des méthodes basées sur l'utilisation de l'ordinateur pour simuler, évaluer et optimiser la conception. On peut considérer ces méthodes à deux niveaux : (1) usine numérique et (2) réalité virtuelle.
L'usine numérique, dans notre vue, est un ensemble de simulations de situations de travail, basée sur les méthodologies d'analyse et de calcul, et graphique. Le deuxième niveau, la réalité virtuelle, est basé sur le fait de donner la sensation immersive et l'interaction avec l'utilisateur, en temps réel. Cette approche a bien progressé durant les dernières années, à cause du développement des nouvelles technologies, dans le domaine informatique, et interfaces qui fournissent une interaction mutuelle entre l'homme et l'environnement artificiel.

I. Usine numérique

La complexité croissante du système de conception ainsi que les challenges réels de concurrence suggèrent la nécessité des techniques avancées de simulation pour traiter des données issues des grandes quantités d'information de conception (Henriques, 2001) (Linner et al., 2000).
L'augmentation de la fréquence de planification signifie que les secteurs d'activité ont impliqué le besoin d'être rassemblés tôt dans le procédé de planification d'usine. Ceci devrait être basé sur l'information qui est intelligible de tous (Wiendahl et al., 2005). Depuis plusieurs années, les concepteurs ont une forte motivation pour employer des modèles de conception basés sur la simulation (ONR, 1998, b), parce que cela permet d'économiser du temps et de l'argent (Seitz et al., 1999).
L'usine numérique est une représentation qui est contenue dans des applications informatiques, incluant les opérations de fabrication, la connaissance de processus, des investissements et coûts variables, de la logistique, de programmes pour des opérations automatisées et des définitions des opérations manuelles (Linner et al., 2000).

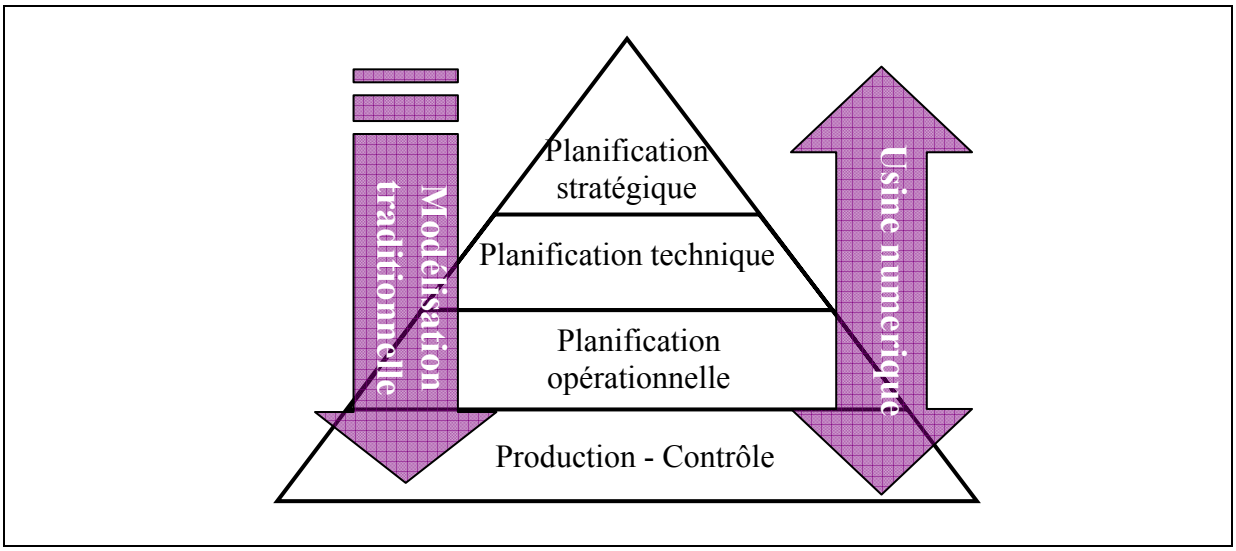


Figure 5. Comparaison du processus avec la méthode traditionnelle et avec utilisation de l'usine numérique (Shahrokhi et al., 2004a)

Ces données réduisent le manque de confiance dans les résultats prévus quand une stratégie spécifique de conception ou de planification est mise en application. Elles permettent de faire un ensemble d'analyses qui soutiendra la prise de décision (Henriques, 2001).
En utilisant cet outil, chaque participant à la planification pourrait montrer aux autres son propre contexte particulier au moyen d'un modèle qui est près de la réalité (Wiendahl et al., 2005).
En utilisant l'usine numérique, trois niveaux d'analyse sont réalisables (Bruccoleri, 2002) : (1) le niveau du système, (2) la machine, et (3) le niveau processus.
La figure 5 compare des étapes de procédé de planification en usine numérique et les techniques traditionnelles. Dans cette figure, les étapes basiques de la conception et de la planification sont illustrées. Dans les modèles traditionnels, le procédé de planification a un ordre hiérarchique de la planification totale à la planification détaillée. Avec la possibilité de visualiser et d'évaluer le résultat de la conception, et de modifier le plan, sans perte d'argent et de temps considérable, la conception numérique devient un outil de conception, qui rassemble toutes les étapes de conception dans des processus simultanés. Une autre différence de base en usine numérique est la possibilité bi–directionnelle de planification. La durée d'un cycle et le coût de modification ont diminué et dans la phase de planification, la planification stratégique sera influencée par des étapes d'opération et de contrôle.

II. Réalité virtuelle

Selon (Iowa, 2004a), la définition de la réalité virtuelle (RV) est tout à fait floue et donne lieu à discussion.
(Määttä, 2003) et (Wiendahl et al., 2005) ont considéré la RV comme une visualisation tridimensionnelle et rapide, dans laquelle on crée un monde modèle qui est très près de la réalité.
(Abdel-Malek et al., 2004a), (Rix et al., 1998), (STZ,1999) et (Määttä, 2003) présentent les points techniques de la modélisation de l'environnement virtuel.
La fabrication virtuelle est un mélange des objets et des processus vrais–simulés, qui est un environnement de fabrication intégrée et synthétique exercé pour augmenter tous les niveaux de production, de décision et de contrôle (Bruccoleri, 2002). Elle est particulièrement appropriée à visualiser les résultats intermédiaires et finaux de différentes parties du procédé

de planification d'usine (Wiendahl et al., 2005). Selon (Wiendahl et al., 2005), la RV peut servir en tant que plate-forme multidisciplinaire pour la coopération des différents spécialistes techniques durant le processus de conception, car il fournit un modèle uniforme et compréhensible de données.
Selon (Wiendahl et al., 2005), l'application de la RV pour la conception de situations de travail présente les avantages suivants :

- Administration simplifiée de données,
- Manipulation de volumes élevés de données,
- Présentation compréhensive générale,
- Manipulation de données complexes,
- Planification avec des données imprécises,
- Présentation de différentes variantes de planification avec un faible effort de temps et de coût,
- Soutien de planification coopérative avec l'augmentation de vitesse et la diminution de coût,
- Prévention des redondances,
- Prévention des efforts de changement dus à la détection précoce des erreurs,
- Près de la représentation de la réalité,
- Participation des employés,
- Plate–forme de communication,
- Coopération interdisciplinaire,
- Fiabilité de planification,
- Degré élevé d'augmentation d'acceptation de qualité de la conception.

Comme exemple de l'amélioration produit par cette technique, la compagnie Ford déclare que, dans le domaine du développement de produit, la RV permet à 40 variantes d'être examinées dans le temps nécessaire à l'examen d'une seule autrefois (Wiendahl et al., 2005).

1.5. Validation de la conception

Une conception doit être validée par rapport à une certaine norme ou repère (Zachary et al., 2001b).
Selon (Keates et al., 2005), la validation est une partie du processus de conception et c'est une revue pour s'assurer que les critères de conception sont pris en compte et satisfaits.
Les objectifs de conceptions peuvent être étendus, complexes et difficiles à comprendre (Määttä, 2003). D'un point de vue opérationnel, les divergences peuvent alors apparaître entre différentes références ou entités, par exemple les concepteurs et les utilisateurs d'une machine (Zhang et al., 2004).
En se basant sur une vue technico-économique, on peut distinguer les niveaux de validation suivants pour une SDT (Keates et al., 2005) :

- La fonctionnalité,
- L'exploitation dans le délai acceptable, et avec le coût minimum,
- La productivité élevée.

De la même manière, (Martin et al., 2002) a considéré que l'objectif commun des compagnies d'aujourd'hui est d'être concurrentiel en termes de coût, réactivité et qualité. Il a distingué les contraintes suivantes :

- Des contraintes de production,
- Des contraintes économiques,
- Des contraintes de la logistique,
- Des contraintes législatives.

De ce point de vue, l'aspect humain est souvent considéré comme un critère à un niveau très élevé, qui doit être considéré à la fin de la conception, après qu'on s'assure que les critères aux autres niveaux sont satisfaits.
(Polet et al., 2003) propose les critères : (1) Productivité, (2) Qualité, (3) Sécurité et (4) Charge de travail pour évaluer l'exécution du système homme–machine.
En considérant les aspects techniques et économiques, on considère les critères : (1) faisabilité, (2) productivité, (3) fiabilité, (4) sécurité et (5) les facteurs humains, comme les critères les plus importants.

2. Modélisation de la situation de travail

Les approches de modélisation des organismes ou des industries complexes, emploient la théorie des systèmes, en divisant le système en niveaux hiérarchiques de structures, procédés de contrôle de fonctionnements, et interfaces entre les niveaux (Leveson, 2004).
Une modèle intéressante de la SDT est développée par (Hasan, 2002). Dans ce modèle, les concepts essentiels dans la situation de travail, comme l'équipe de travail, le système technique, les phénomènes dangereux, et leurs interrelations sont détaillés, pour développer une plate-forme de documentation et traitement de risque, lors de la conception.
Dans notre modèle, nous n'utilisons pas directement ces concepts, par contre, pour avoir un modèle dynamique des processus de conception, nous les modélisons comme un système multi–agents, et les paramètres des concepts proposés par (Hasan, 2002), peuvent être manipulés par ce système pour avoir le meilleur résultat lors de la conception
Un système multi–agents est un système pour décomposer un problème, qui permet de faire émerger des formes complexes de comportement de l'interaction, des formes plus simples du comportement (Juchmes et al., 2005) comme base d'une organisation des agents (Mellouli et al., 2002).
Bien que la définition classique de systèmes multi-agents concerne les systèmes purement informatiques, de notre point de vue, les agents peuvent être les systèmes de modélisation et d'analyse informatique ou un groupe d'hommes qui coopèrent et travaillent pour optimiser les objectifs prédéfinis.
Donc, l'équipe d'analyse de risque est un agent qui travaille avec les concepts de risque, de phénomène dangereux, etc. pour augmenter la sécurité, et d'autre part le bureau des études est un autre agent qui fait son travail pour augmenter la fiabilité et la performance du système dans le domaine faisable. La différence c'est que dans le modèle multi-agent, chaque agent a une vue différentes sur le système, selon son objectif et son rôle.
En fait, la distinction de ces agents apparaît naturelle, car même s'il y a énormément d'effort pour intégrer l'analyse de la sécurité et du coût dans le travail de bureau des études techniques, il semble que, finalement, définir les responsables indépendants pour ces objectifs est plus efficace. Donc, naturellement lors de la conception, les différents agents travaillent pour avoir un système permettant l'atteinte des différents objectifs.
Si on essaye de classifier les activités de « système de modélisation de la SDT », sous la forme d'agents, on distingue deux rôles importants pour eux :

- La modélisation : représenter le comportement et les attributs des systèmes en accord avec certains scénarios prédéfinis, en utilisant des modèles descriptifs, maquette ou numérique.
- L'analyse : évaluer, comparer ou optimiser les paramètres et le comportement des systèmes, en prenant en compte les résultats du processus de modélisation et en appliquant les modèles de science humaine, physique, mathématiques, et informatique.

Les activités de modélisation sont divisées en deux :

- Agent de modélisation d'apparence représentant la SDT et ses attributs dans une forme compréhensible pour utilisateur, en utilisant les modèles descriptifs.

- Agent de modélisation de comportement qui prévoit le comportement du modèle et calcule les paramètres et les attributs du système, par rapport à des scénarios prédéfinis pour le système. Il modélise le flux et la transformation de l'information, de l'énergie, des matériels et des humains dans le système. Cet agent utilise les modèles physiques, les sciences humaines, la recherche opérationnelle et les modèles de simulation assistée par ordinateur.

De la même manière, on distingue les agents d'analyse suivants :

- L'analyse de faisabilité qui examine que le système satisfait les exigences prévues, y compris l'exploitation de plan, avec les coûts, le niveau de technologie et le temps acceptable.
- L'agent d'analyse de performance (productivité) qui examine et optimise l'efficacité de l'utilisation de ressources (y compris le temps) lors de la production.
- L'agent d'analyse de risque calcule et évalue la probabilité et les conséquences d'accidents et de maladies professionnelles, et cherche la meilleure façon de les diminuer.
- L'agent d'analyse de coût qui calcule et minimise les valeurs économiques des ressources consommées et maximise les valeurs économiques ajoutées par le système.
- L'agent d'analyse de facteur humain qui évalue et améliore la satisfaction de l'homme et l'adaptation du lieu de travail avec ses besoins.

Dans ce travail, on explique comment dans une structure matricielle hiérarchique de ce système, le sous–système de l'équipe de travail peut être modélisé.
La table 1 montre quelques-uns des plus importants sujets envisagés pour les agents d'analyse (productivité, sécurité, facteur humain et coût) pour la SDT et ses sous– systèmes.

Table 1. Les échelles d'application des agents de modélisation de la situation de travail

	Agent			
Système	Productivité	Sécurité	Facteur humain	Coût
Situation de travail (Système global)	Lay–out, Processus, Programmation, maintenance,…	Lay–out, système de sécurité, Supervision, Processus, Système d'urgences, Evacuation, …	Lay–out, Processus, condition de travail,…	Installation, Consommation, Risque,…
L'équipe de travail	Tâche, Ergonomie, Motivation, Formation, Compétence…	Tâche, Barrières, Erreur, Processus de sécurités, Formation,…	Confort, Ergonomie, Charge de travail,…	Programmation, Regroupement, Formation, Retraite, ..
Solution technique	Disponibilité, Taux de production,...	Danger, Barrières, Alarme, Processus…	Ergonomie, Interfaces homme–machine,….	Prix, Flexibilité, Maintenance, Productivité, Cycle de vie,…
Matérielles	Caractéristique mécanique,…	Dangers, …	Portabilité, Facilité d'utilisation,…	Prix, Consommation, …
Environnement de travail	Effets sur la disponibilité de l'équipement,…	Effets sur le danger, ….	Effets sur le confort, …	Effets sur la productivité et accidents,…

Chacun de ces agents peut être appliqué à différentes échelles. Par exemple, pour les solutions techniques, on peut envisager les échelles suivantes : un système de production, la ligne de production, une machine, un mécanisme, un composant, une pièce, et finalement une structure moléculaire. Dans chaque échelle, le comportement des agents de l'analyse sera différent, et doit être défini séparément.
On se concentre sur la modélisation de l'équipe de travail dans la SDT (parties colorées dans la table 1) et surtout sur les agents de sécurité et de productivité (cellules vertes dans la table 1).
Par la suite on va présenter une image des agents du système de modélisation de la SDT.

2.1. Performance

Dans ce texte, on utilise la notion de performance pour définir l'efficacité opérationnelle du système homme et/ou machine, après son installation et sa mise en œuvre. Il doit être examiné en considérant différents facteurs que sont le temps, les ressources humaines, les matériels et d'autres ressources consommées lors de la production, qui généralement, sont normalisées dans une échelle de coût.
Cet indicateur est une combinaison de la productivité est la qualité de produit. Le nombre de produits finis est un indicateur global de la productivité d'un système de production (Polet et al., 2003). On ajoute la notion de qualité dans le même concept, car la sortie de la SDT est une combinaison de la quantité et de la qualité de sa production. Selon (ISO8402) et (Rausand, 2005c), la qualité est la totalité des dispositifs et caractéristiques d'un produit ou d'un service qui concernent sa capacité à satisfaire les besoins indiqués ou implicites.
La performance dans les domaines de productivité et qualité est considérée comme l'objectif premier pour le concepteur et l'utilisateur du système. La performance de STG peut être mesurée en considérant le poids de la viande coupé par heure de travail ou par semaine, avec une qualité acceptable (kg/semaine).

2.2. Sécurité

Dans les établissements modernes, la santé et la sécurité du lieu de travail ont une place principale dans le processus (Harrissona et al., 2003).
La sécurité est l'aptitude d'une entité à éviter des événements critiques ou catastrophiques (Polet, 2002) que peuvent endommager les humains, les biens ou l'environnement.
Selon (Paques, 2003) et (Benedyket, 1998) un système sûr dans des conditions normales ou raisonnablement prévisibles d'utilisation, y compris la durée, ne présente pas le risque inacceptable pour la vie humaine, la propriété ou l'environnement.
Comme (Määttä, 2003), (Polet et al., 2003) l'ont présenté, normalement la sécurité se définit à partir de la définition du risque comme « l'absence de risques ».
Selon (Ternov et al., 2004) la sécurité d'un système consiste à empêcher des échecs latents du système et à avoir des barrières de sécurité suffisantes.
(Khan et al., 1998) a présenté plusieurs indicateurs pour la sécurité et le risque :

1. FAR (Fatal Accident Rate - le taux d'accidents mortels). C'est la mesure du risque la plus généralement utilisée.
2. ALARP (As Low As Reasonably Practicable - aussi bas que raisonnablement faisable). Cet indicateur montre si la réduction de risque exige un effort permanent, pour arriver au maximum de sécurité possible sur le plan technologique et défendable ainsi que sur le plan économique.
3. Des solutions prescrites : vérifier que si des critères rigides dans la forme de prescriptions standard comme solutions et des méthodes pour la conception des équipements et des systèmes, sont respectés ou pas.

4. Des fonctionnalités prescrites : vérifier si la documentation de la réalisation de la fonctionnalité avec une flexibilité d'adaptation aux situations est mise en œuvre ou pas. Le principe réclame la compétence, l'innovation et les outils avancés de technologie.

La sécurité pour l'opérateur de STG peut être mesurée en considérant les jours d'hospitalisation ou de maladies qui sont en cause dans le travail (accident ou maladie). Mais en même temps, il y des troubles musculo-squelettiques qui, parfois, peuvent apparaître long temps après, par exemple à l'age de la vieillesse. Mesurer ces risques se fait en utilisant une série de standards qui utilise la fréquence et les caractéristiques de déplacement et de postures humaines, pour assigner des scores aux dangerosités des tâches.

1.3. Facteur humain

L'analyse des facteurs humains consiste à vérifier si les systèmes sont sécurisés, confortables, efficaces, et utilisables ((Lee, 2003) et (Zink, 2003) (TUC, 2006)).

Selon (Zachary et al., 2001b), considérer le facteur humain comme une contrainte veut dire que le concepteur doit considérer l'équipe de travail comme un organisme d'audit de conception.

D'après (Jensen, 2002), malgré beaucoup d'efforts pour intégrer l'ergonomie dans la planification des procédés de production, au cours des 30 à 40 dernières années, en pratique, c'est rarement le cas, bien que les outils de cette intégration soient disponibles. En fait, les concepteurs prennent plusieurs décisions qui affectent la rentabilité du système résultant, qui n'aurait pas été fait si les utilisateurs avaient été consultés (Gulliksen, 1998).

D'après (Jensen, 2002), la cause des problèmes doit être trouvée dans le contexte d'organisation, qui limite l'influence des spécialistes en facteur humain et limite leur perspective. Pour résoudre ce problème, on doit établir ou augmenter la plate–forme d'organisation pour l'ergonomie.

Les indicateurs pour mesurer l'adaptation des facteurs humains à un système ne sont pas présentés comme c'est le cas pour la productivité et la sécurité, car une grande partie de la satisfaction de l'opérateur dépend de sa personnalité, de sa culture et des caractéristiques psychologiques de l'opérateur. Par contre, il y a de nombreuses méthodes pour quantifier les efforts mécaniques et le confort postural de l'homme, lors de son travail. Dans la STG, ces méthodes peuvent être utilisées pour mesurer la fatigue, et le confort de l'opérateur.

1.4. Coût

Le coût ne doit pas seulement être considéré comme une contrainte pour la faisabilité du système, mais aussi, normalement c'est l'objectif le plus important qui est considéré lors de la conception. Le coût fixe et le coût variable de production sont les paramètres internes essentiels du bénéfice du système. Le coût de développement du système est considéré dans le coût fixe ; et la performance et la productivité sont importantes pour calculer le coût variable de production.

Le coût d'une SDT doit être mesuré pour toute la durée de sa vie, en considérant les coûts de conception, d'installation, d'utilisation et, finalement de démantèlement du système.

2.5. Faisabilité

Cet indicateur examine si l'alternative proposée est faisable ou pas.

La faisabilité est la possibilité de réaliser la conception en tenant compte des contraintes d'exploitation. Pour une SDT, cela signifie qu'il faut vérifier que les niveaux indiqués de processus et d'activité (physique, mentale) des humains et de celle des équipements peuvent

être satisfaits avec les ressources et les technologies actuellement disponibles (ONR, 1998a) et proportionnellement justifiés.
Selon (Zachary et al., 2001a), pour le sous–ensemble humain, il faut considérer des contraintes de main d'œuvre (nombre de personnes), des contraintes caractéristiques de personnel, et des contraintes de formation.
Parmi les autres ressources, on peut noter le temps, et les moyens économiques comme des ressources les plus importantes à vérifier. Pour la STG, lors de la conception de la machine, la faisabilité peut être envisagée d'abord, pour vérifier que la construction et l'installation de la machine et de ses accessoires sont faisables (selon les critères technologiques, économiques et de temps), et ensuite s'assurer que ce système après son installation est capable de faire l'opération demandée. La signification de la notion de faisabilité peut être développée, quand « l'opération demandée » signifie une opération avec le minimum de sécurité, de performance, de fiabilité et un coût acceptable. Dans ce cas, il n'est pas indépendant des autres indicateurs.

2.6. Fiabilité

Selon la définition la plus courante, la fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant une durée donnée (Rausand, 2005c) (Polet, 2002). Si on considère la fiabilité pour toute la durée du cycle d'une SDT, elle devient un sujet conceptuel, car généralement, on ne peut pas avoir une mesure paramétrique précise de la fiabilité pour une durée aussi longue. La stabilité du système et son pouvoir face à un changement de matériel, d'environnement, et de mode d'utilisation peut être parmi les challenges importants. La facilité et le coût de maintenance sont d'autres paramètres à considérer. D'autre part, avoir une définition claire de la fiabilité, n'est pas toujours facile et faisable.
Les concepts de disponibilité et de maintenabilité sont des mots clés proches de la fiabilité de systèmes réparables et remplaçables. Ces indicateurs peuvent être considérés pour juger que le système est utilisable à long terme ou pas.
Par définition, la maintenabilité est la mesure de la capacité d'un article à être maintenu ou reconstitué à l'état indiqué quand l'entretien est exécuté par le personnel compétent, employant des procédures et des ressources prescrites (MIL-STD21C) ((Rausand, 2005c) et (Polet, 2002)). On peut ajouter la facilité de trouver les ressources demandées, pour la maintenance (soutien d'entretien), comme un critère complémentaire, à cette définition.
La disponibilité dépend de la fiabilité et de la maintenabilité et la fiabilité ; et c'est la capacité d'un article à exécuter sa fonction requise à un instant ou pour une période donnée de temps (Rausand, 2005c).
Pour la STG, la fiabilité de la machine est la probabilité qu'elle coupe la viande selon les caractéristiques qu'on attend de cette machine, sans avoir un problème technique, si l'environnement, l'opérateur, et la réparation de la machine sont conformes aux exigences indiquées ou connues. On peut définir une fiabilité pour l'opérateur, en mesurant la probabilité qu'il fasse son travail sans faire d'erreur, pendant une durée spécifique. Alors, selon les erreurs étudiées, la fiabilité humaine peut avoir des relations avec l'analyse de risque et/ou l'analyse de performance.
Un indicateur pour la fiabilité du système peut être défini en considérant tous les défis et échecs du système qui peuvent se produire à cause de dysfonctionnements d'un ou plusieurs des éléments de système : les solutions techniques, l'humain, les matériels, l'environnement et les conditions de travail.

Synthèse du chapitre I

On a défini les notions générales pour étudier le système de la situation de travail (SDT) et les frontières, le but, l'environnement et les éléments de ce système.
Les processus d'évolution de SDT, et les facteurs à l'origine de ces évolutions, ont été expliqués, et ensuite, on a insisté sur l'importance d'analyser des aspects humains, lors de la conception, dans les SDTs modernes.
En utilisant l'approche systémique, nous nous concentrons sur la modélisation de l'équipe de travail, en sachant sa position, son rôle et ses interactions avec le système global.
La définition de concepts fondamentaux de la situation de travail est nécessaire pour fournir une base de connaissance pour des approches proposées et surtout pour étudier les interactions entre l'équipe de travail et les autres éléments de ce système.
Ces définitions nous aideront, aussi, pour intégrer les entités de risque avec les entités de la SDT, en séparant les dangers qui peuvent se produire par les solutions techniques, l'environnement, les matériels, les conditions de travail, et l'équipe de travail.
La situation de travail est présentée comme un système socio- technique et les notions d' «ergonomie » et « la conception centrée sur l'utilisateur » sont présentées pour mieux représenter le domaine ainsi que l'importance et l'objectif de considérer l'homme dans la situation de travail.
Une attention particulière a été portée sur les approches centrées sur l'humain ; et parmi les techniques de conception, celles basées sur le concept d'usine numérique, qui examine les critères concernant la présence et le travail de l'humain, lors de la conception, paraissent les plus intéressantes.
Etudier la dynamique de la SDT justifie la nécessité de développement de nouvelles approches, face aux futurs contextes et critères de l'environnement industriel.
On a considéré le système de conception comme un ensemble d'agents qui conduisent le processus de conception par une démarche itérative de modélisation/analyse et amélioration, jusqu'à arriver au résultat favorable. On a modélisé ce système par un système multi– agent, avec les agents qui analysent la productivité, la sécurité, les facteurs humains, le coût, la faisabilité et la fiabilité du système.
Actuellement, ces agents sont répartis dans le service de conception, et la définition de rôle, le contrôle, la synchronisation et les échanges entre ces agents sont guidés par les chefs de projets, mais, un système automatisé de conception, devrait respecter les mêmes principes, en utilisant les entités informatiques.
Dans ce travail, la notion d'agent peut couvrir deux formes d'acteurs différents : les solutions informatiques de modélisation et d'analyse et les experts regroupés dans les disciplines, impliqués dans la conception.
Utiliser le concept d'agent nous permet de définir une plate–forme dynamique, ce qui veut dire qu'en changeant le rôle et le mode de coopération des agents, le système de modélisation peut avoir des configurations différentes, adaptées avec les critères, les objectifs et les contextes de conceptions variées.
Une autre raison c'est que le concept d'agent nous permet de séparer les rôles de différentes parties du système de modélisation, de les spécialiser et de les utiliser à des échelles variées.
Le modèle de (Hasan, 2002) présente les éléments de système et leurs interactions dans une structure commune, mais nous insistons sur le fait que chaque agent a son propre modèle de situation de travail, et ne partage qu'une partie de son modèle avec les autres agents. Cette différence de points de vue c'est le moteur de l'itération de la conception, car, normalement, une conception qui satisfait les objectifs de tous les agents, ne se produit pas en une seule phase.

Donc pour appliquer les autres points de vue, qui n'étaient pas considérés dans les premières étapes de conception, le concepteur est obligé de modifier la conception, c'est la source de coût, de temps et d'imperfection des processus de conception.
Si on considère que chacune de ces analyses se fait avec des techniques différentes, par des groupes de travail différents, il paraît idéal de développer un système multi- objectif de conception, qui optimise tous les aspects, simultanément.
Mais utiliser la notion de multi-agent, pour la situation de travail, s'appuie sur le fait que les points de vue sont différents, et qu'on ne peut pas construire un modèle multi- objectif, facilement, pour trouver une conception optimale, selon ces points de vue, à différentes échelles. Par contre on doit se concentrer sur l'amélioration d'une méthode multidisciplinaire, de communication, d'organisation et de dynamique de système, comme les bases d'un modèle multi-agent.
Dans le chapitre suivant, on se concentre de plus en plus sur l'aspect humain en fournissant une classification de techniques appliquées pour modéliser l'humain dans la SDT.
Cette classification nous aidera à comprendre la variété, les applications et les résultats de techniques de modélisation de l'humain, dans les situations de travail.
Elle sera utile, aussi, lorsqu'on va développer une architecture pour « le système de modélisation d'humain » comme un système multi–agent.
Ensuite, on s'approche de plus en plus de l'aspect relatif à la sécurité au travail en fournissant les définitions de ses concepts.
Dans la dernière partie, on développe plusieurs techniques d'analyse de risque professionnel comme des parties d'un agent d'analyse de risque, au sein de cette architecture.

CHAPITRE II : MODELISATION DE L'HOMME DANS LA SITUATION DE TRAVAIL

1. Modélisation de l'homme

L'humain est l'élément le plus important de toutes les situations de travail. Cependant, les utilisateurs de systèmes, sont fréquemment sous–représentés dans le développement du système (ONR, 2000) et l'humain est un moindre élément compris dans un système (Kanade, 2003).
Des modèles humains industriels sont employés pour évaluer différentes solutions alternatives de conception et pour prévoir des besoins d'utilisateurs. Selon (Zachary et al., 2001b) la technologie de modélisation de l'homme a prouvé qu'elle pouvait avoir une contribution significative au processus de conception technologique du système.
Selon (CAM, 2002a), l'évaluation totale d'un système socio–technique basée sur la simulation ne peut pas être effectuée sans modèles d'humains.
Dans cette section, nous décrivons les concepts les plus importants qui ont été employés pendant le développement des modèles d'humains. Les concepts liés au lieu de travail industriel sont également décrits.
Dans la suite de cette partie, on va fournir une vue d'ensemble de techniques de modélisation humaine et leurs applications dans le présent et l'avenir.

1.1. Concepts de base

Il y a une variété de modèles d'humains classiques. Ces modèles sont développés pour répondre aux différents besoins, car il y a un vaste domaine des caractéristiques humaines qui exigent des modèles basés sur la connaissance pluridisciplinaire. En réalité la structure d'un modèle complet de l'homme sera très sophistiquée ; et son utilisation n'est pas toujours justifiable. Le but principal de cette partie est de décrire les concepts liés à la modélisation de l'homme dans la SDT.

1.1.1. Système et modèle

Un système peut être considéré comme :

- « une partie de l'univers matériel que nous choisissons de séparer dans la pensée du reste de l'univers afin de considérer et de discuter les divers changements qui peuvent se produire dans elle dans de diverses conditions » (Ten Haaf et al., 2002),
- « tout phénomène, structurel ou fonctionnel, ayant au moins deux composants séparés et l'interaction entre ces composants » (Aphalo, 2003).

Un système a certaines fonctions et peut être divisé en beaucoup de sous–ensembles qui influent les uns sur les autres. Des systèmes peuvent être normaux ou artificiels, vrais ou abstraits, statiques ou dynamiques, ouverts ou fermés (Chen, 2003). La frontière d'un système, l'entrée, la sortie, les interfaces, la sensibilité, la stabilité, l'entropie, la structure, la boucle de rétroaction, et l'équilibre sont les concepts les plus importants dans une approche systématique.
Typiquement, les concepteurs de systèmes et les ingénieurs ont employé des modèles pour simuler le matériel et le logiciel lors de la conception et pour les évaluer (CAM, 2002a).
Car la réalité est complexe. Chaque modèle est une projection partielle de la réalité sur un centre d'intérêt (Aphalo, 2003).
« *Tous les modèles sont erronés, mais certains sont utiles* » (Aphalo, 2003). On affirme qu'un système existe dans le vrai monde, mais qu'un modèle est une tentative de décrire, analyser, simplifier ou montrer un système. Un modèle est souvent basé sur une théorie, mais il n'y a pas besoin qu'il soit « vrai » ou même parfaitement formé (Carter-Powell, 2002). Il est conçu pour représenter les propriétés cruciales d'un système, dépend des questions à répondre (Chen, 2003). Par conséquent modéliser est la création d'une représentation d'un certain système pour lequel on ne s'intéresse qu'à quelques aspects de celui–ci. En employant des modèles, nous

examinons des idées au sujet de ce qui peut se produire à l'avenir si les conditions changent. Elles sont examinées à plusieurs reprises, par comparaison avec le vrai monde. Ils doivent simuler le vrai monde, avec un degré élevé de confiance, autrement les modèles ne sont pas utiles. La principale utilisation des modèles est d'expérimenter avec le modèle en changeant les conditions (Binford, 2005), de conception, la recherche, la gestion et la représentation du système.
Dans notre approche, on applique la notion de système, pour caractériser deux concepts :

(1) Le système de SDT,
(2) Le système de modélisation de la SDT.

1.2. Modélisation de l'homme dans la situation de travail

Les modèles d'un humain dans le domaine industriel simulent comment les gens effectuent ou accomplissent leur travail (Carter-Powell, 2002). Pour modéliser un vrai lieu de travail industriel, les modèles d'humains doivent représenter les systèmes non linéaires et adaptables et fortement complexes (George et al., 1999).
(Zachary et al., 2001b) a limité les applications de modèles d'humains dans les domaines suivants :

- Lister les fonctions humaines, et leurs caractéristiques,
- Déterminer des conditions de ressource humaine,
- Prévoir la satisfaction des limitations anthropométriques,
- Prévoir des conditions de communication,
- Intégrer l'exécution humaine avec d'autres parties du système.

(CAM, 2002a) a considéré les modèles d'humains en tant qu'outils de simulation de comportement pour évaluer les paramètres ergonomiques, l'étude de temps et l'analyse de processus de connaissance.
Selon (Zachary et al., 2001b) il y a trois critères pour évaluer la validité d'un modèle d'humain :

1. Validation de prédiction : comparer les prévisions du modèle aux données d'exécution réelle,
2. Validation de construction : démontrer la validité du modèle en démontrant que les composants de construction et les concepts fondamentaux sont valides,
3. Validation d'apparence : démontrer que le modèle est valide en soumettant le modèle pour la revue par des experts pour évaluer la validité apparente.

1.3. Classification de modèles de l'homme

Jusqu'à maintenant, une gamme étendue de modèles a été développée, mais selon (CAM, 2002a) il n'y a aucune "meilleure" approche qui serait idéale pour toutes les applications. Chacun de ces modèles modélise juste une petite partie du comportement humain. Dans la littérature, on trouve différentes classifications pour l'application de modèles d'humain. Ces applications sont détaillées par (Laurenceau, 2001), (Zachary et al., 2001b), (Zachary et al., 2001a), (SAFEWORK, 2003), (Tecnomatix, 2003) et (Zha et al., 2003).
(Zachary et al., 2001a) a classifié des modèles d'humains dans 18 catégories, il note, aussi, que modéliser l'homme est compliqué et ne peut pas être réalisé par une simple utilisation d'une technique ou même d'une famille de techniques (Zachary et al., 2001b). Cette classification couvre tous les modèles d'humains particulièrement dans l'étude des activités mentales, mais il est moins intéressé par le domaine industriel. Dans les processus de conception de situations de travail, ce sont des aspects physiques et ergonomiques, et les interactions avec d'autres parties du système du lieu de travail qui sont modélisés.
Selon (Kanade, 2003), les modèles d'humains sont regroupés autour de trois axes, et pour chacun, il propose, une classe de modélisation :

1. Modélisation de la fonction physio–anatomique : les formes, les propriétés matérielles, les paramètres physiologiques, et leurs rapports avec des stimulations internes et externes.
2. Modélisation de mouvement mécanique : considération de l'homme comme une machine, et analyse cinématique, dynamique, et comportementale des mouvements humains.
3. Modélisation des activités psycho–cognitives de l'humain. Traiter les comportements psychologiques et cognitifs de l'humain comme sentir, penser, agir et interagir l'un sur l'autre ou avec des événements, d'autres, et des environnements.

(Chen, 2003) a classé ces modèles comme conceptuels, d'échelle et mathématiques. D'après lui, un modèle conceptuel est une approche pour représenter la fonctionnalité d'un système, habituellement sous la forme d'un organigramme. Un modèle d'échelle a le même aspect proportionnel que le système/objet original. Un modèle mathématique est composé d'une série d'équations exprimant les lois qui régissent un système d'intérêt.
(Zachary et al., 2001a) a distingué les aspects suivants pour les modèles d'humain :

- Le but d'un modèle peut être descriptif ou prédictif,
- La concentration architecturale peut être sur un ou plusieurs des aspects suivants :
    - Le physique du corps,
    - La perception,
    - Le traitement de l'information,
    - L'apprentissage.

Comme notre objectif est d'envisager la possibilité d'intégrer toutes les techniques de modélisation de l'homme, dans le domaine industriel, nous proposons une classification basée sur les techniques, les objectifs et les résultats de ces modèles, expliqués dans (Shahrokhi et al., 2005a). Un modèle d'humain peut être développé, aussi, en utilisant plusieurs de ces techniques en même temps, pour examiner, optimiser ou présenter la SDT.
Par exemple, l'application de chaque technique pour modéliser un opérateur de scie à ruban est détaillée.

1.3.1. Modèle descriptif

Un modèle descriptif est "une représentation abstraite des attributs choisis d'un vrai objet, d'un événement ou d'un processus" (Hatze, 2002), et les modèles d'humains descriptifs essayent de décrire les régularités du comportement ou de la connaissance d'un humain qui sont capturées dans les données empiriques (Stewart, 2002). Les modèles descriptifs d'humains sont des modèles qui présentent la connaissance classifiée au sujet du comportement humain, et se fondent presque exclusivement sur notre modalité visuelle. Le but de ces représentations est de structurer les données essentielles et de les rendre compréhensibles. Ils sont largement appliqués par des études de l'organisation du travail et des études des aspects conceptuels dans la communication multidisciplinaire et la formation. Dans un contexte industriel, ils peuvent être très simples, en employant seulement l'information cruciale concernant le lieu de travail et les processus.
Dans ces modèles, le traitement de l'informatique est limité à la classification, et la connaissance scientifique n'est pas nécessaire pour les percevoir. Car les modèles descriptifs sont très simples ; parfois ils sont employés pour présenter les résultats des modèles analytiques à la revue par les utilisateurs à divers niveaux. Ils sont, souvent, représentés sous forme de graphiques, de diagrammes, de schémas, d'animations ou de films et photos. Ils peuvent même être exprimés sous la forme d'indices, par exemple l'indice d'utilisation de la main montré dans (Zha et al., 2003), qui indique si une main est utilisée plus souvent que l'autre.

Une application très large de ces modèles est utilisée dans des études du travail afin d'améliorer des méthodes dans les usines, les bureaux, les banques, les magasins ou les hôpitaux. Les diagrammes de processus, l'étude de micro–mouvements, les diagrammes d'activités multiples, et le Therbligs sont quelques exemples de ces modèles.
Un exemple de ce type de modèle, est celui utilisé par (Szpytko et al., 2005), pour étudier le travail d'un opérateur d'une machine.
Dans une partie de ces modèles, les modèles de déroulement de tâche, des activités humaines sont décomposées en une série de tâche caractérisées en termes de temps, d'exactitude, et de probabilité d'exécution. Les tâches peuvent être incorporées ensemble dans les réseaux qui représentent les ordres possibles selon lesquels les tâches peuvent être exécutées (Zachary et al., 2001b). Ces modèles (y compris l'analyse de file d'attente) sont les outils utilisés pour analyser la durée de l'activité particulièrement dans le processus de programmation, en considérant des contraintes de ressources. Le déroulement de tâche est une représentation écrite ou graphique des corrélations entre les tâches, en particulier en ce qui concerne l'ordre d'exécution. Ils incluent souvent des informations sur les procédures, événements ou les ressources exigées pour accomplir chacun des buts de chaque tâche (TUC, 2006).
Pour la STG (situation de travail générique présenté dans le chapitre précédente), les modèles descriptifs peuvent être utilisés pour présenter le travail de l'opérateur, les interactions de l'opérateur avec les autres éléments, et formation du travail et la sécurité. La figure 3 illustre un modèle descriptif d'interaction d'un homme dans la STG.

1.3.2. Mannequin physique

Un modèle à l'échelle a le même aspect que le système /objet original pour la taille et le détail proportionnel (Chen, 2003). Et un mannequin est un modèle mesuré du corps humain ou d'une partie du corps pour présenter certaines de ses caractéristiques physiques, particulièrement pour l'usage dans l'industrie, la recherche médicale ou l'art. Le mannequin représente les propriétés géométriques et physiques d'un humain ; il peut être employé pour évaluer les postes de travail pour faire la modélisation et /ou l'analyse de propriétés. Selon (Rix et al., 1998) et (OTT, 2003) les mannequins sont utilisés pour envisager les postures et les espaces occupés par le corps d'un humain et pour évaluer expérimentalement l'interaction physique entre les humains et l'environnement réel ou abstrait. Selon (Määttä, 2003), la raison d'utiliser les mannequins est que l'analyse à l'aide d'un mannequin est plus simple, car la plupart des systèmes complexes et réels présentent des aspects stochastiques qui ne peuvent pas être exactement décrits par un modèle mathématique, favorable à l'évaluation analytique.
Les attributs du mannequin sont semblables à l'humain dans les sujets étudiés ; et il produit des réponses similaires à un humain. Les mannequins sont adaptés en particulier pour évaluer des positions posturales et des paramètres ergonomiques, puisqu'ils fournissent une visualisation tridimensionnelle plus compréhensible et évaluable des postures humaines. Dans le domaine militaire, l'espace et l'industrie automobile, ces modèles sont largement répandus pour les évaluations de la sécurité et les aspects ergonomiques de conception. L'enseignement et la formation à divers niveaux est une autre application de ces modèles. On utilise le mannequin comme un modèle, car comme cela est confirmé par (Gulliksen, 1998), les concepteurs et les utilisateurs n'ont pas forcément la même image des choses, mais avec un modèle matériel, ils commencent immédiatement à avoir des images correctes et claires de concepts.
Un des problèmes liés à l'utilisation des mannequins est que cela présente un manque pour fournir les attributs flexibles, en particulier les aspects anthropométriques, pour simuler divers utilisateurs /postures et pour s'adapter aux différents environnements. En plus, le temps et le coût de conception, de fabrication, de transport, et d'entretien posent certains problèmes

pratiques en défaveur de l'utilisation de mannequins. D'autres limitations sont qu'ils doivent être employés dans un lieu de travail physique, à la même échelle.
(OTT, 2003) présente un exemple d'un mannequin qui est développé pour des études thermodynamiques. Ce modèle est produit, sur la base des normes anthropométriques, pour étudier l'interaction thermique humain–environnement. Il est intégré avec une commande ; et des mesures de système informatique et un système de communication sont construits pour commander des inter–sous–ensembles de mannequin, et pour recevoir les données transmises par le mannequin. Pour citer d'autres exemples d'application de mannequins, (STZ,1999) et (Bellemare, 2001) ont utilisé les mannequins à l'échelle lors de la formation afin de présenter les situations de références, simulations sur plan, expérimentation sur maquette, et élaboration de scénarios pour tester des concepts de différents appareils de contrôle.
Pour notre exemple de l'opérateur de la scie à ruban, le mannequin peut être utilisé pour montrer les postures de l'opérateur pour les objectifs de formation et d'études ergonomiques. Lors de la conception il peut être utilisé pour mesurer les domaines d'accès par l'opérateur, sur le prototype. Mais utiliser le mannequin physique pour ces applications n'est pas pratique et est limité à des cas particuliers.

1.3.3. Modèles mathématiques

La modélisation mathématique est un processus qui essaye d'assortir les vrais paramètres du système avec les rapports symboliques. Cette représentation peut être à base de formules ou d'algorithmes.
Selon (Aphalo, 2003), un modèle mathématique est un rapport fonctionnel (modèle paramétrique) plus un ensemble de valeurs pour les paramètres. Des routines mathématiques sont employées pour déterminer des équations exprimant le comportement en fonction de conditions (CAM, 2002a). Développer des modèles mathématiques de systèmes est une partie essentielle dans beaucoup de disciplines de la technologie et de la science afin de simuler et d'analyser le comportement du système (Babuska, 2002) ; mais établir ce type de modèle exige de rassembler une grande quantité d'observations (CAM, 2002a).
Les modèles mathématiques d'humains utilisent le domaine répandu des techniques mathématiques pour modéliser et optimiser le comportement d'humains. On les a devisé par rapport aux techniques essentiellement utilisées : (a) les modèles de recherche opérationnelle, (b) les modèles statistiques, (c) les modèles de logique floue, (d) les modèles de réseaux de neurones, et (e) les modèles de réseaux de neurones flous.

I. La recherche opérationnelle

La recherche opérationnelle a été inventée en 1938, comme une notion descriptive pour l'usage des évaluations scientifiques de situations opérationnelles (Goodeve, 2001). Selon (EOR, 2003), la recherche opérationnelle est une approche scientifique à la solution des problèmes dans la gestion des systèmes complexes.
Ces modèles mathématiques emploient des techniques analytiques pour optimiser l'exécution humaine comme fonction objectif, vu quelques critères pratiques sous forme de valeurs numériques. Elle est employée, la plupart du temps, pour optimiser la disposition des installations et des matériels afin de réduire le coût, l'effort des opérateurs et la durée des tâches.
Une sorte d'application de la recherche opérationnelle concerne la simulation de perception et de comportement de l'homme lors de la prise de décision (Barthélemy, 2002). Par exemple les modèles d'optimisation multicritères sont utilisés pour prévoir le mouvement de l'homme, dans les études cinématiques. L'hypothèse qui est derrière la prévision par ces modèles, c'est que le comportement humain est caractérisé par l'optimisation d'une mesure d'exécution ou

une fonction objectif, telle que la fatigue, l'énergie potentielle, l'effort, ..., qui peuvent être employés pour prévoir le comportement humain (Abdel-Malek et al., 2004b).
Cette technique peut utiliser les données produites par d'autres techniques. Par exemple (Kim, 2004) a essayé de formuler le mouvement humain comme un problème d'optimisation en considérant les contraintes physiques et physiologiques.
Le modèle de la recherche opérationnelle pour l'exemple de l'opérateur de la scie à ruban peut être utilisé pour déterminer la trajectoire optimale de l'opérateur, en considérant le coût et le risque de mouvements.

II. Modèle statistique

Un modèle statistique montre le comportement d'une ou de plusieurs variables aléatoires ou les corrélations entre elles.
Les rapports statistiques parmi des variables dans le modèle sont habituellement établis par des observations (Chen, 2003).
Ces modèles sont utilisés pour simuler les attributs aléatoires des humains ou pour étudier la distribution de caractéristiques d'un groupe d'humains. Un exemple de cette application, est présenté par (Parkinson et al., 2003) où, à partir des descripteurs de population entrés par l'utilisateur, tels que l'âge et le sexe, il calcule des prévisions quantitatives de la distribution de la difficulté d'extension prévue à la population des opérateurs.
Les techniques statistiques ont une application répandue dans les sciences médicales et les sciences humaines pour évaluer les hypothèses. Elles sont particulièrement employées pour analyser les paramètres ergonomiques (y compris biologiques) du corps humain comme les caractéristiques anthropométriques et métaboliques. En utilisant ces modèles les concepteurs déterminent les meilleures propriétés pour les productions, selon les attributs estimés d'une population spécifique.
Les modèles empiriques–statistiques utilisent les analyses statistiques, telles que des modèles de régression, pour former un modèle prédictif de posture de l'homme lors de la simulation de mouvement avec l'ordinateur. Un exemple pour ces modèles se trouve dans (Iowa, 2005).
Le modèle statistique dans la STG peut être utilisé pour calculer le temps moyen et sa déviation standard du cycle de production, ou pour analyser les informations de sécurité, la qualité de travail et les erreurs de l'opérateur.

III. Modèle logique floue

À l'origine développée par Zadeh (1965) (Guimaraes et al., 2004), les techniques de logique floue sont des méthodes mathématiques et informatiques qui permettent de raisonner au sujet de l'incertitude (Zachary et al., 2001a). Les systèmes flous sont les systèmes qui ont le rapport avec des concepts flous (comme les ensembles flous, les variables linguistiques) et la logique floue (Guimaraes et al., 2004). L'avantage du système de logique floue est sa capacité à raisonner avec de l'information non numérique et de modéliser la connaissance intuitive d'un expert (Duan, 1999). La représentation, la connaissance et l'inférence floues sont plus près de la manière dont les humains raisonnent et expriment leur connaissance (Jager, 1995). Les entrées floues peuvent être des données incertaines ou des variables liées à la perception humaine, telles que le confort, la beauté (Babuska, 2002) en utilisant des variables linguistiques (Wunsch et al., 2005). Les ensembles flous peuvent être combinés par des propositions ou négations logiques (Jager, 1995) pour créer des règles linguistiques qui décrivent la façon de transcrire la perception de l'action ((Goodeve, 2001) et (Zadeh, 1998)).
Les modèles flous peuvent utiliser des données empiriques qualitatives, quantitatives (Ying, 2002) et imprécises, obtenues à partir de l'observation du comportement des systèmes (Castellano, 2000) (Ying, 2002) (Babuska, 2002). La logique floue présente les techniques pour réduire la complexité, pour éliminer des détails inutiles et augmenter la robustesse des

solutions (Grosjean, 2000) (Zadeh, 1998). Les systèmes d'inférence floue qui fonctionnent avec des règles « si…alors » sont des approximations universelles, c.–à–d. qu'ils peuvent approcher n'importe quelle fonction continue sur un ensemble compact de l'exactitude arbitraire ((Babuska, 2002) et (Fuller, 1999)). Ils tiennent compte de descriptifs où la représentation qualitative des expressions incorpore les rapports symboliques qui sont plus réalistes et intuitifs que l'équation mathématique (Guimaraes et al., 2004). Les modèles flous peuvent modéliser les phénomènes dynamiques et non linéaires en combinant des fonctions simples ((Ying, 2002) et (Takagi, 1997)) et transparentes (boîtes grises). C'est la raison essentielle pour lesquelles des applications de logique floue sont très nombreuses et variées (Fuller, 1999).

Les modèles de logique floue de l'humain simulent la perception humaine dans des processus et l'inférence analytique. Récemment, l'application de ces modèles dans l'industrie s'est développée. L'avantage le plus important de ces modèles est leur potentiel pour modéliser le comportement humain à partir d'informations incertaines et insuffisantes. En plus ils sont compréhensibles et peuvent être modifiés facilement. Ils sont habituellement utilisés pour simuler la connaissance humaine, et pour traduire l'expertise humaine dans des méthodes conventionnelles analytiques et/ou des systèmes d'inférence floue.

La logique floue est applicable pour modéliser le contrôle humain (Leino et al., 2004). La commande floue est la branche la plus réussie et la plus active de la technologie floue, en termes de recherche théorique et d'applications pratiques (Ying, 2002).

Les applications de logique floue pour simuler l'humain sont nombreuses, par exemple (Howard et al., 2004) a présenté une technique d'optimisation non–linéaire qui vise à ajuster des paramètres flous de système pour réaliser la performance perceptive, ressemblant étroitement à celle d'un expert humain.

La logique floue a plusieurs applications dans le domaine médical pour prévoir (Zha et al., 2003) et détecter les maladies, pour interpréter la structure dans les électrocardiogrammes, et pour la classification des tissus normaux et cancéreux dans des images de résonance magnétique du cerveau (Ying, 2002), qui simule le processus de diagnostic, utilisé par un humain.

La logique floue, par exemple, peut être utilisée pour appliquer les avis des experts pour calculer le temps de coupe des différentes viandes par un opérateur de scie à ruban, considérant la taille, la forme et la qualité de viande, et les caractéristiques de l'opérateur. Elle peut être utilisée, aussi, pour simuler la perception et le raisonnement de l'opérateur lors du choix de sa méthode du travail.

IV. Réseau de neurones

Des réseaux de neurones artificiels sont employés pour modéliser l'humain en raison de leur potentiel pour s'adapter au comportement de l'humain défini par des données multi–variables, non–paramétriques et non–linéaires. Ces modèles sont particulièrement utiles pour développer les modèles mathématiques en environnement dynamique où aucun modèle analytique ou paramétrique connu n'a été identifié. Ils sont habituellement utilisés pour simuler divers paramètres à travers un spectre très large d'attributs liés à la performance humaine (par exemple connaissance et biomécanique).

Comme expliqué par (Grosjean, 2000), les réseaux de neurones artificiels tirent l'inspiration des possibilités des animaux et des humains pour s'adapter et apprendre dans les environnements dynamiques créés par des conditions et des situations variables.

Une architecture de réseau de neurones (perceptron) se compose de deux couches : l'entrée et la sortie, et dans la majorité des cas une ou plusieurs couches intermédiaires, nommées les couches cachées. Chaque couche contient un ou plusieurs neurones, qui sont entièrement reliés entre eux (Castellano, 2000). Un neurone reçoit des entrées de la part d'autres neurones,

et l'ordre des transitoires de sortie dans lequel ce neurone produit, à son tour, affectera d'autres neurones (Halliday, 2002). Chaque raccordement entre deux neurones est assigné avec un poids (positif ou négatif (Fuller, 1999)) qui peut être ajusté de telle façon à donner un ensemble d'entrées au réseau. Les raccordements associés produisent un résultat désiré (Castellano, 2000). Les neurones utilisent des fonctions sigmoïdales, radiales, ou autres fonctions simples qui agrandissent, réduisent, dérangent, et/ou décalent les données par les poids synaptiques (Takagi, 1997). L'ajustement de ces poids pour produire un résultat particulier s'appelle "la formation" du réseau, qui est un mécanisme d'apprentissage. Un réseau doit être formé avant qu'il puisse contenir la connaissance utile. La plus connue des techniques dirigées est l'algorithme de propagation arrière (Twomey et al., 1993) à l'origine développé par Werbos (Nefti et al., 2004).
Ces modèles sont capables de s'adapter avec des données multi–variables, non–paramétriques et non–linéaires (Twomey et al., 1993). Typiquement, la performance d'un réseau de neurones est souvent influencée par son architecture, qui concerne principalement le nombre de neurones d'entrée, le nombre de neurones dans la couche cachée et le nombre de couches cachées. Pour augmenter la vitesse de calcul et réduire la demande de mémoire et l'effet des bruits, la taille du réseau de neurones doit être raisonnable (Nefti et al., 2004). Ce modèle prédictif représente un pas significatif en avant, en développant les modèles mathématiques utiles des phénomènes biomécaniques où aucun modèle analytique ou paramétrique connu n'a pas été identifié (Twomey et al., 1993).
Les réseaux de neurones, aussi, fournissent des prévisions plus précises au–delà des modèles statistiques standards de la cinématique humaine (Iowa, 2005). Par exemple, (Zha et al., 2003) a utilisé le réseau de neurones pour prévoir les angles des mouvements communs humains liés à une gamme de configurations de poste de travail.
Pour citer un autre exemple, (Bendahan, 2004) a utilisé les réseaux de neurones pour planifier le mouvement cinématique du bras évitant des obstacles (figure 6).

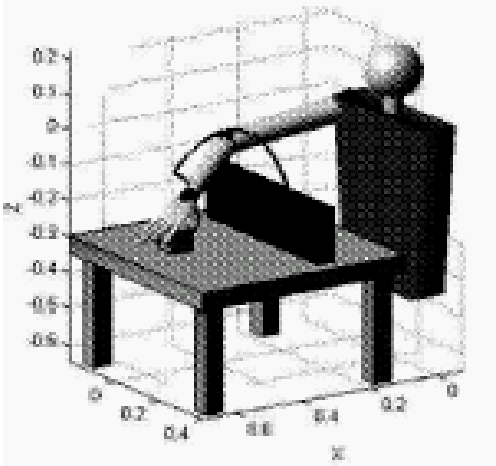


Figure 6. Un modele développé par (Bendahan, 2004) pour simuler le mouvement humain en utilisant le réseau de neurones

Dans la STG, ce modèle peut être utilisé pour prévoir les différents comportements de l'opérateur, comme la trajectoire, et la manière de travail de l'opérateur dans les différentes situations et avec différentes sortes de viandes.

V. Approche par réseaux de neurones flous

Tandis que la logique floue fournit un mécanisme d'inférence sous l'incertitude cognitive, les réseaux de neurones informatiques offrent des avantages passionnants, tels que la formation, l'adaptation, la tolérance aux défauts et la généralisation (Fuller, 1999). L'intégration des réseaux de neurones, avec les systèmes d'inférence floue, crée les approches de modélisation neuro–floue qui combinent les avantages de ces deux paradigmes puissants (Wu et al., 2004). Les modèles de réseaux de neurones manquent de capacité pour représenter la connaissance compréhensible pour les humains ; et des systèmes neuro–flous sont employés pour surmonter cet inconvénient, en incorporant la représentation de la connaissance de la logique floue avec les possibilités d'apprentissage des réseaux de neurones artificiels (Grosjean, 2000). Ces systèmes intelligents prouvent leur efficacité dans une grande variété de problèmes réels (Fuller, 1999).
Ils fournissent un cadre puissant pour extraire des règles floues (Castellano, 2000) ou des réseaux de neurones (Wu et al., 2004) à partir de données numériques.
L'utilisation des systèmes hybrides intelligents se développe rapidement avec des applications réussies dans beaucoup de secteurs comprenant le contrôle de cycle du processus, la conception des machines, le commerce financier, l'évaluation de degré de solvabilité, le diagnostic médical et la simulation cognitive (Fuller, 1999).
Par exemple, la commande neuro–floue est appliquée par (Grosjean, 2000) pour apprendre un comportement d'action permettant d'éviter une collision.
Dans un autre exemple, des réseaux de neurones sont employés par (Fuller, 1999) pour concevoir des fonctions d'appartenance des systèmes flous qui sont utilisés comme systèmes de prise de décision pour commander les équipements.
Pour la STG, par exemple, ces modèles peuvent être utilisés pour déterminer la trajectoire de mouvements de l'opérateur et de sa main, en connaissant les caractéristiques de l'opérateur, de la machine et de la viande.

1.3.4. Les modèles de comportement corporel

Les modèles physiques sont des modèles utilisés pour étudier le comportement et les mouvements du corps humain sous les effets de forces externes et internes. Ils se composent d'une variété de groupes, y compris les modèles biomécaniques et cinématiques, pour modéliser les forces ou le mouvement du corps humain. Dans ces cas, un modèle anatomique de base est construit.
Des limitations des modèles physiques d'humains concernent le fait d'avoir une chaîne biomécanique avec un maximum de degrés de liberté, et ceci entraîne des calculs lourds, ce qui peut les empêcher de l'exécution en temps réel (Iowa, 2005).
Les résultats de ces modèles pourraient affecter la conception du travail et des interfaces des équipements ; ils permettraient aux concepteurs de visionner l'impact occasionné lorsqu'ils conçoivent des changements, sur la fatigue et le chargement des muscles (Dickerson et al., 2001).

I. Les modèles cinématiques

Les modèles cinématiques d'humain, représentés par une série de segments reliés par les liaisons qui représentent les liens entre muscles et squelette, sont utilisés pour déterminer la rotation à chaque degré de liberté de chaque articulation (Abdel-Malek et al., 2004b).
Ils sont développés pour calculer des déplacements, des vitesses, et des accélérations de liaisons/membres de corps, sans s'occuper de leurs causes, et sont, particulièrement, employés pour optimiser le mouvement des parties du corps humain.

Les résultats de ces modèles sont employés pour déterminer la disposition des chaînes de montage, et pour simuler des postures humaines lors de mouvement. Ce qui est un problème très difficile et complexe dû à la redondance du système musculo–squelettique humain.
Dans l'exemple de l'opérateur de scie de ruban, le modèle cinématique peut être utilisé pour simuler la marche de l'opérateur et ses mouvements lorsqu'il prend ou coupe la viande. Avec ces modèles, on peut aussi mesurer le temps de mouvement de l'opérateur, lorsqu'il fait différentes taches, comme prendre la viande.

II. Les modèles biomécaniques

Les modèles biomécaniques, ont été développés pour décrire le corps humain et ses mouvements. La raison principale de développer ces modèles est de répondre aux questions fondamentales au sujet de la charge et des dommages au niveau des muscles (Dickerson et al., 2001), en appliquant les méthodes de mécanique. Dans ces modèles, l'anatomie humaine (plus précisément le squelette) est représentée comme une succession de corps rigides reliés par des articulations. Ces corps peuvent être un bras, une jambe, un doigt, un poignet ou tous les autres segments du corps humain (Yang et al., 2004). Ces modèles sont divisés en deux sous–groupes, les modèles statiques et les modèles dynamiques.
Les domaines d'étude de la biomécanique sont très variés, incluent les systèmes de commande motrice, cardiovasculaires et respiratoires, réadaptation, os et tissus durs, tissus orthopédiques connectifs, ainsi que la biomécanique cellulaire et moléculaire (Viganò et al., 2004). Des modèles biomécaniques du système musculo–squelettique humain sont employés, particulièrement, dans des applications industrielles, pour représenter le corps humain guidé par les forces internes, qui sont influencées par les forces externes (gravité, contact, ...) par des activités dynamiques ou statiques humaines. Ils étudient les effets des forces sur les muscles, et la capacité de maintenir l'équilibre en se déplaçant ou en position stationnaire. En employant des analyses de dynamique inverse, le couple et les forces communes sont calculés et ces résultats sont employés pour prévoir mathématiquement les différentes forces dans les muscles. Cette information est employée pour estimer les demandes des forces musculo–squelettiques nécessaires au travail et la capacité physique, afin d'empêcher des désordres corporels.

III. Les modèles statiques

Les modèles statiques sont des modèles de force humaine : ils se concentrent souvent sur des contractions volontaires maximum, statiques et isométriques (Dickerson et al., 2001).
Les modèles statiques appliquent les principes des machines simples et l'équilibre pour un corps immobile.
La posture optimale est obtenue en utilisant des méthodes d'optimisation analytique, notamment les méthodes à base de gradient, ceci afin d'avoir la stabilité maximum, la consommation d'énergie minimum, et l'état minimum de couple (Abdel-Malek et al., 2004b). Ces modèles sont utilisés pour minimiser les efforts, et la fatigue lors d'activités qui nécessitent de conserver une posture statique et stable, pendant un temps assez long.
Ce modèle peut être utilisé pour calculer les forces dans différentes parties immobiles du corps de l'opérateur de scie à ruban, quand il est en train de couper ou prendre/mettre la viande.

IV. Les modèles dynamiques

Les modèles dynamiques présentent des activités qui comportent les efforts dynamiques et traitent des corps en mouvement et/ou avec des forces variables. Selon (Chaffin et al., 2002)

et (Xudong et al., 1999), parfois les modèles dynamiques peuvent être remplacés par une série de modèles séquentiels statiques.
Mais d'après (Dickerson et al., 2001), l'effet entre les changements de longueur des muscles et des tendons, et celui du partage de charge, pendant la contraction, soulève beaucoup de questions concernant l'exactitude des modèles statiques.
Les modèles dynamiques se développent pour calculer les variables dynamiques, la prévision des forces dans les muscles, en envisageant le risque de dommages (Dickerson et al., 2001). Ces paramètres sont utiles pour assigner les valeurs quantitatives aux efforts et la fatigue.
Selon (Marler, 2004) dans les modèles dynamiques, l'effort, en tant qu'indicateur de risque et de fatigue, est mesuré comme un déplacement cumulatif des articulations. La fatigue est mesurée relativement à une position qui est considérée la plus confortable, tandis que l'effort est mesuré relativement à une position de départ.
Malgré les efforts faits pour développer les modèles dynamiques pour les utiliser en temps réel, il y a peu de modèles numériques d'humains appropriés à la simulation de paramètres dynamiques lors de mouvements (Leino et al., 2004). Ce modèle peut être utilisé pour calculer les forces dans différentes parties du corps de l'opérateur de scie à ruban, quand il est en train de travailler.

1.3.5. Les modèles des sciences humaines

Les sciences humaines sont concernées par l'étude systématique de la nature et des caractéristiques des êtres humains. Les sciences humaines représentent tous les aspects d'existence humaine, y compris des caractéristiques mentales, sociales et physiologiques. Et un modèle en sciences humaines est une présentation qui interprète la nature des humains avec l'appui sur la recherche expérimentale.
Les modèles des Sciences Humaines, comme d'autres sciences naturelles, sont basés sur des théories et des expérimentations, dépendent de la validité des hypothèses et des expérimentations, et donc leurs résultats ne sont pas absolument corrects. On les a divisés en quatre groupes : les modèles anthropométriques, les modèles physiologiques, les modèles psychologiques et les modèles sociologiques.

I. Les modèles anthropométriques

Ces modèles utilisent les données anthropométriques et artistiques pour construire des tailles et apparences normales ou désirées pour le modèle du corps humain. En même temps, la modélisation du squelette, des muscles, de la peau et du visage font partie de ce groupe.
L'anthropométrie comme étude des mesures du corps humain telles que la longueur de jambe, la largeur de genou, la largeur de cheville (Abdel-Malek et al., 2004b), est utilisée pour résoudre les problèmes d'accommodation des humains pendant la conception d'équipement (ANT, 1998). Il modèle non seulement la taille du corps humain, pour différents âges, pour des origines ou des genres différents, mais aussi pour illustrer la différence entre les hommes normaux et handicapés ou également avec d'autres limitations (Dickerson et al., 2002).
Les modèles anthropométriques sont dérivés de la mesure de centaines d'êtres humains, dans les bases de données énormes, capturant la forme typique et la taille de diverses parties du corps humain (Rix et al., 1998).
Le système de mesure peut être basé sur un procédé simple de mesure directe ou par projection par photographie du sujet, avec plusieurs appareils–photo (Seitz et al., 1999) ou scan laser.
En utilisant ces données on peut créer le modèle numérique de l'homme, par exemple pour déterminer ses limites d'extension (ONR, 2000).

En utilisant ce modèle on peut par exemple estimer la taille moyenne et la zone d'accès pour un opérateur de scie à ruban pour calculer la hauteur la plus confortable et la plus productive de la table de la machine, et la distance à la scie.

II. Les modèles physiologiques

La physiologie humaine est une large science comprenant la physiologie des cellules, des tissus et la physiologie d'organes, et la physiologie d'interaction humain–environnement (MED, 1999). Les modèles physiologiques industriels incluent l'interaction mutuelle entre le corps humain et la SDT ; cependant, les effets de la SDT et du travail lui–même sur des organismes humains sont les aspects les plus importants.
Ces signes peuvent être observés, mesurés, et surveillés pour évaluer le niveau d'un individu du point de vue de son fonctionnement physique, en modélisant le système circulatoire, le système de respiration (poumons), le système de fluides du corps (reins), le métabolisme, et les signes essentiels. Les signes essentiels sont la température du corps, les pulsations (fréquence cardiaque), le taux respiratoire (respiration), et la tension artérielle (Mathai et al., 2004).
L'application industrielle de ces modèles est généralement limitée à l'évaluation des risques physiologiques et l'interaction homme–machine. D'autres paramètres physiologiques liés au métabolisme humain sont développés dans des domaines spéciaux et les industries aéronautiques, afin d'étudier les attributs physiologiques humains dans les conditions et environnements particuliers.
Ce modèle peut être utilisé pour mesurer les effets permanents et instantanés de facteurs environnementaux (bruit, vibration,…), microbiologique, et le travail même sur le corps humain.

III. Les modèles psychologiques

Des modèles psychologiques d'humains sont développés pour étudier la pensée, l'émotion, et le comportement humain (Zimmer, 1999). Selon (MED, 1999), la psychologie industrielle applique des principes de la psychologie des personnes en situations de travail : aider les employeurs dans leurs relations avec les employés, faire que les travaux les plus intéressants et satisfaisants, et aider les ouvriers à être plus productifs. Ces principes sont employés pour s'assurer que les lieux de travail sont le plus possible en accord avec les possibilités humaines des sens, de la mémoire, des qualifications cognitives, et des préférences psychomotrices (MED, 1999).
Dans les lieux de travail, un nombre considérable d'aspects subjectifs sont liés à la culture, les capacités cognitives et les perceptions de gens (Maxant et al., 2005). Les modèles psychologiques sont utilisés pour définir ces facteurs humains qui couvrent des domaines tels que la conception ergonomique, la conception sensorielle et l'ergonomie cognitive.
La définition du modèle cognitif devrait couvrir de larges catégories, y compris des modèles de communication parmi des groupes/équipes d'humains, et des modèles d'analyse des tâches (Zachary et al., 2001b). Le temps de réaction, le traitement mathématique, la recherche de mémoire, le traitement spatial, le « cheminement » (chercher les traces), le raisonnement, et des tâches simultanées sont quelques–uns des sujets les plus importants de ces modèles (Sharbaugh, 1998).
Les techniques de représentation de la connaissance, aussi, sont des méthodes qui ont été développées, typiquement dans l'intelligence artificielle et les sciences cognitives, qui capturent et représentent la connaissance humaine sous une forme symbolique à l'usage des modèles informatiques de résolution des problèmes de raisonnement (Zachary et al., 2001b).
Il y a des modèles psychophysiologiques qui utilisent les données physiologiques par les appareils comme les électrocardiogrammes (ECG), d'électroencéphalogrammes (EEG) et

d'électromyogrammes (EMG) pour estimer les comportements psychologiques d'humains ((ONR, 1998c) et (ONR, 1998e)).
Ces modèles sont utilisés pour lier les composantes cognitives, psychomotrices et sensorielles individuelles et les tâches corporelles de l'opérateur (Wightman, 2004). Ils incluent couramment la simulation des processeurs de perception visuelle, auditifs et tactiles, la mémoire et le processus cognitif ((Kieras, 1998) et (Tyler, 2004)).
(Zachary et al., 2001b) a défini des applications fonctionnelles suivantes, liées aux modèles psychologiques d'humain :

- accès à l'information, récupération et intégration,
- évaluation, identification des besoins de formation, etc.,
- prise de décision,
- formation pour définir dynamiquement les actions correctes ou désirées dans des scénarios de formation,
- coopération et collaboration,
- attribution dynamique de rôle /fonction,
- gestion de tâche,
- automation de tâche,
- gestion et transfert de la connaissance.

Le résultat des modèles peut être employé dans le processus de conception de système, par exemple, pour distribuer des tâches, ou pour répartir la tâche de travail dans le temps (Wightman, 2004). Ces modèles peuvent être utilisés pour évaluer les effets des facteurs défavorables, tels que la privation et la fatigue de sommeil, la monotonie et l'ennui, les maladies, les pics de température, l'alcool et autres drogues, ou les différences entre les individus ou groupes, comme le sexe, l'âge ou l'intelligence, sur la performance cognitive humaine dans les systèmes homme–machine (Sharbaugh, 1998).
"Des architectures cognitives" sont de bons exemples de ces modèles, qui tentent de simuler des processus de perception et/ou cognitifs humains (CAM, 2002b).
Par ces modèles, on peut analyser les effets de la fatigue, le stress, la motivation et la personnalité de l'opérateur de scie à ruban sur ses erreurs, et la quantité et la qualité de son travail.
D'un autre coté, on peut modéliser les effets du travail sur les caractéristiques psychologiques de l'opérateur. En utilisant ce modèle on peut, aussi, simuler sa perception du risque, et le changement de cette perception face aux obligations d'augmenter sa productivité.

IV. Les modèles sociologiques

Les modèles des sciences sociales ont tendance à se concentrer sur la structure des interactions humaines et des systèmes sociaux (Zachary et al., 2001a).
Les modèles économiques qui démontrent un genre de comportement humain sont également dans cette catégorie de modèles.
L'application de modèles sociologiques, lors de la conception des situations de travail ordinaires, est très limitée.
Par ce modèle, on peut analyser les effets mutuels de la vie sociale de l'opérateur de la scie à ruban et son travail.

1.3.6. Les modèles assistés par ordinateur

Les progrès récents de la technologie informatique fournissent un nouvel horizon pour des approches de modélisation d'humains en donnant la possibilité d'évaluer des aspects humains dans un temps, un coût et une exactitude acceptables. Cette technologie est utilisée considérablement dans tous les modèles décrits ; mais ici nous nous nous intéressons aux techniques de modélisation qui sont exclusivement dépendantes de l'utilisation des

équipements informatiques. Par exemple, même si ces modèles utilisent les techniques mathématiques, ces techniques ne simulent pas directement les attributs de l'homme, sans utilisation des algorithmes de modélisations informatiques.
Nous classons ces modèles comme : (a) les modèles d'intelligence artificielle et de simulation de processus cognitifs, (b) les modèles de mannequin numériques pour la réalité virtuelle, et (c) les modèles pour la simulation numérique.

I. L'Intelligence artificielle et les modèles de simulation cognitive

L'intelligence artificielle (AI) est le domaine de l'informatique, qui se concentre sur la création de machines intelligentes.
La formulation des premières simulations sur ordinateur de la performance cognitive humaine a commencé vers la fin des années 50 avec le travail sur les concepts de la machine de théorie de logique et du solutionneur général de problèmes (Zachary et al., 2001b).
Une partie de ces modèles, les techniques de représentation de la connaissance, sont des méthodes qui ont été développées, pour capturer et représenter la connaissance humaine sous une forme symbolique à l'usage des modèles informatiques. Les bases de connaissance se sont développées pour traduire la connaissance de vrais experts humains en règles et stratégies qui peuvent changer selon le scénario régissant le problème (Buchanan, 1989).
La plupart des applications de ces systèmes sont développées dans une des catégories suivantes (Buchanan, 1989) :

- Interprétation et identification,
- Prévision,
- Diagnostic,
- Conception,
- Planification,
- Surveillance,
- Correction et essai,
- Instruction et formation,
- Contrôle.

Les systèmes experts offrent un environnement où les bonnes possibilités des humains et la puissance des ordinateurs peuvent être incorporées pour surmonter plusieurs des limitations discutées dans les sections précédentes.
L'intelligence artificielle est utilisée, actuellement, dans des cas très limités, pour construire des robots intelligents comme modèle d'humain, mais ceci n'est pas encore largement appliqué dans l'industrie. L'objectif principal de ces modèles est de fournir un robot autonome, pour le travail dans les environnements qui sont inaccessibles ou dangereux pour les êtres humains.
Parfois certains modèles mathématiques, comme logique floue et les réseaux de neurones, sont classés dans cette catégorie, car ils peuvent simuler une partie de la perception, et le raisonnement de l'homme.
Par ces modèles, on peut simuler la façon d'identifier les objets, choisir la manière de travailler et la classification de viandes par l'opérateur de la scie à ruban.

II. Mannequin numérique

Pour animer les caractères 3D de l'homme sur l'ordinateur, il est nécessaire de concevoir et développer un modèle numérique d'humain (MNH) et ses mouvements et d'effectuer l'animation par ordinateur (Baksa, 2001). L'utilisation des MNHs (et en particulier humains virtuels) est une technique efficace pour visualiser, évaluer et analyser les caractéristiques et le comportement des humains, et voir leurs interactions avec l'environnement ((Arbor, 1998) et (Zachary et al., 2001b)). Les MNHs peuvent agir les uns sur les autres, avec le vrai

environnement (en tant que réalité augmentée), l'environnement numérique ou le vrai humain. En utilisant une base de données anthropométrique, l'utilisateur peut produire ou choisir la taille des humains, et par les dispositifs spéciaux d'entrée–sortie, tels des captures de mouvements, l'utilisateur peut agir avec les modèles d'humains, en temps réel. De nos jours ces modèles sont employés dans des applications industrielles pour étudier l'analyse ergonomique (par exemple le positionnement et le confort, la visibilité, l'accessibilité, la saisie, l'évaluation de force, de sécurité et de performance, et cette liste continue à s'allonger.
Employer des MNHs peut améliorer des paramètres de conception comme : le temps, la qualité, la sûreté, les coûts et la portabilité de la conception. D'autres spécifications importantes des modèles numériques sont leurs possibilités à s'intégrer avec d'autres techniques de modélisation d'humains et avec d'autres outils de conception.
L'avantage d'employer un humain numérique est que beaucoup de combinaisons et de situations peuvent être évaluées dans moins de temps et beaucoup plus tôt dans le processus de développement de produit ((SAFEWORK, 2003) (Merino et al., 2005), (Obergefell, 1998) et (Rix et al., 1998)).
Le mouvement du mannequin numérique (MN) peut être commandé avec des interfaces ou par simulation automatique. Les possibilités automatiques de simulation (désignées sous le nom du modeleur du mouvement) permettent à des simulations complexes d'être rapidement créées (DEPTH, 1998). Lors de simulations, le système détermine des informations telles que l'accessibilité, la visibilité et la force (DEPTH, 1998).
Des systèmes de base de données des caractéristiques anthropométriques (Abdel-Malek et al., 2004b), des postures et de confort (Seitz et al., 1999), basés sur des normes internationales, permettent de s'assurer que la conception des lieux de travail convient à un éventail d'opérateurs (Tecnomatix, 2003). Ce système crée des modèles simples d'humains ayant la taille du corps et les proportions correctes avec l'habillement, et des matériels de protection personnelle (COMBIMAN, 2004) cohérents avec la manière de travailler avec des outils (DEPTH, 1998). Des données de posture peuvent être stockées et chargées au modèle d'humain choisi (Rix et al., 1998).
La capture de mouvement permet au concepteur d'obtenir les données réalistes qui sont directement liées au type de posture et de mouvement d'une personne pendant qu'il agit avec les équipements dans son environnement réel (Abdel-Malek et al., 2004b).
Il y a de nombreux utilisateurs d'outils de types mannequin numérique, parmi ceux qui conçoivent et examinent des intérieurs et des habitacles de véhicule. Dans le domaine militaire, ils sont utilisés lors de la conception d'équipements militaires, en particulier pour simuler les activités d'utilisation. Les concepteurs et les ingénieurs de produit, les ergonomes, les responsables d'équipements, les spécialistes sur le lieu de travail, les architectes, les dessinateurs d'intérieurs, les animateurs de jeux d'ordinateur, et les animateurs de films constituent une courte liste d'utilisateurs de mannequins numériques, liste qui continue à se développer tous les ans (Laurenceau, 2001).
Ces mannequins numériques sont également employés pour fournir les données qui ne peuvent pas être mesurées pendant un essai, telles que des forces dans le corps, et compléter des essais avec des simulations de variation de paramètres (Obergefell, 1998). Les valeurs de confort de la posture peuvent être montrées dans une fenêtre supplémentaire ou sous forme de pseudo–couleurs sur le modèle d'humain (Rix et al., 1998). Les prévisions peuvent aussi inclure des informations concernant des possibilités de garder l'équilibre sans risque (Parkinson et al., 2003).
Les environnements virtuels se créent par des données importées de modèle CAO (COMBIMAN, 2004) ou la création directe des objets. L'utilisateur crée des mannequins avec les modèles biomécaniques d'humains précis, en assignant des tâches à ces humains numériques et en obtenant des informations valables sur leur comportement. Le modèle

permet de visualiser la possibilité d'exécution de certaines tâches, d'évaluer le risque de « désordre » pour le corps pour des tâches particulières, d'analyser la dépense énergétique, d'évaluer le confort des postures, d'obtenir de l'information sur des possibilités d'efforts, et de produire des enveloppes "possibles" et "confortables" d'extension ((Jack, 2004) et (Reed, 2003)).
Les analyses ergonomiques qualifient des opérations manuelles en ce qui concerne les normes ergonomiques. En utilisant les méthodes standard ergonomiques ((NIOSH, 1981) et (NIOSH, 1991)), des tâches de levée et de portée peuvent être efficacement examinées (Tecnomatix, 2003) ; ainsi que le temps de cycle de montage peuvent être déterminés (Tecnomatix, 2003).
On peut conclure qu'utiliser un mannequin numérique fournit de grands avantages pour arriver aux objectifs suivants (Tecnomatix, 2003) :

- Temps de cycle des opérations manuelles optimisés,
- Temps et coût de planification réduite,
- Communication améliorée des résultats de planification,
- Plus grande productivité des équipements de production,
- Ergonomie améliorée des lieux de travail,
- Documentation et réutilisation complètes des meilleures pratiques.

Ce modèle peut être utilisé pour la visualisation de processus de découpe de viande, faire des analyses de vision et accessibilité, vérifier les normes de la charge de travail, et identifier les dangers mécaniques, par exemple pour l'opérateur de scie à ruban.

III. La simulation numérique

La simulation numérique est le processus de développement d'un modèle paramétrique de concept permettant d'envisager le comportement du modèle en utilisant des valeurs aléatoires pour les paramètres. Un modèle numérique de simulation d'un système est une simulation par des paramètres de réplique du système en utilisant des nombres aléatoires créés. Ces valeurs aléatoires sont générées par un modèle procédural qui est une expression des rapports dynamiques d'une situation exprimée par des procédures mathématiques ou logiques (DOD, 2006). Le modèle peut « s'exécuter » des centaines ou des milliers de fois, pour produire des distributions globales de paramètres du système (CAM, 2002a). Dans une simulation, nous pouvons maintenir un contrôle bien meilleur des conditions expérimentales, ce qui n'est généralement pas possible lors d'expérimentations avec le système lui–même (Määttä, 2003).
Dans le domaine industriel, cette technique de modélisation est généralement employée pour prédire les comportements de systèmes complexes, dans l'analyse des files d'attentes, la prise de décision et l'analyse d'échec.
Une technique développée dans ce groupe de modèles, les algorithmes génétiques, est très utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes. Les algorithmes génétiques constituent un moyen de simulation sur ordinateur, pour lequel une population de représentations abstraites des solutions candidates évolue vers de meilleures solutions (ONL, 2006). Cette méthode peut être employée, dans des problèmes d'optimisation, pour simuler le raisonnement humain et les apprentissages, et pour trouver les solutions optimales pour des problèmes d'exécution humaine.
Ce modèle peut être utilisé pour créer des paramètres aléatoires lors de la définition des caractéristiques de l'opérateur de scie à ruban, et pour simuler ses erreurs.
Ayant un modèle analytique de file d'attente, on peut utiliser cette technique pour analyser le temps libre et occupé de l'opérateur.

Synthèse du chapitre II

Dans ce chapitre, les concepts de modèle et système ont été clarifiés, et des notions générales sur les modèles d'humains ainsi que le modèle d'humain en contexte industriel ont été présentées.
Ensuite, on a présenté une classification pour les techniques de modélisation d'humain, en s'appuyant sur ses applications dans un contexte industriel.
Ces modèles sont distingués par rapport aux techniques qui sont appliquées pour simuler les attributs et les comportements humains suivant des modèles descriptifs, des mannequins physiques, des modèles mathématiques, des modèles de comportement corporel, des modèles de sciences humaines et des modèles basés sur l'ordinateur. Chacun de ces modèles est divisé en plusieurs sous–classes.
Les domaines d'application, les objectifs, les avantages et les inconvénients de chaque classe sont discutés ; et les exemples de ses applications dans le contexte industriel sont présentés.
Cette classification essaie d'introduire l'idée que les techniques de modélisation d'humain sont développées à base de sciences très variées, et que chacune de ces techniques est appliquée dans des situations particulières et pour des objectifs particuliers.
L'objectif de cette classification est de connaître le contexte varié de la modélisation d'humaine.
Cette variété montre que le développement d'un modèle complet d'humain, s'il est possible, doit avoir la capacité d'intégrer des techniques de natures différentes, dans une architecture dynamique et adaptable.
On va poser les questions autour des futurs modèles de l'homme. Cette question nous a guidé à proposer une architecture multi–agent/multi–échelle pour modéliser l'homme dans le contexte industriel.
Ensuite, on appliquera cette approche pour le développement de techniques d'analyse de risque qui peuvent être appliquées grâce au développement d'un agent d'analyse de risque dans l'architecture proposée.
On va définir les concepts de base et les modèles utilisés, lors de l'analyse du risque professionnel, pour développer les techniques d'analyse de risque en utilisant les modèles numériques de système de production.

CHAPITRE III : SYSTEME-MULTI AGENT – MULTI-ECHELLE DE LA MODELISATION DE L'HOMME

1. Les futurs modèles de l'homme

Dans le processus de conception, les MHs sont employés pour prévoir l'interaction entre les humains et d'autres sous–ensembles, pour mesurer l'exécution, le confort et la sécurité ou pour évaluer les aspects ergonomiques d'un produit industriel du point de vue de l'utilisateur.
Les MHs, comme les autres outils de design industriel, doivent être développés pour répondre aux nouvelles exigences.
Ces modèles seront appliqués, en employant de nouvelles interfaces, pour saisir des données en temps réel. On propose une architecture multi–agents, à différentes échelles, pour répondre à ces conditions. Dans l'approche proposée, on définit les agents de modélisation et les agents d'analyse. En changeant le mode de collaboration de ces agents, la structure du système de modélisation peut être adaptée selon les conditions et les exigences de conception.

1.1. Intégration de modèles d'humain

Actuellement, les modèles d'humain industriel sont typiquement employés afin d'établir des modèles de compétence, performance, et/ fiabilité humaine. Il y a différentes opinions sur la possibilité d'intégrer les différentes techniques de modélisation d'humain. Selon (ONR, 1998b), les modèles d'humain sont des modèles partiels, soigneusement choisis et applicables dans un domaine limité, qui simule exactement quelques aspects de performance humaine. Il indique qu'il y a deux raisons qu'un modèle complet d'un humain sous la forme de logiciel n'ait jamais été produit, la première, c'est la complexité de la nature humaine et la deuxième, c'est qu'il y a beaucoup de manières différentes d'établir un modèle, et les aides de chaque approche réalisent différents buts.
Mais en pratique, on peut trouver plusieurs modèles qui sont développés à base d'une variété de modèles traditionnels, pour former un modèle intégré, avec des possibilités supérieures. (Chaffin, 2003) propose de combiner des modèles d'humains valides de prévision de posture et de mouvement, avec les modèles psychophysiques et biomécaniques pour fournir un arrangement beaucoup plus grand des limitations spécifiques de performances dynamiques humaines et de population, et pour fournir un outil de conception ergonomique puissant. Selon (Zachary et al., 2001b), sans intégration de modèle d'humain et de modèle de système technologique, le coût de développement et de contrôle des décompositions pour la modélisation de systèmes socio-techniques pourra être un frein important. Finalement, il ne fournit pas une solution, en disant que d'une part, un modèle plus intégrateur pourrait être trop encombrant pour justifier son utilisation, et d'autre part, les applications telles que la simulation à grande échelle de système ou les exercices distribués peuvent exiger fortement des approches de modélisation intégrée.
(Laurenceau, 2001) défend l'idée de l'intégration des techniques de modélisation de l'humain. Il discute du fait que les exigences de l'utilisateur peuvent s'étendre du psychologique au physiologique et les conditions d'évaluation peuvent être longues, coûteuses, et variables dans leurs résultats. Normalement, le concepteur doit considérer plusieurs objectifs simultanément, de la part de différentes disciplines. Résoudre plusieurs problèmes d'optimisation interdépendants, mais séparés, qui se produisent en considérant des objectifs variés, prendra beaucoup de temps et n'est pas toujours possible. La considération de tous les objectifs, simultanément, crée un problème plus grand, mais plus efficace avec des réponses plus satisfaisantes. Ces dernières années il est devenu plus facile de visualiser, évaluer, et analyser quantitativement des caractéristiques, des comportements, et l'interaction humaine dans l'environnement numérique (Laurenceau, 2001). Et il est envisageable maintenant de proposer un outil qui pourrait être utilisé efficacement pour intégrer des exigences de différents points de vue dans un prototype.

(ONR, 2000) déclare qu'un objectif peut être de créer des modèles de plus haut niveau du système en combinant des modèles développés pour différents sous–ensembles ou dans différentes disciplines. Dans un exemple mathématique fourni dans (Kim, 2004), il a proposé un modèle intégré sous la forme d'une formulation d'optimisation pour la simulation du mouvement humain pour trouver la conception optimale de configuration de système, appliquée en utilisant la consommation d'énergie et le confort de vision en tant que fonctions de coût multi-objectifs. Mais les modèles mathématiques ne sont pas faciles à créer et à appliquer dans les milliers de situations possibles.
(CHF, 1998a) démontre comment les différents modèles statistiques et biomécaniques peuvent être employés pour prévoir des forces musculaires de population. La première approche emploie les modèles statistiques de régression pour prévoir des possibilités acceptables maximum de poids ou de force en fonction des attributs de population. Une deuxième approche se fonde sur un concept biomécanique, déclarant que la force maximum, qui se produit pour un temps de maintien et un type d'effort donné, est une fonction de la force relative minimum produite par ses muscles à un point particulier.
Dans une autre étude faite par (Chung, 2003), une série d'expériences psychophysiques de laboratoire a été entreprise pour évaluer la charge posturale à diverses articulations, et un système postural d'évaluation de charge a été alors développé, basé sur une classification d'arrangement macro–postural. Une analyse statistique est utilisée pour prouver qu'il y a un rapport linéaire entre les deux types de malaise. La méthode proposée a été appliquée dans un logiciel afin d'automatiser le procédé d'analyse de la charge posturale et augmenter la rentabilité et l'applicabilité pratique.
Le gain produit fourni par l'intégration de modèles est dépendant (Laurenceau, 2001) :

1. Du but à employer un modèle d'humain,
2. Des paramètres qui doivent être représentés,
3. Des critères de conception qui doivent être établis pour évaluer le scénario acceptable ou non–acceptable d'utilisation du produit.

La raison de cette intégration c'est que si les différents outils basés sur un modèle d'humain sont nécessaires ou recommandés, alors tous les outils doivent avoir la possibilité de travailler avec des entrées communes, pour que les données de la conception à n'importe quel niveau puissent être capturées seulement une fois, et ainsi que les conceptions capturées à différents niveaux de détail soient décelables à d'autres niveaux.
Les résultats des études de (Laurenceau, 2001) démontrent que, du point de vue des utilisateurs, les modèles souhaitables d'humain sont des modèles avec des possibilités d'examiner les indicateurs de différentes disciplines, et la capacité de les intégrer avec d'autres outils. Mais, on doit travailler pour identifier des cadres d'intégration, pour développer des normes, et également pour créer des outils de support d'intégration (Zachary et al., 2001b).
Les avantages d'intégration de différentes méthodes sur l'amélioration de la performance de modèles sont évidents, mais notre objectif va au-delà de la performance et il s'agit d'avoir un modèle multi-aspect de l'homme, avec les caractéristiques physiologiques, psychologiques et sociales de l'homme.
Les analyses de risque, coût et performance qui normalement ne sont pas faites, lors de la conception classique de systèmes industriels, ne seront pas crédibles sans considérer l'adaptation, la violation, l'erreur, et la prise de décision de l'homme, simultanément, en plus des analyses physique et ergonomique conventionnelles.

1.1.1. Les futures exigences de la situation de travail

Les changements des demandes de situations de travail influencent le processus de conception, et augmentent la nécessité de faire que les techniques de modélisation deviennent

globales et précises en même temps, ce qui exige d'avoir des modèles intégrés de différentes sciences (mathématiques, sciences humaines, technologie de l'information, etc.), sous forme d'applications flexibles et rapides dans les environnements incertains.
Les éléments communs dans des modèles qui soutiennent cette intégration, peuvent être :

- Les sujets d'intérêt similaires,
- Les systèmes complémentaires (comme les interfaces, la plate–forme, et les bases de données) communes,
- L'interdépendance des résultats.

La discussion de futurs modèles d'humains est reliée avec les facteurs qui modifient le contexte d'utilisation de ces modèles :

- Révolutions technologiques qui changent des modes d'intervention d'humains dans les situations de travail vers une intervention sous une forme cognitive et plus critique,
- Augmentation de niveaux de demandes morales et légales de conception vers les objectifs globaux de système, comme la sécurité et la performance de système,
- Progrès scientifique et apparition des nouvelles approches en ergonomie,
- Progrès technologiques dans le domaine de la modélisation.

Le progrès technologique influence des systèmes de lieu de travail. Les futurs modèles d'humains s'appliqueront aux environnements dynamiques qui sont complexes, et difficiles à définir (Zha et al., 2003). Ils doivent représenter les systèmes fortement complexes et adaptables (George et al., 1999) pour supporter les évolutions suivantes (Savic, 2001) :

- L'élévation de niveaux de satisfaction de l'opérateur,
- L'élévation dans des principes de conception, d'échelon de travail aux niveaux travail processus et système de travail,
- L'appui sur des demandes cognitives, d'organisation, sociales et techniques de travail,
- Le besoin des outils macros (par exemple la productivité du travail, la sécurité et l'hygiène, la qualité de rendement), en plus de l'appui traditionnel sur les outils micro pour évaluer la santé de l'organisation ;
- L'étude des corrélations entre la qualité de la vie au travail, la productivité de travail, et la qualité de rendement pour optimiser l'organisation du système.
- L'inclusion de la performance humaine dans le contexte des procédés et des systèmes de travail.

Face aux critères de concurrences, les futures situations de travail doivent être conçues dans un temps plus court, et avec des budgets réduits, et doivent fonctionner plus efficacement.
(Keates et al., 2005) déclare que dans le processus de conception, de plus en plus, de mesures non– quantifiables sont exigées, et la rentabilité et l'accessibilité seront mesurées à travers des indicateurs qualitatifs purs. En plus, beaucoup de décisions, aux premiers stades de la conception, sont basées sur la connaissance empirique, et les MHs devraient être capables d'employer cette information inachevée et/ou incertaine pour réaliser une décision (Barthélemy, 2002). Une caractéristique de ces systèmes sera de regrouper des quantités d'information assez petites pour réaliser les décisions (Barthélemy, 2002), dans les niveaux supérieurs. Ces critères nous conduisent à développer les nouveaux canaux de communication entre le modèle, l'utilisateur et l'environnement, qui soient plus proches de la langue naturelle.
Ces systèmes de modélisation devraient pouvoir agréger les résultats qui sont produits par divers modèles de haut niveau, et choisir les solutions les plus favorables, basées sur l'évaluation globale. Elles joueront un rôle essentiel dans des communications multidisciplinaires avec les caractéristiques suivantes (Weber et al., 2005) :

(1) Matériaux et logiciel hétérogènes,
(2) Composants imprévus,
(3) Divers environnements sociaux,

(4) Configurations dynamiques, et
(5) Divers utilisateurs avec l'information incertaine et incomplète.

Seulement un modèle dynamique et autonome peut être utile dans ce contexte, et donc, à l'avenir, il y aura plus d'emphase pour développer des modèles intelligents. Par conséquent on est obligé de développer de nouvelles méthodologies pour soutenir les concepteurs dans les processus de conception (Zha et al., 2003).

1.1.2. Exigences des futurs modèles d'humains

Pour convenir aux nouvelles exigences, les modèles d'humain doivent être intelligents, présentant une architecture dynamique et une capacité d'auto-configuration pour s'adapter avec l'environnement défini par l'utilisateur.

Ces modèles doivent être capables d'utiliser des nouvelles méthodologies alternatives de communication, par exemple, le langage naturel, les règles, les réseaux sémantiques ou les modèles qualitatifs, pour combiner la connaissance a priori et des données empiriques (Castellano, 2000), qui sont incertaines, ambiguës, et incomplètes. Face à ce problème, ces dernières années, différentes techniques intelligentes telles que les systèmes (expert) basés sur la connaissance, les réseaux de neurones et la logique floue ont été employés pour analyser et prévoir des fonctionnements des opérateurs humains dans la conception/configuration des postes de travail et du travail ((Zha et al., 2003) et (Leino et al., 2004)).

Ces modèles d'humains seront employés en tant qu'applications flexibles dans les environnements incertains, avec les fonctions suivantes, qui sont définies par (Drogoul et al., 2001) pour les futurs systèmes de communications :

- configurations dynamiques changeant par l'introduction ou la disparition des composants (sous–modèles) ou en raison des changements de la manière dans laquelle leurs utilisateurs les emploient,
- fonctionnant avec l'information imprécise sur les divers environnements sociaux,
- ensembles fédérés de matériels et logiciels hétérogènes, qui seront caractérisés par leurs fonctions, leurs capacités de calcul et de communication,
- combinant des composants imprévus qui pourront produire des comportements "émergents",
- s'adaptant à leur environnement pour améliorer leur efficacité et pour éviter la reconfiguration d'utilisateur.

Les modèles devraient agir l'un sur l'autre, avec l'environnement, l'équipement, lors de la simulation de l'exécution des tâches. Plusieurs sortes d'interfaces sont nécessaires pour prendre diverses entrées, et elles doivent s'adapter avec les contraintes posées par l'environnement de conception. Les protocoles d'échange doivent fournir une plate–forme de partage de données entre des modèles de sciences humaines, mathématiques et les sous–ensembles informatiques (capteurs, équipements de capture de mouvements, bases de données et connaissances, ….).

Ils ont, également, besoin des systèmes artificiels reliés qui auront des éléments de créativité qui penseront et apprendront, pour réduire les efforts des utilisateurs, lors de reconfigurations.

Ces modèles devraient employer l'information imprécise, inachevée, et incertaine, comme elle est employée par des humains, pour le raisonnement et la prise de décision. Ces possibilités sont basées sur l'application des technologies de logique floue et de réseaux de neurones, intégrées avec des modèles de probabilité. Ces systèmes devraient utiliser les données floues et exactes pour assembler les avis des experts, et les mettre directement dans les modèles, afin de les utiliser, en accompagnement des données délivrées par les capteurs, pour produire les résultats compréhensibles et présentables en temps réel. L'utilisation des données imprécises et incertaines permettra l'intervention par les ingénieurs humains dans les phases amont et de conception et développement d'une plate–forme d'amélioration continue.

Le traitement de données en temps réel fournira les possibilités d'utilisation des périphériques interactifs et le développement de l'environnement immersif. Cette possibilité n'a pas une importance spécifique pour examiner beaucoup des aspects technologiques. Par contre, elle joue un rôle critique pour examiner la relation homme – système, et aider les utilisateurs à avoir une participation active dans les processus de conception et prendre des décisions sur les points liés à leur travail.
L'environnement 3D et dans les cas spéciaux l'environnement de réalité virtuelle est une plate–forme avec des caractéristiques spécifiques pour regrouper les informations et représenter les résultats de ce modèle. C'est une plate–forme facile à utiliser, rapidement programmable, utilisable dans la phase préliminaire du processus de conception, et facile à mettre en application dans différents systèmes de CAO. Cependant, les prix des programmes et de l'équipement de l'environnement virtuel devraient se réduire pour qu'ils soient utilisables par des concepteurs de situations de travail présentant des tailles différentes.

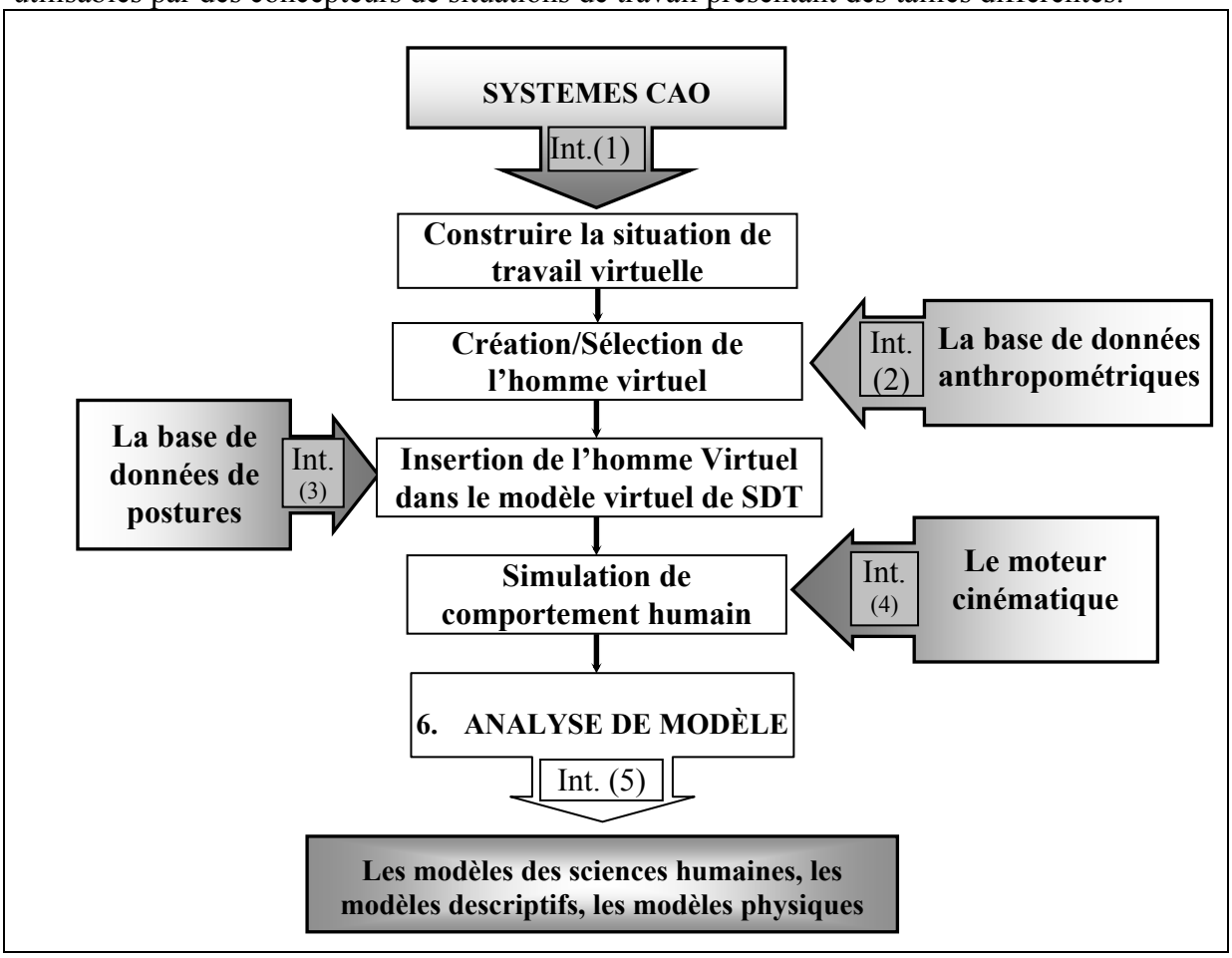


Figure 7. Une présentation schématique de relations entre les modèles d'humains virtuels et les autres technologies de modélisation de l'homme

La figure 7 représente certaines des relations entre le modèle virtuel d'humain et les systèmes de CAO, données d'anthropométrie, et modèles des sciences humaines. En plus le réseau des environnements virtuels encourage la collaboration des utilisateurs multiples par l'interaction en temps réel dans un environnement partagé. Ces systèmes fournissent la communication efficace entre les utilisateurs. Chaque utilisateur a des vues indépendantes de l'environnement.
Nous estimons que l'environnement 3D et la réalité virtuelle et la réalité augmentée ont des capacités incomparables pour intégrer et présenter les informations de natures différentes. Mais cette intégration n'est pas sur un plan déjà défini et organisé. Par exemple, malgré le

développement de beaucoup d'outils pour examiner des paramètres ergonomiques, dans les outils de conception 3D, on ne peut trouver aucune boite à outils pour analyser le risque d'accidents dans ces systèmes.
Le progrès technologique permettra bientôt de résoudre les problèmes de coût et les difficultés d'utiliser la réalité virtuelle, cette dernière devenant la plate–forme essentielle de définition et de développement des futurs modèles d'humains, mais simultanément, il est fortement nécessaire de développer et adapter les systèmes spécifiques de modélisation de l'homme, pour les intégrer dans cette plate–forme.
Les modèles intégrateurs essayent d'intégrer tous les composants multiples dans un modèle unique de connaissance humaine et de comportement, et, à l'avenir ces genres de modèles seront de plus en plus employés dans des procédés de design industriel. Ils incluront une hiérarchie des agents de logiciel pour faciliter l'intégration et la coordination de données dans un environnement réseau–central de multi– senseur. Ces modèles rassemblent des données des points d'émission de données dispersés et hétérogènes.
Un système central est nécessaire pour faire connecter les sous–modèles en faisant :

- Rassembler l'information d'environnement,
- Echanger des paramètres,
- Choisir les approches de modélisation,
- Modéliser les contraintes et les objectifs,
- Synchroniser le calcul,
- Agréger, inférer et présenter les résultats,

L'objectif sera de développer un système de modélisation qui soit capable de simuler un être humain qui pourrait comprendre, se déplacer et travailler -mentalement et physiquement-, dans un espace tridimensionnel qui reproduise la SDT (Merino et al., 2005), en fournissant les résultats des analyses demandées, dans une forme compréhensible.

2. Les agents de modélisation de l'homme

Dans les travaux sur la modélisation de l'homme, le travail de (Bindiganavale, 2000) a une place spécifique. Il a présenté un modèle multi–agents de l'humain pour simuler le comportement de l'humain lors de l'exécution des commandes reçues en langue naturelle. Ce système n'intègre pas les aspects d'analyses. Dans ce modèle, les agents sont associés à un contrôleur de processus, qui commande leurs actions basées sur la personnalité et les possibilités de chaque agent.
(Chedmail, 2003) a présenté un système multi-agents pour projeter la trajectoire de marche pour un mannequin dans un espace virtuel pour optimiser l'accès et la visibilité, en tenant compte des contraintes ergonomiques.
Un système multi–agents (SMA) peut être regardé comme un système logiciel évoluant dans un certain environnement, avec lequel il a des interactions. Comme une organisation artificielle, il se compose d'un certain nombre d'agents qui fonctionnent ensemble afin de réaliser quelques buts.
Selon (Mellouli et al., 2002), une méthodologie de conception d'un SMA devrait aider le concepteur à représenter des informations sur le changement d'environnement en cours d'évolution et ses effets sur le SMA, basée sur le développement de sept modèles :

1. Le modèle d'agent,
2. Le modèle de tâche,
3. Le modèle de la connaissance,
4. Le modèle d'organisation,
5. Le modèle de coordination,
6. Le modèle de communication,
7. Le modèle de conception.

L'homme est un système très compliqué et dynamique. Pour modéliser l'homme dans la situation de travail, on propose de développer une hiérarchie d'agents, avec un système central de commande qui contrôle les échanges des données et présente l'information résultante à l'utilisateur, dans un environnement 3D/virtuel. L'environnement numérique est choisi, car il est la plate-forme la plus courante de la conception, avec la capacité d'intégrer les différentes techniques, d'une manière efficace et compréhensible.
Le modèle proposé a une architecture dynamique sous la forme d'une approche combinée de multi–agents et multi-échelle, en distinguant des agents de modélisation et des agents d'analyse, comme définis ci-après :

1. Agent de modélisation anatomique (MA) : pour modéliser le corps humain (modèles anthropométriques) et son apparence (visage), ses champs de vue, des enveloppes d'accessibilité, comme un « mannequin numérique »,
2. Agent de modélisation biomécanique (MB) : pour modéliser le chargement statique et dynamique et l'équilibre, comme une « machine»,
3. Agent de modélisation cinématique (MK) : pour modéliser le mouvement du corps et de ses membres, vu les contraintes des modèles anatomiques, sans considérer la masse du corps ou les forces agissant dessus, comme une « mécanisme mobile »,
4. Agent de modélisation physiologique (MP) : pour modéliser les fonctions des organes du corps et les effets des agents externes sur eux, comme un « être vivant »,
5. Agent de modélisation psychologique (MS) : pour modéliser les processus et le comportement mental des humains de manière individuelle ou en groupe, comme un « être intelligent »,
6. Agent d'analyse des facteurs humains (AH) : pour analyser et optimiser le rapport physique et psychologique entre les humains et le lieu de travail, et les effets sur la fatigue, le malaise et le confort des opérateurs,
7. Agent d'analyse de risque (AR) : pour analyser et optimiser la fiabilité humaine, la maladie et les désordres professionnels et les conséquences des accidents sur l'humain,
8. Agent d'analyse économique (AE) : pour analyser et optimiser le coût et le bénéfice du travail de l'homme,
9. Agent d'analyse de performance (AP) : pour évaluer et optimiser la qualité, la quantité et le temps de travail.

Des agents de modélisation fournissent des informations pour des agents d'analyses. Pour l'usage dans divers environnements, le rôle et le mode de collaboration des agents doivent être déterminés, selon des objectifs et des critères.
Ces agents sont considérés pour développer un méta–modèle pour le système de modélisation de l'homme dans la plate–forme de réalité virtuelle.
Une partie de la définition de ce méta–modèle repose sur le développement d'un diagramme d'environnement, tel que proposé par (Mellouli et al., 2002). Ce diagramme représente les transitions des états entre les différentes situations que l'environnement peut subir. (Mellouli et al., 2002) a défini une situation comme un état complet du monde à un instant donné. Chaque situation peut être suivie d'un événement qui mène à une nouvelle situation. L'environnement est un ensemble de situations et de transitions entre ces situations. Chaque situation est décrite par un certain nombre de paramètres critiques.
Le diagramme d'environnement se compose de situations en démontrant les rôles joués par les agents et leurs rapports, dans chaque situation. Dans le diagramme d'agent, chaque agent identifié est indiqué par son nom et son/ses rôle(s).
Un changement d'une situation pourrait affecter les rôles ou tâches joués par les agents, la communication entre deux agents, la commande d'un agent sur d'autres ou la collaboration entre les agents. De ceci, nous proposons un diagramme d'agent où l'agent est identifié par son

nom, les rôles qu'il doit jouer et où des rapports de commande, de communication et de collaboration entre les agents sont également représentés.
Modéliser l'environnement et son impact sur la structure de l'organisation du SMA définit l'adaptabilité du système (Mellouli et al., 2002).
Le diagramme d'agent est défini par rapport au diagramme d'environnement, il représente la structure des agents (rôles) et de leurs rapports (des rapports de commande, de collaboration et de communication), et comment les situations environnementales les affectent (TEH, 2004).
Parfois il y a différentes approches pour modéliser un paramètre. Par exemple, (CHF, 1998b) et (CHF, 1998a) présentent deux approches différentes pour prévoir des possibilités acceptables maximum de poids ou de force. Dans ce cas, le système doit être capable de sélectionner la meilleure approche considérant les critères de la praticabilité de modélisation et la validité de réponses.
Un méta–modèle peut être défini pour modéliser l'homme. Selon (Dalle et al., 2000), la définition du méta–modèle nous permet de séparer des parties architecturales de la partie de modélisation, ce qui contribue considérablement à la réutilisation des modèles.

2.1. Agent de modélisation anatomique

Cet agent doit être capable de produire un humain ou une population d'humains virtuels, avec la taille correcte, considérant les caractéristiques présentées par l'utilisateur. C'est un système avec une base de données de mesures, de postures et de confort de corps utilisé pour simuler l'humain. Il doit être capable de construire des modèles d'humains avec une mesure anthropométrique pour les différents pourcentages d'hommes et de femmes, avec la flexibilité pour la personnalisation individuelle. Porter des vêtements différents, et ajouter les équipements individuels, comme les lunettes, et les casques de différentes formes, doivent être possibles. Les zones d'accessibilité et de visibilité sont aussi définies par cet agent.
Il reçoit les informations des angles des organes du corps de la part des agents d'analyse cinématique, et l'agent d'analyse biomécanique pour représenter les postures statiques d'un humain, et ses mouvements, lors d'une simulation de tâche.
Dans certains cas, ces modèles doivent être capables de simuler les limites pour des hommes handicapés.

2.2. Agent de modélisation physiologique

Cet agent modélise les aspects suivants :

- Métabolisme,
- Transpiration,
- Pulsations cardiaques et circulation du sang,
- Processus physiologiques de travail musculaire et mental et la sensation,
- Effets d'agents dangereux sur le corps humain,
- Effets physiologiques des conditions environnementales,
- Effets physiologiques de la fatigue et du sommeil,
- Effets biologiques de charge de travail.

Il reçoit les informations concernant les caractéristiques du corps de la part de l'agent de modélisation anatomique.

2.3. Agent de modélisation psychologique

Cet agent essaye de modéliser le comportement de l'humain, le raisonnement, la prise de décision et d'autres processus mentaux comme l'apprentissage. Il concerne aussi la

modélisation des relations sentimentales et sociales entre les hommes et entre l'homme et son environnement.
Les issues suivantes sont des sujets envisageables par cet agent :

- La motivation,
- Le courage (la prise de risque),
- La violence,
- L'irritabilité,
- La nervosité,
- La peur,
- L'attention,
- Les processus de tâches cognitives,
- La fiabilité humaine,
- Les effets de condition de travail et l'environnement sur la performance mentale.

2.4. Agent de modélisation cinématique

Cet agent est essentiellement utilisé pour produire des séquences de mouvements de l'opérateur. Les séquences peuvent être développées par l'interface graphique utilisateur standard ou par la capture des mouvements d'humains en utilisant l'instrumentation de la réalité virtuelle, en temps réel.
Cet agent cherche à trouver un mouvement humain réaliste (Farrell, 2004). Il reçoit les informations concernant les attributs du corps humain, les points de départ et d'arrivée, les points de contrôle, les informations de l'environnement (obstacles). Il optimise la combinaison des mesures présentées par l'agent d'analyse de performance, et des attributs tels que le malaise (Farrell, 2004), présenté par l'agent de facteurs humains.
Le travail essentiel de cet agent est de simuler le système de contrôle de mouvement humain. Ce système est un système de prise de décision, par l'humain, qui décide pour la vitesse et les trajectoires de mouvements. Cette décision est prise basée sur la perception de l'opérateur du risque, de la productivité et du facteur humain (comme confortement).

2.5. Agent d'analyse de facteurs humains

Il analyse la satisfaction de l'homme, en considérant les aspects physiques et psychologiques. Le malaise et le confort sont deux sujets parmi les plus importants dans cette analyse. (Marler, 2004) a présenté les concepts du confort et le malaise, en tant que quantités différentes mais complémentaires. Le malaise tend à être associé aux facteurs biomécaniques, tandis que le confort est associé aux « sentiments de la relaxation et du bien-être ». Selon (Farrell, 2004), le malaise physique se rapporte au déplacement des articulations d'une posture neutre.
Les critères tels que l'extension confortable, une série optimale de mouvements, et des chemins optimaux de mouvement (économie d'énergie) et les charges de travail, proposés par (Zha et al., 2003), sont des mesures, dans cette analyse.
L'autre indicateur, la charge de travail, est mesuré par la consommation d'énergie des muscles, où l'énergie totale des muscles est décomposée en tant que travail mécanique et chaleur (Kim, 2004).
Selon le modèle proposé par (Kim, 2004), le travail mécanique des muscles est égal à la somme de travail faite contre les forces appliquées, le changement de l'énergie cinétique, le changement de l'énergie potentielle de la gravité, et le changement de l'énergie de tension de muscle. La dissipation thermique est la somme de la chaleur d'entretien de muscle, de la chaleur de rapetissement de muscle, et d'énergie métabolique basique.

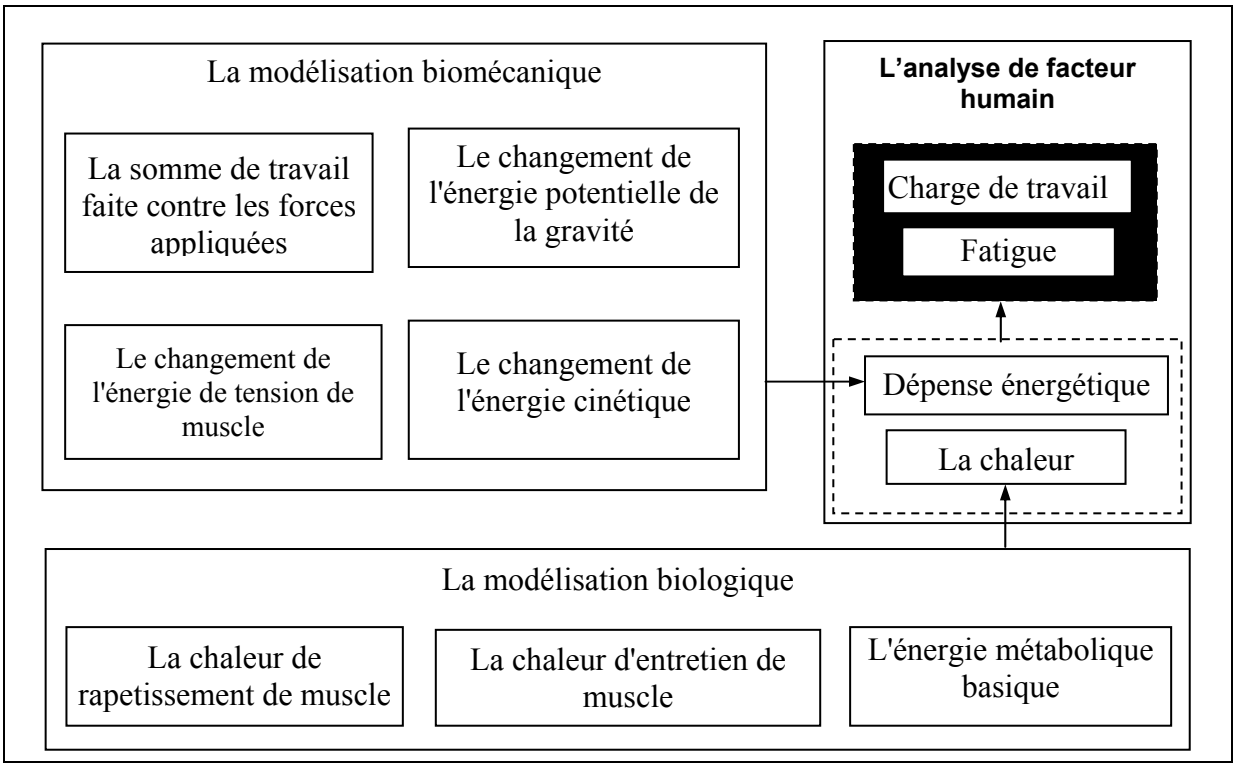


Figure 8. L'application du système multi–agents pour calculer la fatigue et la charge de travail

La Figure 8 montre l'application du système multi–agents pour calculer la fatigue et la charge de travail d'un opérateur, lors de la simulation d'une tâche physique.

2.6. Agent d'analyse de risque

L'agent d'analyse de risque effectue la mesure de la probabilité de risque produit par l'humain (analyse de fiabilité humaine) d'un coté et la mesure des risques qui menacent les hommes dans la SDT, d'un autre coté.
La fiabilité humaine est définie comme la probabilité que les humains exécutent correctement leurs tâches assignées dans des conditions données. En d'autres termes, la fiabilité humaine est la probabilité que les humains ne dégraderont pas leur comportement et qu'ils n'endommageront pas l'état du système du fait de leurs actions (Polet et al., 2003). Au contraire, une analyse d'erreur humaine est l'opposé, c'est-à-dire qu'elle se base sur le calcul de la probabilité qu'une erreur se produira en exécutant une tâche (Vanderhaegen, 1999).
(Linner et al., 2000) a présenté le processus d'endommagement des opérateurs lors de travail manuel, et (Bernier, 2003) a présenté les différents facteurs à considérer lors de l'analyse de risque pour ce type de travail.
Cet agent est aussi responsable de déterminer la probabilité et la sévérité de l'endommagement des opérateurs, lors d'accidents.

2.7. Agent d'analyse de performance

Selon (CAM, 2002a), l'évaluation du système total basée sur la simulation ne peut pas être effectuée sans modèles de performance humaine.
Cette analyse doit être appliquée pour les travaux mentaux et physiques, en évaluant la quantité et la qualité de travail avec le temps, pour s'assurer que le travail assigné à l'opérateur est raisonnable.

Sur les parties de travail mental, un effort important s'est fait pour modéliser les aspects distincts, comme des dispositifs de base de la sensation, de la perception, de l'activité motrice, du traitement de l'information, et de la prise de décision (Zachary et al., 2001a).
Selon (ONS, 1992), l'évaluation des performances humaines, la plupart du temps, est employée pour des études d'interface homme–machine, en se concentrant sur l'environnement de travail pour des compensations de diverses conditions.
En plus, pour les travaux physiques, plusieurs mesures de performance humaine ont été étudiées et montrées relativement à la production de divers mouvements et de maintiens normaux.
La performance humaine est variable, ce qui signifie que pour obtenir des mesures stables de la performance, le développement des modèles de prévision exige un effort important et l'étude de nombreux sujets humains (Zachary et al., 2001a).

2.8. Agent d'analyse économique

Cet agent sera développé pour estimer le coût et le bénéfice du travail de l'homme en considérant les éléments suivants :

- Le coût de base du travail de l'opérateur, en considérant le temps de travail, le salaire, les taxes et assurances, la cantine, le transport, les coûts supplémentaires pour le travail hors des horaires normaux, les soutiens administratifs et les absences,
- Le coût d'intégration considérant les coûts d'embauche, de formation et la période d'apprentissage,
- Le coût de risques considérant les maladies et accidents professionnels, provoqués par la présence humaine,
- La valeur ajoutée du travail de l'opérateur,
- Le rôle de la présence d'humains pour prévenir des accidents.

L'explication de la façon de calculer ces éléments est en dehors du champ de ce travail.

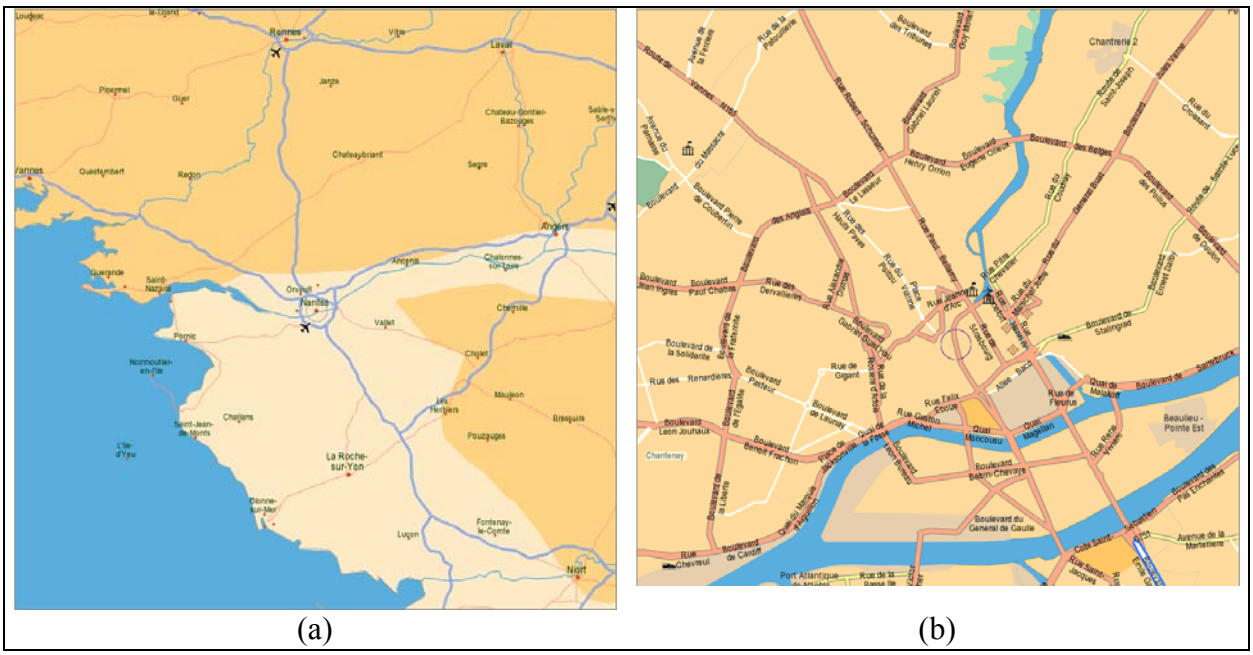
3. Les échelles de modélisation de l'homme

Le modèle peut représenter les processus internes de l'humain, ou il peut simplement représenter son comportement (Zachary et al., 2001a). Selon (Zachary et al., 2001a), on peut définir trois niveaux de modélisation : le niveau individuel, celui des équipes ou le niveau d'organisation.
Dans la plate–forme de modélisation de SDT, les MHs sont employés pour décrire les attributs et/ou le comportement des opérateurs ou des utilisateurs des produits, dans les échelles suivantes :

- L'analyse de groupe de travail : à cette échelle, le comportement de la population, en considérant la distribution géographique ou statistique des hommes ou ses attributs est envisagée. Les caractéristiques de la population sont utilisées pour prédire les comportements sociaux et pour classifier les réactions et les attributs de groupes. La distribution de dangers, produits par impact des effets dangereux aux populations, est analysée. La façon d'effectuer les analyses est basée sur l'utilisation des bases de données standards ou les résultats statistiques de l'observation directe.
- L'analyse du corps entier : dans ce mode, la composition interne du corps humain est négligée et l'être humain est modélisé comme une boîte noire ou un élément simple pour analyser sa position et son interaction avec les autres sous–ensembles du lieu de travail. L'analyse de la charge de travail et de ses effets est également considérée.
- L'analyse d'organe : à cette échelle les événements phénoménologiques à l'intérieur du corps de types phénomènes physiologiques, biomécaniques et psychologiques sont étudiés pour comprendre les fonctions des organes.

- La microanalyse : cette analyse concerne le comportement et les attributs physico–chimiques des tissus et des cellules. L'application de ce genre d'analyse, dans un contexte industriel conventionnel, est limitée à l'étude du comportement de quelques organes critiques (par exemple les yeux), et à l'analyse des effets indésirables des agents dangereux sur le corps humain.

Le système de modélisation de l'homme doit être capable de relier les informations à différents niveaux (échelles).



(a) (b)

Figure 9. Une illustration schématique de l'idée de multi-échelle

La figure 9 montre qu'un seul concept peut être présenté dans deux échelles différentes selon les objectifs de l'étude. De la même manière, l'échelle de modélisation de l'homme doit être cohérente avec la situation et les objectifs de modélisation. Par exemple, si un opérateur est loin du danger, ce n'est pas nécessaire qu'on distingue le position de sa tête de la position de sa main, mais quand il s'approche du danger, il faut distinguer ces deux positions, pour augmenter la précision d'analyse.

Pour un danger loin des opérateurs, l'analyse de risque peut être sur les dommages en groupe de travail, donc on les mesure avec le nombre des gens endommagés, le degré moyen de dommage et le taux de mortalité, qui peut être produit à cause des accidents

Mais pour des dangers plus proches, l'analyse se fait à l'échelle du corps entier, en considérant la distance de chacun des opérateurs du danger, et finalement pour un danger non-mortel qui est très proche d'un opérateur, l'analyse doit être faite à l'échelle de ses organes, sinon elle n'est pas crédible. Dans ces cas l'unité de dommage sera le degré de dommage ou les blessures des organes de l'opérateur.

Parfois, pour calculer les différents paramètres demandés par l'utilisateur, les modules d'analyses de risques doivent être activés dans plusieurs échelles, simultanément.

4. Architecture du système MA/ME pour modéliser l'homme dans la situation de travail

Les approches multi–agents /multi–échelle peuvent être l'une des solutions pour construire un modèle adaptable pour l'homme, dans un environnement numérique.

La figure 10 propose une représentation schématique de ce système. En utilisant l'abréviation "int", dans cette figure, plusieurs interfaces de données sont montrées qui sont employées pour relier les agents de ce système.
Le choix et la gestion de l'architecture de modélisation seront exécutés par un système de commande central qui est en charge de :

- Communiquer avec l'utilisateur, d'autres systèmes et l'environnement,
- Déterminer des contraintes et des objectifs,
- Déterminer les caractéristiques et l'échelle d'agents,
- Déterminer les rôles des agents,
- Echanger et partager des paramètres,
- Contrôler et synchroniser les attributs des agents et leurs comportements,
- Agréger et présenter les résultats.

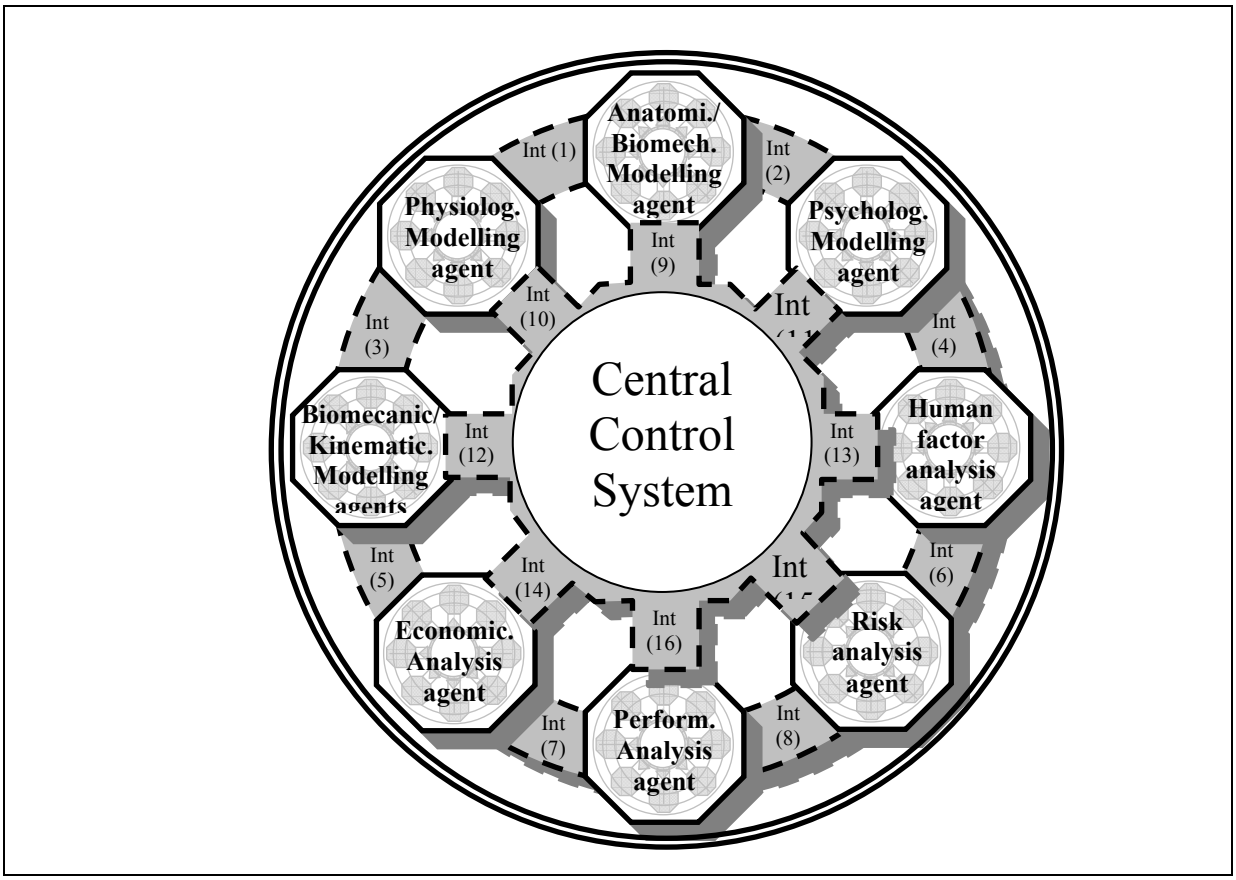


Figure 10. Le système multi–agents de modélisation de l'homme, y compris des agents de modélisation et des agents d'analyse

Chacun des agents de modélisations et d'analyses est composé d'une série de sous–agents.
Les diverses situations doivent être déterminées, basées sur les configurations possibles de conception. Puis, basé sur des objectifs et des contraintes liées à chaque situation, le rôle des agents et leurs modes de collaboration sont déterminés.
La collaboration entre les agents peut prendre les formes suivantes :

1. Collaboration instantanée : calcul et représentation des résultats en mesurant les paramètres dans toutes les séquences de simulation, séparément
2. Le mode d'alerte : vérifier les critères de conception, par la simulation ou la configuration de conception, et l'alerte quand des contradictions apparaissent,

3. Le mode de recherche : calculer les paramètres, une fois exigés,
4. Le mode inactif : hors d'exécution.

En développant les systèmes multi–agents nous modélisons un système, qui a des comportements et des interactions complexes par émergence des formes plus simples du comportement (Juchmes et al., 2005).

Comme exemple, on a modélisé le mouvement d'un opérateur, quand il marche au sein de la situation de travail (Shahrokhi et al., 2006e), pour aller d'un point A à un point B. Les diverses situations, vu les combinaisons de l'existence des risques, et une charge à porter, sont déterminées. Le but de ce modèle est de choisir et adapter les agents appropriés, et de les intégrer pour construire une architecture de modélisation adaptée, pour les diverses situations prévues.

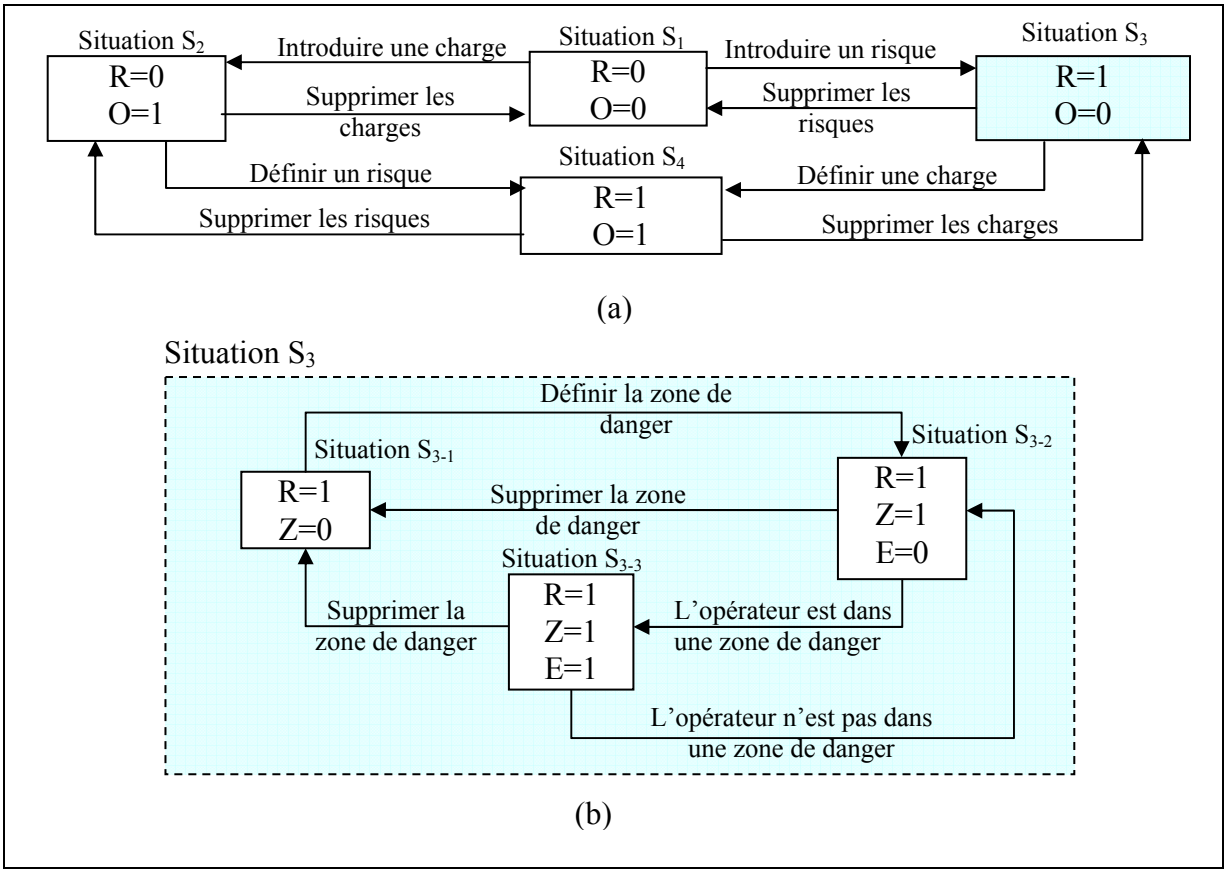


Figure 11. (a) Le diagramme de l'environnement, (b) Le diagramme de l'environnement dans une situation de travail avec les objets dangereux

En utilisant un diagramme d'environnement, introduit par (Mellouli et al., 2002), les caractéristiques de différentes situations sont formellement représentées (figure 11.a). Les variables booléennes : le R et le C démontrent respectivement l'existence des risques (R) ou le transport d'une charge (C) dans le lieu de travail,. Par exemple la situation S1 concerne le cas où il n'y a pas de risque dans la situation de travail, et l'opérateur marche sans porter une charge. Cette situation peut être transformée en la situation S2, si l'utilisateur associe une charge à l'opérateur, alors l'opérateur doit marcher avec une charge dans ses mains. La situation S3, montre le cas où un ou plusieurs dangers sont définis dans le modèle, en conséquence l'opérateur doit trouver son chemin en considérant ce danger (figure 12). Et finalement la situation S4 est la situation où les dangers et la charge sont définis par l'utilisateur, et l'opérateur doit marcher en portant une charge et en évitant les dangers.

La figure 11.b est le diagramme détaillé d'environnement pour la situation S3 de la figure 11.a.
Le Z, dans ce diagramme indique si l'opérateur est situé dans une zone dangereuse définie ou pas.

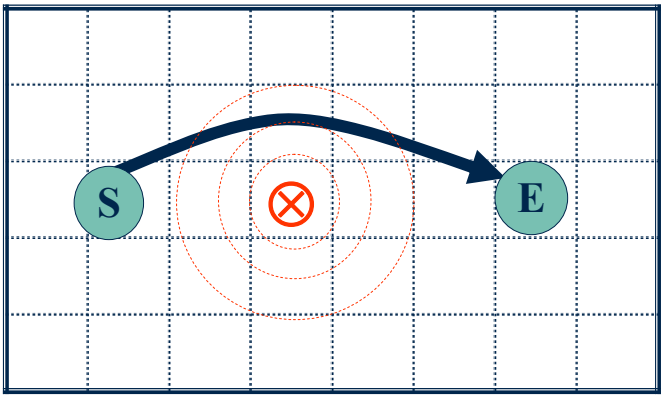


Figure 12. La trajectoire d'un homme pour partir du point S vers le point E, en évitant un danger

La figure 13 présente les modes de collaboration pour les différents agents, lors de la simulation de plusieurs de ces situations.

Agent	Mode de la collaboration		
	E_1	E_2={E_1+Risque}	E_3={E_2+Charge}
Modélisation Biomécanique	Inactive	Inactive	Instantané
Modélisation cinématique	Instantané	Instantané	Instantané
Modélisation Physiologique	Recherche	Recherche	Instantané
Modélisation psychologique	Inactive	Instantané	Instantané
Analyse de coût	Recherche	Recherche	Recherche
Analyse de Facteur humain	Recherche	Recherche	Alerte
Analyse de Risque	Inactive	Instantané	Instantané
Analyse de Performance	Inactive	Instantané	Instantané

Figure 13. Le changement de mode de coopération des agents, selon différents scénarios (E_1 : Marcher, E_2 : Marcher dans une situation dangereuse, E_3 : Marcher dans une situation dangereuse en portant une charge)

Les rôles des agents changent, selon les modifications de la configuration du système par l'utilisateur, alors la structure du modèle s'adapte à la nouvelle situation.
La figure 14 montre le changement de l'architecture du modèle selon les différentes situations. L'architecture 1 est développée pour modéliser le mouvement d'un opérateur. L'architecture 2 concerne la modélisation d'un homme qui marche dans un environnement encombré (avec des obstacles). L'architecture 3 est le cas où on ajoute un risque sur le chemin de l'opérateur, et l'architecture 4 montre le cas où, en plus, il porte une charge lors de son déplacement.

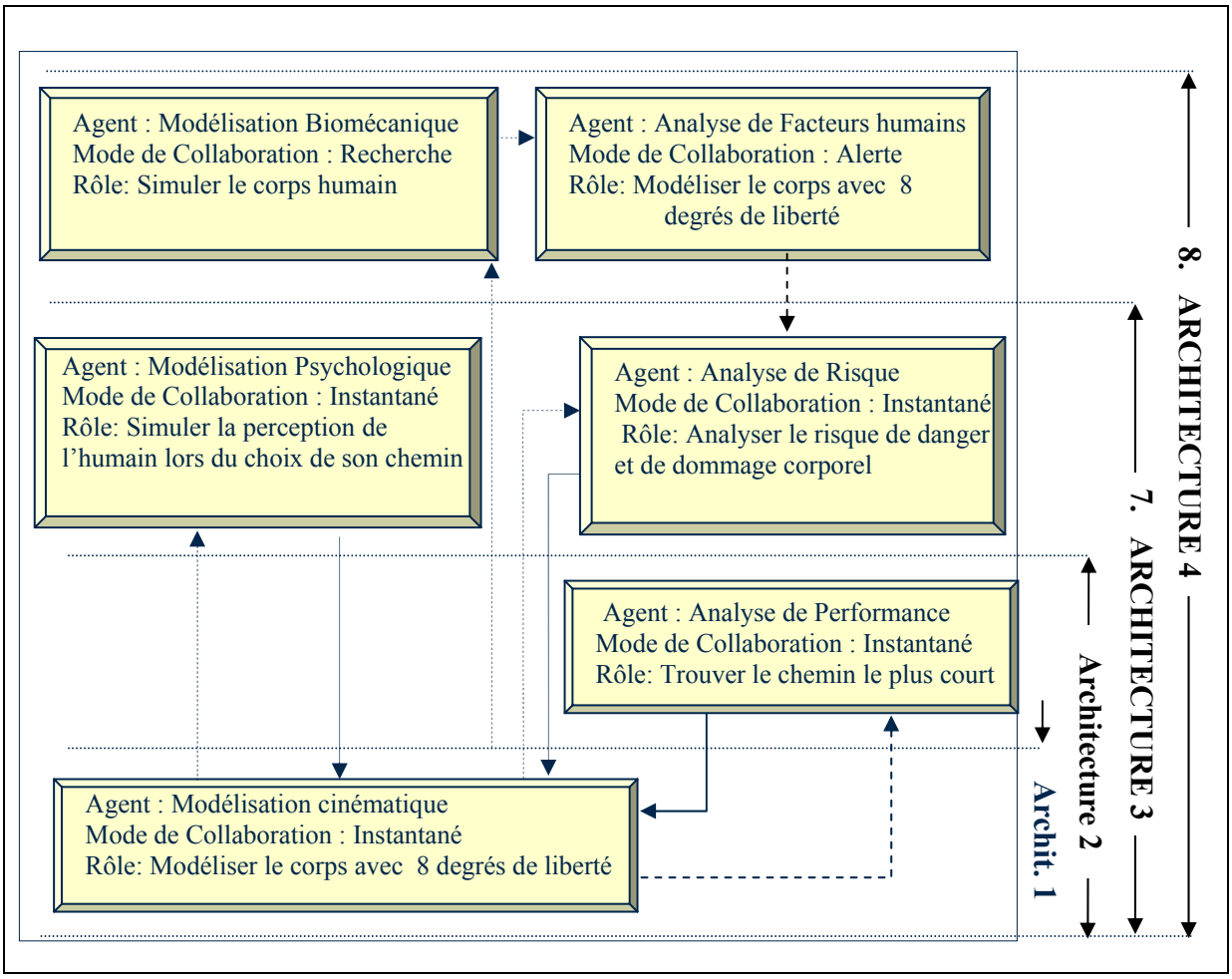


Figure 14. Une démonstration schématique de la définition du rôle des agents selon la configuration du système

On a développé un module d'analyse de risque au sein de la plate–forme de DELMIA pour calculer l'index de risque au cours du processus de conception d'un système industriel. Ce module est appliqué pour analyser le risque pour l'être humain dans les modes de collaboration « instantané » et « recherche », aux échelles de l'ensemble du corps ou des organes du corps. En utilisant un diagramme d'agents, présenté par (Mellouli et al., 2002), le rôle et l'échelle des agents, leurs échanges de données et le mode de collaboration des agents de diverses situations sont définis. Les caractéristiques numériques du corps humain sont déterminées en employant un agent de modélisation anatomique. Après avoir défini la source et les risques de danger pour l'être humain, dans le lieu de travail, basés sur l'analyse d'arbre

d'événements, un module d'analyse de risque, en mode de collaboration « recherche », est utilisé pour calculer les index de risque d'accidents. En ajoutant des zones dangereuses par utilisateur, un module d'analyse de risque s'active pour calculer les risques pour des organes du corps humain par la mesure instantanée de la distance des organes du corps aux sources de danger. La variable booléenne E, dans la figure 11.b, traduit la présence de l'opérateur dans une zone dangereuse. L'agent de modélisation cinématique détermine les postures intermédiaires pour faire marcher l'opérateur. L'agent d'analyse de risque emploie ces postures pour calculer les distances des organes du corps aux zones dangereuses, pour chaque séquence de simulation, séparément. La figure 15 montre une image du processus de calcul de l'index de risque, pour différents organes de l'opérateur, dans le mode « instantané » de collaboration.
Comme un agent de modélisation psychologique, un module de « trouveur » de trajectoire est développé, pour trouver le chemin le plus court et le plus sûr, selon la perception de l'opérateur du lieu de travail. S'il n'y a aucun obstacle et de zone dangereuse dans le lieu de travail, l'agent de modélisation psychologique est inactif, et la trajectoire optimale sera un chemin rectiligne qui relie le point initial au point final. Après avoir ajouté les obstacles ou les zones dangereuses dans le lieu de travail, un algorithme de programmation dynamique emploie les résultats des agents d'analyse de risque pour trouver la trajectoire qui fournit le meilleur compromis entre la sûreté de la trajectoire et sa longueur, selon la perception de l'opérateur.

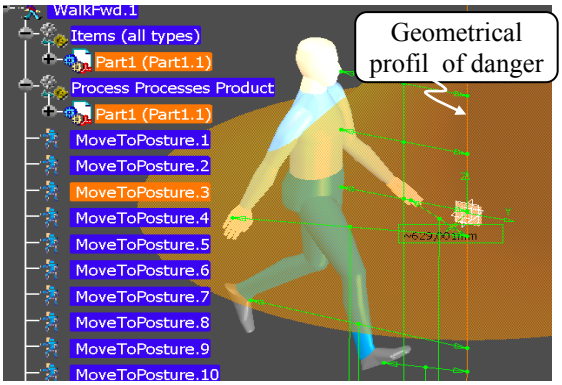


Figure 15. Agent de mesure instantanée de risque, à l'échelle des organes du corps

Il faut noter que la nécessité du changement de rôle et d'échelle des agents peut se produire lors de la simulation. Donc, avant de construire chacune des séquences de la simulation, un algorithme doit être appliqué pour vérifier le contexte de la simulation pour réorganiser les agents.
Cet algorithme considère les effets de changement de la position et les caractéristiques des éléments dans la situation du travail, et modifie l'architecture du modèle pour arriver aux objectifs de la modélisation.
Ces objectifs peuvent être explicites (demandés par l'utilisateur) ou implicites (nécessaires pour simuler un comportement naturel).
Par exemple, si un opérateur est loin de la source de danger, son mouvement est plus libre et plus rapide, et son objectif est d'augmenter sa performance. Psychologiquement, aussi, quand il est loin du danger, son attention n'est pas attirée pas le danger.

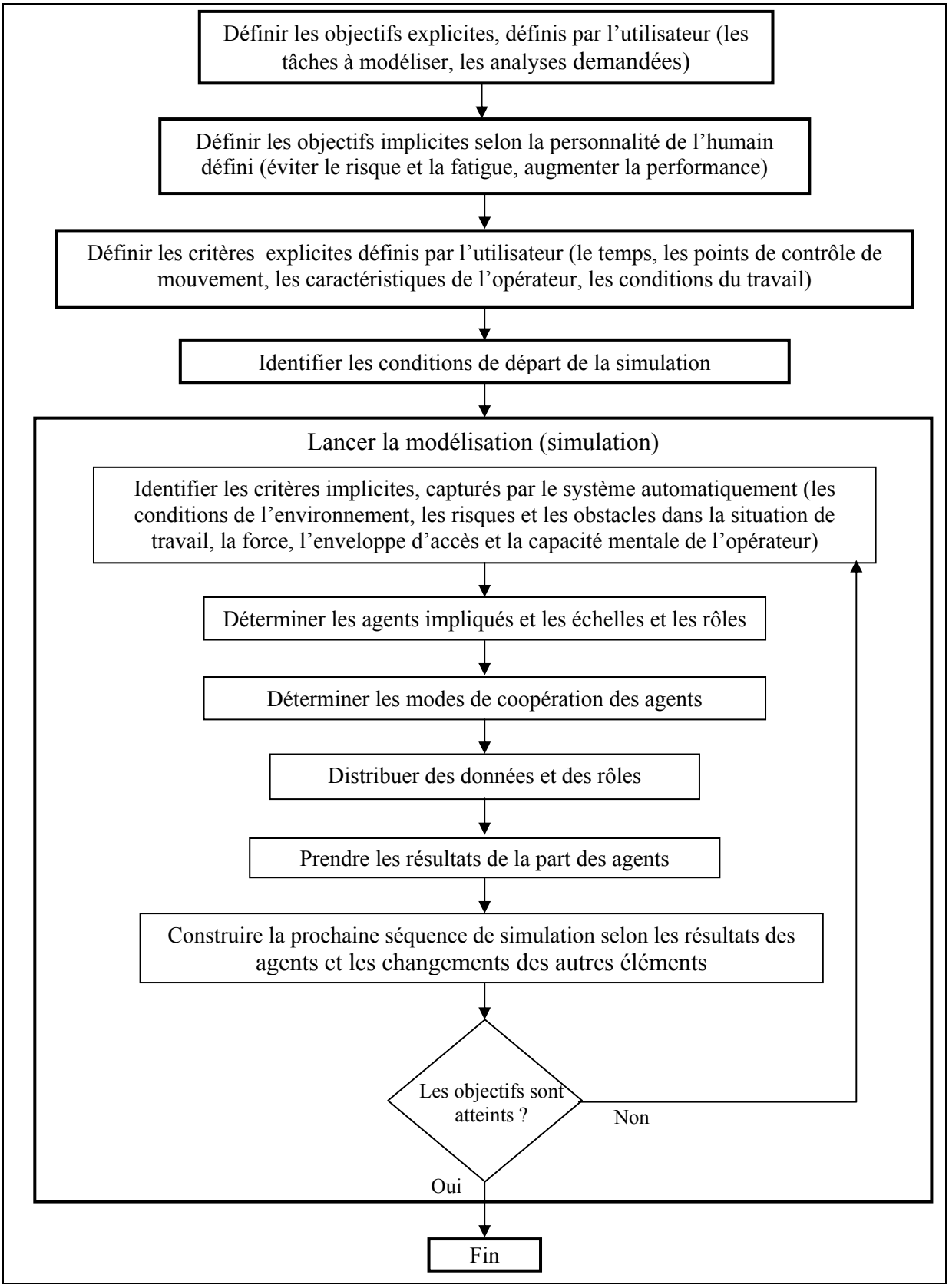


Figure 16. **L'algorithme de MA/ME pour la simulation de comportement humain**

Par contre quand il s'approche d'un danger, son comportement est différent, il commence à être prudent, en faisant plus attention à son travail et à ses mouvements, en conséquence il se comporte plus doucement et la sécurité devient un nouvel objectif.
La Figure 16 montre le déroulement de l'algorithme de contrôle du système multi-agent/ multi-échelle pour simuler l'homme, par ordinateur, dans l'environnement 3D.

Synthèse du chapitre III

La situation de travail (SDT) est représentée comme un système socio- technique, mais si on regarde les outils de conception de SDT, on voit que les parties de modélisation techniques sont beaucoup plus sophistiquées et adaptées et se sont développées pour tous les aspects de conception technique.

Par contre, pour modéliser l'homme, ce qui dans la littérature est considéré comme la partie la plus importante des systèmes, le nombre et la capacité des outils sont beaucoup plus limités.

Bien que cette réalité ne soit pas un problème récent, et qu'il y a des efforts pour améliorer ces situations, les résultas de ces efforts, jusqu'à présent, étaient de développer les modèles d'humain, comme les robots marchant, avec l'apparence humains. Cela veut dire que les techniques utilisées pour modéliser l'homme, dans l'environnement 3D, moyen qui est le plus utilisé pour la conception, sont similaires aux techniques utilisées pour les objets physiques. Alors, on peut examiner les forces, visualiser les tâches et mesurer les distances. Ces outils sont intéressants et applicables pour développer une tâche mécanique et manuelle, mais ils ne permettent pas de modéliser de manière vraiment réaliste l'homme dans la situation de travail.

Si on ne s'intéresse pas aux humains, naturellement, on ne peut pas modéliser leur capacité à parvenir à résoudre des problèmes inattendus et leurs faiblesses les amenant à faire des erreurs, ainsi que d'autres aspects spécifiques de l'humain, qui déterminent le comportement réel d'un être humain.

Pour modéliser l'homme, il faut qu'on mobilise tous les potentiels de modélisations dans tous les domaines, sinon, ces modèles ne seront pas cohérents et applicables pour concevoir les futurs systèmes, dans lesquels les modes d'intervention de l'homme évoluent rapidement.

L'objectif de ce chapitre était de présenter un modèle applicable pour la modélisation de l'humain, lors de la conception de SDT. D'abord différents avis concernant l'intégration de techniques de modélisation de l'humain ont été présentés.

Les caractéristiques de futurs systèmes ont été discutées et les futures exigences des modèles d'humains sont expliquées. Avoir des composants et une configuration variable, être applicables dans un environnement dynamique et pouvoir traiter des informations incertaines et imprécises, sont parmi ces exigences.

Ensuite, les objectifs d'utilisation des modèles d'humains ont été classés en deux parties : la modélisation et l'analyse.

Pour essayer de développer un modèle plus réaliste, on s'est posé des questions par rapport à différents aspects relatifs à l'humain, et les façons de les modéliser.

En répondant à ces questions, on a essayé d'analyser et de classer tous les modèles de l'homme dans tous les domaines, surtout dans le contexte industriel. On les a classés par rapport aux technologies utilisées. En même temps, c'est une classification sur les applications de ces modèles car chaque technologie est utilisée pour une série spécifique d'objectifs.

L'homme présente une grande variété d'aspects, et il y existe de nombreux modèles, chacun essayant de modéliser une partie de ces aspects.

Les modèles descriptifs sont des outils multidisciplinaires de communication, généralisés et non-sophistiqués, ils sont pratiques pour aider à comprendre et motiver à participer. Ils sont adaptés pour représenter les aspects conceptuels.

Les modèles mathématiques sont les modèles les plus abstraits qui simulent et fournissent les solutions théoriquement optimales. Ils contribuent à la réalisation d'outils sophistiqués qui sont utilisés pour les aspects précis et détaillés, quand il y a des données précises. Une grande amélioration, dans ces méthodes, s'est faite par l'introduction de la logique floue, pour rapprocher ces modèles de la réalité, en accord avec la perception humaine.

Les modèles physiques ont considéré l'humain comme une machine et ne regardent que des aspects physiques du corps. Ils donnent lieu à des outils très sophistiqués, par nature, mais ce sont les modèles les plus adaptés pour être appliqués dans l'environnement 3D, pour mesurer et vérifier les contraintes physiques.
Par contre les modèles des Sciences Humaines sont, d'autre coté, plus faciles à comprendre par l'humain mais ce sont des modèles plus difficiles à utiliser dans les applications 3D de conception (il y a une exception pour les modèles anthropométriques). Par contre, ils modélisent les aspects les plus critiques de l'homme.
Les modèles assistés par ordinateur, et tout particulièrement les mannequins numériques, sont les modèles les plus utilisés, lors de la conception, parmi toutes les autres sortes de modèles.
Ils sont faciles à utiliser mais sont fortement intégrables avec les modèles CAO de conception.
On voit qu'il y a plusieurs technologies pour modéliser l'homme, mais en dehors des modèles utilisés en 3D, les modèles qui essayent d'intégrer plusieurs aspects de l'humain en même temps sont très rares.
Alors, on ne voit pas une démarche vers le développement d'un modèle pour simuler plusieurs aspects de l'humains, apportant une approche structurée pour faire des analyses au niveau des systèmes, comme le risque, la performance, le coût et les facteurs psychologiques et sociaux.
Il existe une émergence pour importer tous les modèles biomécaniques, cinématiques, anthropométriques et descriptifs dans des plates-formes de conception 3D, avec la possibilité de faire des analyses de facteurs humains courants.
Mais par contre, les aspects d'analyse psychologique et cognitive, ainsi que les analyses de coût, performance et sécurité n'ont pas encore trouvé leurs places dans ce type de plate-forme, alors que, selon les avis des experts, ces aspects seront les plus nécessaires, lors de la conception et le développement de futurs systèmes.
On peut dire que la nouvelle technologie de conception utilise toujours les techniques qui se sont développées à la naissance de la science de l'ergonomie.
Alors il y a une énorme capacité perdue pour modéliser l'homme lors de la conception avec les applications 3D, car les diverses techniques de modélisation de l'homme n'ont pas poursuivi l'émergence nécessaire vers leur insertion dans les outils de conception.
Actuellement, ces modèles sont sous des formes dispersées et aucun modèle n'a été présenté pour définir les interrelations entre ces modèles et pour les regrouper dans une structure de méta- modèle.
La question est donc de savoir comment on peut avoir un modèle naturel et avec tous les aspects nécessaires de l'homme dans l'environnement 3D ?
Quand on parle d'un modèle complet d'humain, cela veut dire un modèle qui se comporte comme un humain, dans tous les aspects étudiés, d'une manière naturelle, intelligente et adaptative.
En étudiant les différentes technologies de modélisation de l'homme, on comprend qu'un des points les plus importants, et peut-être le challenge le plus important, est la diversité de technologies de modélisation et la grande différence qui s'est produite, au cours du temps, entre les méthodologies des Sciences Humaines et les Sciences dites « dures ».
Alors, la nature des données, la façon de les traiter et de raisonner sont différentes, car les Sciences Humaines sont développées pour étudier un être flexible, adaptatif et avec des aspects parfois inconnus. Alors, au contraire des aspects techniques, les méthodes utilisées en Science Humaine sont conceptuelles, basées sur des théories et expériences, et parfois, elles ne sont pas capables de proposer des solutions absolues.

Ces différences empêchent d'intégrer ces modèles avec les modèles mathématiques, qui sont normalement utilisés dans l'environnement 3D, et on n'imagine difficilement qu'on puisse bientôt développer des modèles mathématiques purs pour ces sciences conceptuelles.
Les seules technologies proposées pour utiliser la perception, la sensation et le raisonnement humains, ce sont « des technologies de calcul du type « soft computing », notamment en utilisant les techniques d'algorithme génétique, la logique floue et les réseaux de neurones.
Un autre problème vient de l'architecture. On ne peut difficilement avoir l'espoir de développer des modèles mathématiques complets, pour modéliser tous les aspects humains dans une forme fixe et unique, pour les raisons suivantes. Premièrement, l'humain est une entité dynamique et adaptative, alors on ne peut pas le modéliser avec les méthodologies qui sont développées pour les entités ayant des caractéristiques statiques et connues. Deuxièmement, développer ce modèle exige de savoir manipuler un modèle d'une taille énorme, car cela exige d'utiliser des données incertaines, imprécises et incomplètes, pour des objectifs variés, fournis par les diverses disciplines. Le développement de ce modèle pour simuler tous les hommes, avec des caractéristiques et des personnalités différentes, semble impossible sur les points de vue administratifs et technologiques. Troisièmement, l'applicabilité de ces modèles sera en question. Un modèle mathématique, aussi grand, n'est pas compréhensible pour toutes les disciplines. L'examen, la vérification, la correction et la modification de ce modèle serait très difficile voir impossible. Fournir toutes les données nécessaires pour tous les aspects, lors de chaque utilisation, est pratiquement irréalisable.
Alors il n'y a pas d'autre solution que de développer un modèle présentant une architecture dynamique.
Dans ce but, on a regroupé dans un méta–modèle les agents de modélisation pour représenter et pour simuler l'humain dans la SDT, ils sont utilisés pour déterminer les attributs et les caractéristiques de l'humain et son interaction avec son lieu de travail.
Les résultats de ces agents sont utilisés par les agents d'analyse pour analyser les systèmes en cours de conception, afin de calculer et déterminer les indicateurs de haut niveau, qui peuvent être utilisés lors des prises de décision et l'optimisation du système.
Chacun de ces agents, les agents de modélisation et les agents d'analyse, peut être défini à différentes échelles. Ces échelles peuvent être au niveau cellulaire (microanalyses), d'un organe, du corps entier ou de groupes d'humains.
Dans tous les cas, les résultats de modélisation et d'analyse à différents niveaux d'échelles doivent être cohérents, interpolables, et extrapolables.
Un centre de contrôle pour cette structure est nécessaire qui contrôle toutes les interactions et échanges de données pour les agents avec d'autres agents, avec la plate–forme de conception et avec l'utilisateur. Il est aussi responsable de définir le rôle de chacun des agents, de les synchroniser et de présenter les résultats.
Pour clarifier l'application de ce modèle, on a présenté un exemple de la façon de changer l'architecture du modèle, selon la configuration du système.
On propose donc l'architecture multi-agent car, avec cette architecture, au même moment qu'on utilise les résultats de sous-modèles (ceux des agents), on respecte leur indépendance. On peut comprendre, vérifier, examiner et modifier chaque modèle, sans nécessairement refaire les autres modèles.
Les efforts de chaque discipline sont concentrés sur le développement de modèles qui leur sont propres pour parvenir aux exigences demandées dans le système global, en considérant leurs propres critères et objectifs. En changeant les modes de coopérations, selon le contexte, les sous-modèles inutiles peuvent être désactivés, sans modifier le modèle global.
Chaque modèle peut utiliser les données ayant des natures différentes, sans être obligé de les partager avec les autres modèles. Dans le cas d'un manque d'informations, les modèles

concernés, peuvent être désactivés. Le changement d'architecture, selon les contextes d'utilisation et les sorties demandées, peut être automatisé.
Utiliser cette structure facilite les analyses du système dans les niveaux élevés, car les données locales sont bien séparées des données globales du système, alors le traitement d'un ensemble plus petit de données plus importantes fournit une bonne base pour faire les analyses globales de performance, de risque, de coût et des facteurs humains.
La façon de modéliser les objectifs et les critères par le système multi-agent est proche de la perception de l'homme face à ses problèmes.
Donc, on pense que l'architecture de futurs modèles d'humains peut être sous la forme d'un système multi-agent. Mais toutefois, il y a plusieurs challenges face à réalisation de ce modèle.
D'abord il faut avoir la possibilité d'échanger les données conceptuelles, dans les cas nécessaires, avec les modèles mathématiques conventionnels. L'utilisation d'ensembles flous est la seule technique présentée pour résoudre ce problème. Alors, il faut traduire les données conceptuelles sous la forme d'ensembles flous, et ensuite, en utilisant les processus de défuzzification, on les traduit en variables exactes.
L'autre problème est l'adaptation de modèles des Sciences Humaines, afin de les utiliser dans le contexte de conception, en temps réel. Bien qu'il y ait énormément de travail sur les aspects psychologiques et cognitifs, les technologies dans ces domaines se sont développées pour être appliquées par les experts de différents domaines, en prenant un temps considérable, en comparaison avec la technologie en temps réel mise en œuvre pour la manipulation de modèles 3D.
Alors il faut prédéfinir les modèles pour les différents contextes d'utilisation, selon les rôles des agents de modélisation. Ce travail exige de développer les systèmes experts dans ces domaines, pour utiliser les données et des modèles déjà préparés, pour fournir les résultats des analyses au système global de modélisation.
Une sorte de ces modèles est déjà conçue, en utilisant les réseaux de neurones pour simuler les comportements de l'homme, lors de la prise de décisions, par exemple pour trouver sa trajectoire. Sur ce point, chaque réseau de neurones peut être considéré comme un expert système automatisé, dans un domaine limité, qui utilise ses données, sous la forme de poids synaptiques, pour résoudre les problèmes variés.
La définition de modèle à différentes échelles est un autre effort dans cette direction, car par cette méthode, d'abord les sous-méthodes plus professionnalisées peuvent être développées, et ensuite cette méthode nous permet de définir les rôles plus précis pour des agents de modélisations, puis d'effectuer une extrapolation des résultats dans les cas possibles.
Dans les chapitres suivants on s'intéresse aux agents d'analyse de risque, et on va proposer plusieurs techniques que nous avons développées et expérimentées pour ces agents, ce qui a permis de les appliquer dans l'environnement de conception 3D.
Ensuite on va présenter l'application de ce modèle, par un exemple, pour calculer la meilleure trajectoire de l'homme dans la SDT.

PARTIE III : ANALYSE DE RISQUE DANS LA SITUATION DE TRAVAIL

CHAPITRE I : ACCIDENT ET RISQUE

1. Accidents

(PSA, 2005) et (Määttä, 2003) ont définit des accidents comme des événements non planifiés qui produisent le mal ou les dommages (pertes) aux hommes, aux équipements ou à l'environnent.
Dans une définition plus simple, mais incomplète, (Trost et al., 2004) a défini un accident, comme la perte de quelque chose de valable.
Une définition plus complète est fournie par (Khan et al., 1999), en tant qu'événement inattendu, inévitable et indésirable.
Nous définissons un accident, dans la SDT, comme une interaction d'un danger qui peut être sous la forme de ces substances ou d'éléments dangereux, sur les entités vulnérables et valeureuses (les cibles) dans la SDT ou dans son environnement. Il peut être le résultat d'un ou plusieurs échecs techniques ou humains, ou l'effet des conditions environnementales.
(Trost et al., 2004) sépare la définition de l'incident de celle de l'accident, il définit l'incident comme un échec du système de commande sans conséquences défavorables et l'accident comme l'échec du système de commande avec des conséquences défavorables.

1.1. Echec et défaillance

Selon (Hollnagel, 1999), l'accident peut être décrit comme un ensemble de barrières qui ont échoué. Cette définition s'appuie sur le concept de barrière et le concept d'échec.
L'échec est la perte d'intégrité fonctionnelle d'exécution prévisionnelle d'un système, un sous–ensemble ou un composant ((Clemens, 2002) et (Rausand, 2005a)).
Des défauts et des erreurs latentes ajoutent, fortement, à la complexité des processus accidentels. La caractéristique des échecs latents est qu'ils ne dégradent pas immédiatement la fonction du système, mais en combinaison avec d'autres événements, ils provoquent ensemble une situation catastrophique (Jo et al., 2003). Considérer les échecs latents est tout particulièrement important pour la prévention des accidents pour deux raisons (Benedyket, 1998) :

1. S'ils ne sont pas résolus, la probabilité de répétition des accidents reste forte ;
2. Un échec latent influence souvent plusieurs erreurs potentielles.

(Clemens, 2002) a distingué l'échec sain de l'échec dangereux. Selon sa définition, un échec sain se produit quand la fonction appropriée est altérée ou perdue, mais sans davantage de menace de mal et un échec ou une faute dangereuse correspond à la situation où la fonction appropriée est altérée ou perdue d'une manière à constituer une menace de mal.
On définit la défaillance comme un manque de réalisation des fonctions exigées.
(Rausand, 2005a) a présenté une définition pour le mode de défaillance comme : « l'effet par lequel nous observons un échec sur un article ».

1.2. Risque professionnel

La Royal Society (1983) a défini le risque comme la probabilité qu'un événement défavorable particulier se produise pendant une période indiquée ou des résultats d'un dysfonctionnement particulier (Greene, 2005).
Selon (Määttä, 2003), un risque se caractérise par trois concepts : les dysfonctionnements qui développent les scénarios d'accidents (s), la probabilité de l'occurrence de scénarios d'accidents, et les conséquences de scénarios d'accidents en termes d'une certaine mesure de perte.
Dans les sociétés modernes la sécurité du lieu de travail est un sujet important, et les risques au travail sont systématiquement évalués (Harrissona et al., 2003), cependant, comme cela est confirmé par (Leveson, 2004), les changements dans les situations de travail étendent les

limites des modèles courants d'accidents et de nouvelles approches et techniques d'ingénierie de sécurité sont nécessaires.
(Harrissona et al., 2003) a essayé de catégoriser ces changements dans les classes suivantes : (1) Pas de changement rapide de technologie, (2) Changement du processus des accidents, et (3) Complexité et couplage croissants.
Selon (Määttä, 2003), une partie de ce changement est à cause du partage de la commande des systèmes avec l'automatisation entre des opérateurs dans de nouvelles positions stratégiques, ce qui provoque un nouveau besoin de connaissance, particulièrement pour maîtriser des perturbations et des situations inattendues.
En présentant une remarque intéressante, (Leveson, 2004) en expliquant que le risque est un concept qui émerge au niveau du système, en déterminant les rapports entre des sous–systèmes (équipements ou composants ou humain), dans le contexte du système total. Par conséquent, on ne peut pas évaluer le risque en isolant des sous–systèmes ou des composantes.
De notre point de vue, chaque risque est défini pour un couple de danger/cible. Pour caractériser un risque, nous devons définir quatre éléments : (1) la source de dangers, (2) la cible, (3) le mode d'impact, et (4) les processus accidentels.
Donc le risque est un concept mutuel, ce qui n'est pas le cas pour le manque de fiabilité.

1.3. Processus accidentel

Un ensemble d'évènements qui peut mener à un accident forme le processus de l'accident ou le scénario accidentel. Dans ce travail on considère qu'un accident est le résultat systématique d'une série d'événements, en conséquence, afin de l'empêcher, on doit utiliser des approches systématiques.
(Hollnagel, 1999) a décrit un accident comme une chaîne ou un ordre d'échecs, de défauts de fonctionnement et d'erreurs, on l'appelle la chaîne des évènements. Alors, chaque scénario accidentel est décomposé en une série d'événements et une probabilité est assignée à chacun de ces événements (Turner et al., 2003). L'événement est une occurrence en temps réel (ONS, 1992), décrivant une action discrète, typiquement une erreur, un échec ou un défaut (NASA, 2003) et un « événement dangereux (ou accidentel) » peut être défini comme déviation d'une activité ou une technologie qui mène vers des conséquences indésirables. Les évènements dangereux peuvent provoquer des événements critiques. L'événement critique est généralement défini comme perte du contrôle ou perte de l'intégrité physique (De Dianous et al., 2006).
Une chaîne d'évènements peut entraîner un accident seulement si elle forme « un ensemble de rupture », pour cet accident. Un ensemble de rupture est minimal si l'ensemble ne peut pas être réduit sans modifier son statut d'ensemble de rupture (Rausand, 2005g).
Les évènements se produisent du fait de causes. Une cause est la caractéristique ou le comportement d'une personne ou d'un élément qui influence la probabilité des événements, et la cause racine est la cause la plus fondamentale qui peut être raisonnablement identifiée et qui peut être contrôlée (Livingston et al., 2001). La cause racine est le point d'arrêt dans l'évaluation des facteurs causaux. C'est l'endroit où, avec la modalité de reprise appropriée, le problème ne se reproduira plus (ONS, 1992)
En utilisant la même idée, on distingue, aussi, le facteur de contribution qui est un événement ou une condition qui ont pu contribuer à l'occurrence des résultats indésirables, mais, si éliminés ou modifiés, par eux-mêmes n'auraient pas empêché l'accident (NASA, 2003).
Normalement, les processus accidentels sont très compliqués, pour faciliter l'analyse et la définition de mesures de prévention, on essaie de définir les processus accidentels en termes d'évènements indépendants, et contrôlables. L'indépendance implique que l'occurrence d'un

évènement n'aura aucune influence sur les autres évènements, ce que n'est pas toujours une supposition réaliste (Rausand, 2005e).
D'autres facteurs de complexité des scénarios accidentels sont des combinaisons d'évènements de natures différentes. Selon (Jo et al., 2003), la plupart des accidents principaux se produisent avec un couplage d'erreurs humaines et d'échecs mécaniques.
Selon (Leveson, 2004), les accidents se produisent quand des dysfonctionnements des composants, des perturbations externes et /ou du système ne sont pas bien manipulées par le système de commande. Cette synthèse donne une idée de la complexité du processus accidentel, lorsqu'on doit revenir aux concepts élémentaires et basiques qui forment le système, d'un coté, et l'opération du système. et la manipulation et le contrôle de system d'un autre coté.
(Määttä, 2003) regroupe des modèles de base pour les phénomènes d'accidents en trois catégories :

- Le modèle de système : interpréter un accident comme événement basé sur le système.
- Le modèle de processus : voir un accident comme le déroulé des événements, ce qui implique que le facteur de temps est un élément important dans la description d'un accident.
- Le modèle d'énergie : définir un accident comme l'interaction d'un agent de danger avec une cible.

(Leveson, 2004) défend l'idée de considérer l'accident dans le contexte systémique.
En utilisant le modèle de processus et le modèle de système, en même temps, (Ternov et al., 2004) a essayé de décrire l'accident comme l'effet de perturbations multiples qui agissent l'une sur l'autre au point où les mécanismes de défense du système sont insuffisants pour contrecarrer l'impact négatif sur le système.
Pour la STG, une sorte de processus accidentel aboutissant à couper la main de l'opérateur peut être produit par une erreur de l'opérateur pour distinguer la position de la lame, du fait de sa fatigue et du manque de lumière.

2. Analyse d'accident

Quand un accident a eu lieu, le cours des événements menant à son occurrence est habituellement la cible principale de la recherche (Harms-Ringdahl, 2003b). Bien que l'étude des accidents ait ses propres limites et est très coûteuse (Gupta, 2002), il y a deux raisons de base pour conduire une enquête sur les accidents ((Leveson, 2004) et (Livingston et al., 2001)) :

- pour assigner le blâme pour l'accident,
- pour comprendre pourquoi il s'est produit de sorte que de futurs accidents puissent être empêchés.

Une étude sur un accident est la détermination des faits d'un accident par enquête, observation, et examen, et une analyse de ces faits pour établir les causes de l'accident (Harms-Ringdahlen, 2004). Celle-ci doit trouver l'ensemble des causes probables, sous la forme d'une description d'une ou plusieurs chaînes des causes agissantes l'une sur l'autre qui sont vues en tant que constitution d'une explication satisfaisante (Hollnagel, 1999). Une question également posée, est comment elles pourraient se produire et quelles sont les mesures qui doivent être adoptées pour empêcher leur répétition (Harms-Ringdahlen, 2004).
La plupart des objectifs d'analyse d'accident, sont obtenus en appliquant ce qu'on appelle l'analyse de cause racine, en posant les questions suivantes (NASA, 2003) :

- quels étaient les faits entourant les résultats indésirables ?
- quand les résultats indésirables se sont-ils produits ?
- d'où se sont–ils produits ?
- quelles étaient les conditions présentes avant son occurrence ?

- quelle commande ou quelles barrières pourraient avoir empêché son occurrence mais ne l'ont pas fait ?
- quelles sont toutes les causes potentielles ?
- quelles actions pouvaient empêcher la répétition ?

2.1. Classification des modèles d'analyse d'accident

(Harms-Ringdahlen, 2004) présente une classification des méthodes des enquêtes sur les accidents divisées en trois groupes principaux :

- Les modèles séquentiels d'accident, qui décrivent l'accident comme résultat d'une séquence d'opérations dans un ordre spécifique. De tels modèles fonctionnent bien pour modéliser des pertes provoquées par des défaillances de composants physiques et pour les systèmes relativement simples mais ils sont souvent jugés comme limités pour expliquer ce qui s'est produit dans des systèmes complexes. Pourtant la plupart des modèles d'accidents se trouvent dans cette catégorie (Leveson, 2004).
- Les modèles épidémiologiques d'accidents décrivent un accident dans l'analogie avec une maladie, c'est-à-dire comme combinaison des « agents » et des facteurs environnementaux qui peuvent produire des conditions malheureuses. Les exemples sont le concept « des conditions latentes » et « l'analogie de fromage suisse ».
- Les modèles systémiques de l'accident, qui essayent de décrire la performance du système complet (Harms-Ringdahlen, 2004). Dans la terminologie de la théorie des systèmes, la sécurité est une propriété émergente qui surgit quand les composants des systèmes agissent les uns sur les autres dans un environnement. Les propriétés émergentes sont commandées ou imposées par un ensemble de barrières liées au comportement des composants des systèmes. Les accidents résultent d'un manque de contraintes appropriées sur les interactions (Leveson, 2004). Dans ce cas, les faiblesses des systèmes se modélisent comme des échecs des systèmes latents et des barrières de sécurité insuffisantes.

Il y a aussi un certain nombre d'approches d'analyse d'accident comme la méthode de l'évolution d'accident et la méthode de fonction de barrières qui se concentre sur des barrières (Harms-Ringdahl, 2003b).

2.2. Les causes de l'accident

La cause ou le facteur causal est un événement ou une condition qui forme ou influence les résultats (accident) (NASA, 2003).
La raison de base d'étudier et de rapporter les causes des occurrences est d'identifier les modalités des accidents afin d'empêcher la répétition de l'accident (ONS, 1992).
(Harrissona et al., 2003), (ONS, 1992) et (Saito, 2003) ont souligné les catégories principales de causes des accidents.
Selon (Harrissona et al., 2003), même si les facteurs causaux immédiats, sont, la plupart du temps, l'équipement, la machine ou l'outillage, dans beaucoup de cas, ce n'est pas l'élément matériel qui est la raison principale, mais plutôt les conditions entourant l'organisation du travail, la méthode de travail ou la procédure appliquée.
(Willquista et al., 2003) confirme la même idée en disant que même dans les systèmes automatisés, les accidents sont, généralement, produits en liaison avec la manipulation des perturbations de production par l'opérateur.
Les employés ont leur propre avis, ils croient, généralement, que le manque de formation et la compétence en utilisant des machines sont la cause principale des accidents (Sawacha et al., 1999).

Cependant, la gestion des risques ou l'évaluation classique dans les industries de processus ont été principalement concentrées sur la fiabilité des composants mécaniques, alors que des facteurs humains ne sont pas considérés profondément (Jo et al., 2003).

3. Analyse de risque

Dans ce texte l'analyse de risque est une utilisation systématique d'information disponible pour identifier des dangers et estimer le risque par rapport aux individus ou les populations, la propriété ou l'environnement ((Harms-Ringdahlen, 2004), (Clemens, 2002) et (Määttä, 2003)) et elle est considérée comme synonyme de l'analyse de sécurité.
Le but de l'analyse de risque est d'identifier les facteurs les plus essentiels affectant la sécurité d'une activité (Harms-Ringdahl, 2003a). (Polet, 2002) indique que, lors des analyses de risque, on doit s'assurer que les objectifs de sécurité fixés sont atteints et que les protections mises en place remplissent correctement leur rôle. Selon (De Dianous et al., 2006), l'analyse de risque a le but de démontrer que le système a un bon niveau de contrôle de risque, tenant compte des barrières de sécurité, de sorte que les phénomènes dangereux soient définis avec la gravité et la fréquence d'occurrence acceptable.
(Harms-Ringdahl, 2003a) distingue les techniques d'analyses de risque qui concernent des décisions sur le niveau de risque qui soient acceptables ou pas et les techniques qui trouvent des faiblesses dans un système, et puis suggèrent les mesures possibles qui pourraient améliorer la sécurité de l'opération.
L'analyse de risque est une tâche complexe qui nécessite la considération de beaucoup de paramètres qui sont, très souvent, difficiles à mesurer (Ru et al., 1996), qui a besoin d'appliquer les approches appropriées pour chaque situation.
(Harms-Ringdahl, 2003a) déclare qu'il y a quatre points principaux par rapport à la qualité d'une analyse de risque :

1. son pouvoir pour bien identifier des risques,
2. l'exactitude de l'estimation des risques,
3. l'efficacité de présenter des mesures préventives et protectrices,
4. l'efficacité d'utilisation des ressources.

La gestion de la plupart des sociétés est principalement concernée par le bénéfice, et dans ce contexte, la ressource consommée par une méthode d'analyse de risque joue un rôle significatif dans son acceptation.
(Willquista et al., 2003) a expliqué les différentes étapes d'un procédé d'analyse de risque.
Selon (Chapman, 2001), l'analyse de risque est une combinaison de deux étapes, une étape d'analyse qualitative qui se concentre sur l'identification ainsi que l'estimation du risque, et une étape d'analyse quantitative sur l'évaluation du risque.
On considère l'analyse de risque comme un processus systématique pour identifier les dangers, évaluer les risques, et proposer des mesures pour réduire les probabilités et les sévérités à des niveaux inférieurs acceptables.

3.1. Risque

Il y a une incertitude liée à n'importe quelle prévision d'un danger (Greene, 2005), cette incertitude est traduite par la probabilité des accidents. En combinant cette probabilité et la conséquence de danger, on aura une image de l'importance des menaces, nommée le risque. ((Clemens, 2002), (CEC, 2003) et (Wunsch et al., 2005)) expliquent le risque de danger comme le produit de la prévision de sa sévérité et de sa probabilité.
(Clemens, 2002) a proposé, aussi, une définition plus compréhensible pour le risque, comme : des conditions où les opérations qui ont le potentiel de causer des dommages aux choses de valeur. Traiter le risque c'est une « manière systématique de considérer les dangers ».

((Khan et al., 1998) et (Jo et al., 2003)) ont distingué le risque par rapport à ses conséquences, en trois classes:

- risque pour les gens (individus),
- risque économique,
- risque pour l'environnement.

(Clemens, 2002) a caractérisé le risque par trois éléments, source, mécanisme, et résultats, qui sont souvent considérés comme les éléments définissant un scénario de risque.
Dans cette définition les caractéristiques de la (des) cible(s) sont négligées.
(Clemens, 2002) a divisé les risques en plusieurs parties. Une partie de tous les risques dans un système est acceptable. Dans la partie qui n'est pas acceptable, certains risques peuvent habituellement être éliminés ou évités. Certains peuvent également être réduits, les rendant acceptables. Souvent, une partie du risque vu à l'origine comme inacceptable, en fait, est toléré si le système doit être mis en oeuvre. En plus, dans tous les systèmes, il restera toujours un risque résiduel dont une partie restera inconnue.

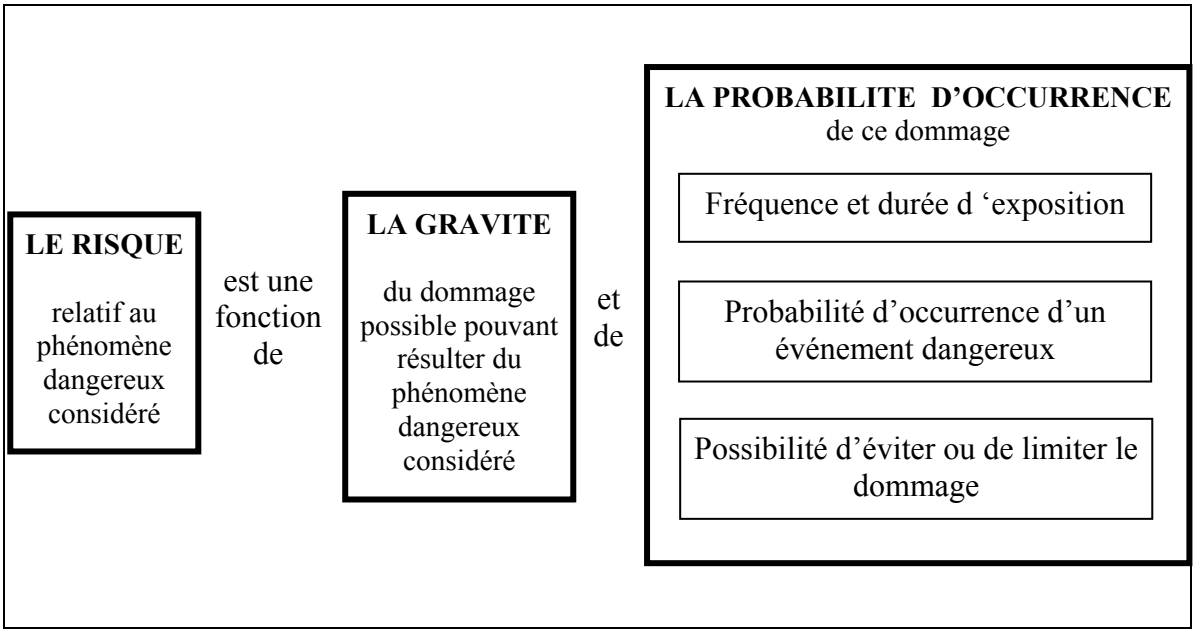


Figure 17. Elément de risque selon (EN, 1997a)

Selon la norme européenne, présentée dans (EN, 1997a), le risque doit être calculé en sachant la fréquence et la durée d'exposition, la probabilité d'occurrence des événements dangereux et la possibilité d'éviter ou de limiter le dommage (figure 17).
Pour STG, (EN, 2003) distingue plusieurs risques comme les risques de choc électrique, la perte de stabilité, le dommage à cause du bruit, le non-respect des principes ergonomiques et l'hygiène sont considérés.

3.2. Identification de risque

(Willquista et al., 2003) a divisé les approches d'identification de risque en trois parties : (1) les approches à posteriori et réactives, (2) les approches proactives, c'est-à-dire en utilisant des bases de données, des expertises ou la simulation, et (3) les approches proactives « impartiales ». Il propose l'utilisation des approches proactives « impartiales » pour les nouveaux systèmes, lors de leurs étapes de conception.
Généralement, les techniques adoptées pour l'identification des risques ont besoin de beaucoup de moyens financiers et de temps (Giannini et al., 2003).

Selon (Rausand, 2005i), les risques peuvent être identifiés en utilisant les méthodes suivantes :

1. examiner les systèmes existants semblables,
2. réviser les analyses de risque précédentes pour des systèmes semblables,
3. réviser des listes de contrôle de dangers,
4. considérer le courant d'énergie dans le système,
5. considérer des matériaux dangereux,
6. considérer des interactions entre des composants du système,
7. réviser les caractéristiques d'opération et les facteurs environnementaux,
8. utiliser des séances de réflexion,
9. considérer l'interface d'interaction homme–machine,
10. considérer les changements de modes d'utilisation,
11. essayer des tests à petites échelles et faire les analyses théoriques,
12. penser à l'analyse si-alors de cas « mauvais ».

Mais il est évident qu'aucune de ces méthodes n'est complète et appliquer plusieurs méthodes, en même temps lors de conception, n'est pas pratique.

3.3. Evaluation de risque

La norme européenne « NF EN 1050, sécurité des machines, principes pour l'appréciation du risque », explique les principes d'évaluation de risque pour assurer la sécurité de solutions techniques. Selon cette norme, « après l'estimation du risque, une évaluation du risque doit être menée pour déterminer si une réduction du risque est nécessaire ou si la sécurité a été atteinte » (EN, 1997a).

L'évaluation des risques fait partie du processus de gestion des risques (Tiusanen et al., 2002). L'évaluation de risque, c'est un processus qui explicite une valeur numérique de risque pour vérifier qu'elle ne dépasse pas un niveau acceptable, et que la conception est conforme aux conditions (Määttä, 2003).

Selon (Smith, 2003), l'objectif de l'évaluation des risques est d'exécuter une détermination complète des risques afin de choisir les sauvegardes appropriées.

Selon (Harms-Ringdahlen, 2004) l'évaluation de risque est employée pour produire une mesure du niveau des risques, et pour jauger qu'ils sont tolérables ou pas.

L'analyse de risque consiste à comparer le risque estimé avec les niveaux d'acceptation définis afin de choisir le niveau de confrontation avec le risque.

Le niveau acceptable du risque dépend de l'opinion des cadres supérieurs. Naturellement il y a des conseils par les lois, par exemple le seuil des émissions des radiations, mais beaucoup d'autres niveaux de risque sont définis comme des compromis de coût pour la gestion des risques et de coûts acceptables pour la réparation.

Il est extrêmement important de définir les niveaux acceptables comparables de risque dans différents secteurs (Labodova, 2003), sinon, on ne peut pas avoir confiance dans les jugements qui sont faits sur les risques.

(Khan et al., 1998) propose deux conditions pour les critères d'acceptation : la compréhensibilité et la comparabilité.

Selon (Khan et al., 1998) et (Labodova, 2003) des aspects financiers peuvent être employés comme indicateur universel de mesurer l'investissement nécessaire pour empêcher le risque comparé au coût impliqué après que les problèmes se produisent, alors, c'est ALARP, qui est le meilleur critère.

Lors de l'évaluation des risques deux erreurs opposées peuvent se produire : l'acceptation d'un état trop dangereux, et l'exigence d'un changement inutile (Harms-Ringdahl, 2003a).

(Bernier, 2003) a expliqué différents facteurs qui doivent être pris en compte pour évaluer des risques pour la manutention manuelle et mécanique.

3.3.1. Conséquence d'accident

L'analyse de conséquence implique l'évaluation des résultats probables d'un accident (Khan et al., 1998). Un événement accidentel peut mener à l'éventail de conséquences, s'étendant de négligeable à catastrophique. Il y a différentes approches pour évaluer ces conséquences. Parfois, la sévérité d'une conséquence moyenne d'accident est évaluée en utilisant les valeurs espérées mathématiques. Dans un regard conservatoire, nous considérons plusieurs conséquences possibles, y compris la plus mauvaise conséquence prévisible (Rausand, 2005i).
(Clemens, 2002) présente une convention pratique dans l'évaluation des risques, qui propose la considération des mauvais résultats crédibles pour un risque donné. Pour appliquer cette convention, il faut définir un niveau de confiance, pour donner une signification claire à l'analyse.
L'évaluation de la conséquence implique une grande variété de modèles mathématiques. Par exemple des modèles de taux de dégagement et d'évaporation de matériel dangereux, des explosions et des feux sont employés pour prévoir les caractéristiques des conséquences d'accidents (Khan et al., 1998).
(Rausand, 2005f) a défini quatre classes de conséquences :

- la sécurité du personnel,
- les incidences sur l'environnement,
- la disponibilité de production,
- la perte matérielle.

Il y a aussi les conséquences secondaires que doivent être prises en considération (Rausand, 2005f) :

- des pertes (panne) d'équipement,
- des pertes de disponibilité,
- des pertes de configuration et ajustement,
- des pertes de performance (ralenti et des pertes de vitesse),
- des pertes de qualité,
- des échecs de processus et de reprise du travail,
- d'interruptions (moins de 10 minutes),

Les pertes humaines et celles relatives à l'environnement sont plus importantes, et en majorité, constituent des cas non inversibles.
(Sawacha et al., 1999) a présenté une liste des mesures pour calculer les conséquences des accidents sur l'humain, mais, mesurer les impacts des accidents sur l'environnement, ça semble plus difficile.
(Rausand, 2005i) (Labodova, 2003) ont proposé des classifications pour les impacts indésirables des accidents, sur la santé du personnel.

3.3.2. Probabilité d'accident

Le composant de probabilité de risque est associé à la durée de fonctionnement ou à un nombre spécifique d'opérations (Clemens, 2002), habituellement, interprétée par rapport au temps moyen prévu entre les accidents (Kjellén et al., 1995) (Clemens, 2002).
Il est souvent difficile d'obtenir des valeurs de probabilité, et en conséquence, les incertitudes sont grandes (Harms-Ringdahl, 2003a).
(Chapman, 2001) présente sept fonctions mathématiques de distributions de probabilité, le plus généralement, utilisées pour estimer les échecs de systèmes physiques.
(Huang, 2001) a proposé une technique pour évaluer la probabilité des erreurs humaines, en les divisant en trois parties (1) ne pas détecter correctement, (2) ne pas répondre d'une façon opportune, et (3) ne pas s'exécuter avec succès. Pour chaque partie il propose une méthode d'évaluation différente.

(Pinna et al., 2005) a classifié des conditions des états possibles globaux de système en considérant ses probabilités : (1) opération normale, (2) situation fortuite, (3) Situation accidentelle, et (4) situation hypothétique.

3.3.3. Matrice de risque

La matrice de risque est un des outils d'évaluation de risque qui est utilisé pour examiner l'acceptabilité ou la non acceptabilité du risque (Labodova, 2003).
Les résultats du processus d'estimation de risques sont placés selon la probabilité évaluée et les conséquences possibles dans la matrice de risque. La place du risque dans cette matrice, détermine le niveau de risque (Labodova, 2003), classifiés en trois niveaux (Rausand, 2005i): (1) le risque élevé (inacceptable (Labodova, 2003)), (2) le risque moyen (conditionnellement acceptable (Labodova, 2003)), et (3) le risque bas (acceptable (Labodova, 2003))
Les décisions, concernant la façon de se confronter aux risques, dépendent de ses positions dans cette matrice (Wunsch et al., 2005).
La définition de la forme de la matrice de risque est, la plupart du temps, fondée sur l'acceptabilité légale, financière, politique et sociale de risques (Labodova, 2003).

3.3.4. Index de risque

L'index de risque c'est un indicateur quantitatif, présentant la dangerosité et l'importance d'un risque, en multipliant la valeur de probabilité par la valeur de sévérité. Il est applicable pour comparer les différents risques, examiner l'acceptabilité d'un risque et mesurer les effets de modification de système sur les risques.
Une raison pour utiliser l'index de risque est sa possibilité d'accumuler les dangers avec des conséquences différentes, mais par contre elle donne une image de la moyenne de risque, sans distinguer les conséquences ou les mauvais cas possibles.
Une des applications de cet index est l'ALARP, pour comparer les différentes solutions de conception (Kjellén et al., 1995).

4. Les modèles d'analyse de risque

L'analyse de risque est employée dans des études environnementales, suivant des considérations d'assurance et financières (Harms-Ringdahlen, 2004) et dans les systèmes de prévention des accidents.
Chacune des méthodes d'analyse de risque est adaptée pour certaines étapes de conception ou certaines sortes de processus. Les applications des méthodes les plus importantes d'analyse de risques sont expliquées dans les alinéas suivants :

- **L'analyse de l'arbre de défaillance** : elle vise à identifier des scénarios incorrects de tâches (humaines et automatisées) qui peuvent mener à un événement indésirable, et à évaluer la probabilité d'occurrence de tous les scénarios possibles. Cette analyse repère les conséquences des erreurs humaines et les échecs des équipements afin de déterminer leurs causes, combinant la logique et les probabilités (Polet et al., 2003). L'analyse de l'arbre de défaillance convient idéalement pour des évaluations de grands systèmes électromécaniques, et surtout pour donner un indicateur quantitatif au manque de fiabilité humaine (Rasche, 2001). Dans l'arbre de défaillance, les différentes actions possibles des fonctions de sécurité pour éviter, empêcher l'occurrence d'un événement, limiter la taille d'un événement ou réduire la probabilité d'un événement, peuvent être modélisées (De Dianous et al., 2006). Des résultats de telles études peuvent être employés pour la gestion de sécurité, d'entretien et d'opérations (Rasche, 2001).

- **L'analyse de l'arbre d'événements :** c'est un processus de grande taille qui a besoin d'entrées de données étendues et d'un temps important pour développer un scénario d'accidents. Normalement, les entrées quantitatives ne sont pas disponibles pendant les premières parties de la conception (Khan et al., 1998). Dans l'arbre d'événements, les différentes actions possibles des fonctions de sécurité sont d'éviter, d'empêcher ou de réduire les probabilités des événements critiques.
- **AMDEC (FMEA) :** elle permet de créer un modèle de défaut de fonctionnement qui aide à identifier les modes d'échec ou de dégradation de chaque fonction, ou les causes) et prévoir des conséquences possibles de ces échecs (effets) (Weber et al., 2005). Elle vise à évaluer la gravité combinée avec la fréquence d'occurrence d'événements (Polet et al., 2003) et la possibilité de les détecter. **AMDEC** est applicable seulement après que des éléments de système ont été définis (Clemens, 2002). C'est une technique importante qui est employée pour identifier et éliminer des manques connus ou potentiels de la fiabilité et pour augmenter la sûreté des systèmes complexes.
- **BeSafe** : cette approche a été conçue pour permettre à un auditeur d'identifier systématiquement le potentiel d'erreur humaine dans un travail, une opération ou un système donné. Il ne s'agit pas juste d'une méthode d'évaluation de la sûreté, mais aussi, c'est une manière d'augmenter la sécurité du produit par la réduction d'erreur humaine potentielle (Benedyket, 1998).
- **HAZOP** : la technique HAZOP a été développée pour identifier des problèmes d'opérabilité pendant l'étape de conception d'une usine (Livingston et al., 2001), mais elle peut être aussi appliquée à d'autres types d'études des erreurs humaines et des échecs des systèmes techniques. Elle est plus adaptée pour des évaluations détaillées, mais peut également être employée pour une approche préliminaire des évaluations (Rausand, 2005h). L'étude de HAZOP devrait, de préférence, être effectuée aussi tôt que possible dans la phase de conception pour avoir l'influence sur la conception. D'autre part, pour effectuer un HAZOP nous avons besoin d'une conception plutôt complète. Une étude de HAZOP peut, également, être entreprise sur un service existant pour identifier les mesures pour réduire des risques et d'opérabilité (Rausand, 2005h). L'analyse de HAZOP est une étude sur les fonctions, par exemple mise en route, opération normale, arrêt normal, arrêt d'urgence, etc. (Tiusanen et al., 2003)
- **L'analyse de barrière** : cette analyse évalue des flux d'énergie, des événements, des barrières et des cibles (NASA, 2003). C'est un processus pour identifier les barrières ou les commandes physiques, administratives, et procédurales (ONS, 1992). L'analyse de barrières aide les industriels à identifier, plus clairement, les scénarios qui ont un niveau insuffisant de contrôle de risque (De Dianous et al., 2006). Même après un accident, cette technique peut être employée pour déterminer pourquoi les barrières ou commandes ont échoué et pour identifier ce qui est nécessaire pour empêcher la répétition d'accident (ONS, 1992).

4.1. Classification de modèles d'analyse de risque

Selon (Rasche, 2001) les techniques d'évaluation des risques peuvent être « qualitatives – subjectives » ou « quantitatives – objectifs ». L'utilisation des techniques quantitatives exige des entrées précises produites par une approche systématique de l'enregistrement et de l'interprétation des incidents, accidents et des entretiens. Les techniques qualitatives sont comparativement moins chères et facilement applicables, mais elles ne fournissent pas les évaluations numériques et donc le rang relatif des risques identifiés.

(Willquista et al., 2003) a présenté une classification, en distinguant trois sortes d'approches d'analyse de risque : (1) le cheminement d'événement vers l'avant, (2) le cheminement en arrière d'événement, et (3) les approches morphologiques.
Avec la même idée, (Clemens, 2002) a classifié les techniques d'analyse de risque en trois groupes : (1) du haut vers le bas, (2) du bas vers le haut, et (3) promouvoir (qui sont des méthodes d'inventaire de risque comme l'analyse des modes de défaillance).

4.2. Application de la réalité virtuelle dans le domaine de l'analyse de risque

La complexité des situations de travail modernes signifie qu'une approche spécifique est incapable de relever le challenge des conditions contemporaines. En conséquence, on a besoin d'un certain nombre de nouvelles approches pour satisfaire les besoins des circonstances particulières (Clayton, 2003). (Määttä, 2003) proposent une méthode comportant une combinaison de quatre éléments : l'ergonomie participative, l'analyse de tâche, l'analyse de sécurité et les environnements virtuels (Määttä, 2003). La réalité virtuelle peut jouer un rôle important, en donnant les effets immersifs aux modèles tridimensionnels de simulation, quand le système entier est toujours à l'étape de conception (JLr-einen, 1996). Mais jusqu'à présent, l'application de la réalité virtuelle, dans le domaine d'analyse de risque, est limitée par la connaissance visuelle des processus de production, l'identification des inclusions et la mesure des facteurs biomécaniques et ergonomiques.
Selon (Määttä, 2003), les images virtuelles peuvent fournir des informations au sujet des risques mécaniques tels que l'écrasement, le cisaillement et l'impact impliqués par les opérations (Holejko et al., 2004). En simulant des opérations de montage, on détecte les risques de collisions ou les passages d'outils impraticables.
Selon (Määttä, 2003) et (Rix et al., 1998), l'utilisation d'un modèle d'humain numérique dans l'analyse de sécurité a des avantages, quand il y a le besoin d'analyser l'espace, le champ visuel, la force, et d'examiner des possibilités et des performances de tâches. Dans ce cas les analyses dynamiques informent de la pénibilité des tâches, des efforts exercés dans les articulations, et de la gêne causée par les équipements (Shimizu et al., 2003).
Une autre partie de cet effort concerne l'analyse des échecs de l'équipement qui peut jouer un rôle important dans les chaînes des événements dangereux. (Li et al., 2005) a étudié le cadre de l'analyse des échecs mécaniques en réalité virtuelle et la méthode de modélisation des échecs mécaniques pour voir les raccordements, les propriétés et les mouvements des composants, mais également observer les échecs.
Une autre technique, la réalité augmentée, crée de nouveaux moyens de communication entre un opérateur et une machine et les images virtuelles peuvent fournir des informations au sujet des risques impliqués par les opérations, actuellement, réalisées (Holejko et al., 2004).
Un risque concernant la réalité virtuelle c'est que dans le monde virtuel, il est possible que nous n'appliquions pas correctement des lois naturelles de physique, (Leveson, 2004) appelle ces dernières « la malédiction de la flexibilité », que peuvent créer des systèmes avec des comportements inattendus.
De notre point de vue, nous pouvons utiliser la réalité virtuelle d'une manière plus efficace lors de formations et de phase d'analyse de risque. En utilisant la définition floue pour la zone dangereuse, on peut présenter les dangers à l'opérateur visuellement. Cette méthode, peut être utilisée aussi pour assigner des index de risque aux comportements de l'opérateur, lors de son travail virtuel.

4.3. Application de la logique floue dans le domaine de l'analyse de risque

Selon (Ru et al., 1996), il est très difficile de mesurer plusieurs des entrées dans le processus d'analyse de risque et les entrées sont parfois vagues ou floues.

La logique floue présente une manière naturelle de modéliser les informations imprécises, tout en assurant également cette créativité humaine intuitive, et considérer tous les facteurs d'une façon harmonisée, qui sont des éléments essentiels pour réussir dans une analyse de risque (Ru et al., 1996).
On peut utiliser la logique floue, de différentes manières.
Une approche d'analyse de risque est modélisée par (Ru et al., 1996) en employant une technique de logique floue, basée sur les règles floues, appelée enchaînement d'échelle monotonique pour déterminer le facteur de risque.
(Huang, 2001) a employé un index appelé l'index flou d'incertitude pour aider l'analyseur à décider quelles données dans le cas d'un arbre d'évènements devraient être rassemblées de sorte que les incertitudes dans les possibilités de l'occurrence des accidents graves puissent être abaissées.
Il a aussi proposé une sorte d'arbre d'événements flou et a utilisé des nombres flous pour représenter le taux d'échec d'un macro–événement qui simplifie l'analyse de l'arbre de défaillance (Huang, 2001).
Un système d'inférence floue est présenté par (Guimaraes et al., 2004), pour traiter un problème d'ingénierie de fiabilité d'un système nucléaire. Cette méthode emploie le concept d'un système pur de logique floue où la base de règles floues se compose d'une collection de règles floues. Le moteur d'inférence floue emploie ces règles pour déterminer une trace de l'univers d'entrée du discours au–dessus de l'univers de sortie du discours. Le nombre prioritaire de risque (RPN) (typique dans une analyse de mode de défaillance et d'effets – FMEA) traditionnelle est calculé et comparé avec des index prioritaires flous de risque, obtenus par des opinions des experts.
(Gallego, 2004) a utilisé des variables linguistiques pour évaluer deux paramètres qui doivent être pris en considération pour calculer l'index d'importance d'un impact dangereux : (1) degré d'occupation de zone dangereuse et (2) durée d'occupation. Il a modélisé la durée d'occupation en assignant des étiquettes linguistiques telle que « habituellement », « souvent », « toujours », et « jamais ». Egalement, le degré d'occupation est exprimé par l'intermédiaire des étiquettes linguistiques en présentant la quantité des personnes qui habituellement restent dans les bâtiments (Gallego, 2004).
L'application de logique floue peut s'avérer être plus avantageuse pour des événements qui sont dominés par des erreurs humaines, car pour cette sorte d'événements il est souvent difficile d'estimer le taux d'occurrence, en employant une probabilité simple. En plus, souvent, les données empiriques ne sont pas disponibles pour obtenir des évaluations fiables des taux d'erreurs humaines (Huang, 2001). Un exemple d'évaluation des événements dominés par l'erreur humaine se trouve dans (Huang, 2001), qui emploie sept expressions linguistiques, pour prendre un point de vue macroscopique des experts.

4.4. Analyse de risque lors de la phase de conception

La conception est fondamentalement un processus interactif (Khan et al., 1998). Comme la conception elle–même, l'analyse de risque peut être un processus fortement itératif ; quand plus d'informations deviennent disponibles, il faut faire des révisions appropriées (Chapman, 2001). La différence est que la sécurité n'est pas l'objectif central de la conception, donc généralement, sa vérification se place à la fin de la conception. Les premiers objectifs sont essentiellement les fonctionnalités et le coût du système. Par conséquent, pour assurer la sécurité, la modification de la conception originale est limitée à l'addition des barrières physiques ou des procédures et des instructions de sécurité (Polet et al., 2003). L'application de l'évaluation des risques pendant les étapes de conception n'a pas donné lieu à une attention appropriée (Khan et al., 1998). Donc, historiquement l'utilisation de l'analyse de risque avait

un rôle plutôt passif et a été en tant que moyen de vérification de conception (Khan et al., 1998).
Un des facteurs principaux qui permet de réaliser la réduction substantielle de risque est d'intégrer l'analyse de la sécurité dans le processus de conception (Tam et al., 1996). Pour réellement améliorer la sécurité, le système original doit être conçu sécurisé, ça veut dire avec le moins de danger possible en prenant la sécurité en compte dans toutes les étapes de conception.
D'ailleurs, intégrer le concept de sécurité dans les boucles itératives des modifications, lors de la conception, augmenterait l'occasion de trouver des solutions optimales avec moins de temps et d'effort (Khan et al., 1998).
Bien que selon des normes « les fabricants ou leurs représentants doivent effectuer une évaluation des risques et tenir compte des résultats dans la conception de machine » (directive de 98/37/EC), et actuellement, l'importance de l'analyse de risque dans la conception de produit et de processus est largement acceptée, mais beaucoup de processus de conception de système de fabrication, néanmoins, n'applique pas une analyse systématique de sécurité ((Määttä, 2003) et (Kjellén et al., 1995)).
En intégrant les approches systématiques d'analyse de risque dans les étapes de conception, plusieurs des échecs inacceptables et des désastres peuvent être évités ((Määttä, 2003), (Leveson, 2004), (Tam et al., 1996) et (Kjellén et al., 1995)).
(Kjellén et al., 1995) et (Määttä, 2003) ont présenté une liste des applications et des avantages, qui peuvent être réalisés, en appliquant l'analyse de risque, lors de la conception.
(Tam et al., 1996) affirme que l'application d'outils appropriés et adaptés, lors de la conception, est la clef de la réduction de risque d'une façon efficace.
D'autre part, les concepteurs de système et les intégrateurs de système ont besoin des instructions, et d'approches adaptées à la façon dont appliquer des principes de sécurité pour le système de production (Tiusanen et al., 2003). Le développement de nouvelles méthodes d'analyse de risque adaptées peut être un challenge pour ce qui est de l'intégration de l'analyse de risque dans les étapes de conception.
(Tam et al., 1996) a présenté une méthode pour considérer les objectifs d'ALARP dans le processus de conception.
La méthode PIAS est proposée par (Kjellén et al., 1995) pour être employée pendant la conception de nouveaux systèmes. Cette méthode convient à l'identification et à l'évaluation des problèmes de sécurité typiques des systèmes de production automatiques, problèmes liés à la conception, et à faire des comparaisons entre les solutions techniques. Elle est basée sur une combinaison d'analyse d'énergie et de sécurité de travail (Kjellén et al., 1995).
Selon (NASA, 2002), dans la pratique, l'analyse des modes de défaillance et l'analyse d'effets (FMEA) est le procédé le plus largement utilisé d'analyse aux étapes initiales du développement de système.

5. Mesures de sécurités (Barrières)

Particulièrement dans les systèmes les mieux conçus, il y a plusieurs dispositifs de sécurité en place pour empêcher des accidents de se produire ((Harms-Ringdahl, 2003b) et (Rausand, 2005d)), qui s'appellent des barrières.
La norme européenne NF EN 953, explique les barrières utilisées pour la sécurité des machines.
Elle a classifié les différentes formes de barrières, sous le nom de « protecteurs » et formalisé un guide pour le choix de ces protecteurs (EN, 1997b). Selon (Clemens, 2002), quand les menaces posent le risque à un niveau inadmissible (élevé), une mesure doit être prise pour les contrôler. (NASA, 2003) partage la même idée, selon lui, les barrières sont des mesures pour ramener le risque de résultats indésirables à un niveau acceptable. Les barrières sont mises en

place pour réduire la fréquence d'occurrence de la déviation et/ou atténuer ses conséquences ((De Dianous et al., 2006) et (Rausand, 2005h)).
Les concepts et la terminologie liés aux barrières sont considérablement variés (Harms-Ringdahl, 2003b). D'autres termes, généralement utilisés pour ce concept sont la « fonction de barrière », la « défense », « le dispositif protecteur » (CEC, 2003)) et la « couche de protection » (Harms-Ringdahl, 2003b) (Rausand, 2005b).
Généralement, les définitions de la notion de barrières sont très simples, mais d'autre part, elles ne présentent pas une limite ferme et claire pour ce concept.
(Zhang et al., 2004) a considéré les barrières dans l'interaction homme–machine. D'après lui, les concepteurs équipent leurs systèmes avec des barrières afin de réduire les erreurs humaines, de limiter la propagation d'échec et/ou de protéger les opérateurs humains contre des échecs techniques. Il a défini la barrière comme un obstacle, une obstruction qui peut empêcher une action d'être effectuée ou une situation de se produire ou pour atténuer la sévérité des conséquences négatives.
Selon (Polet et al., 2003) et (Polet, 2002), les barrières sont des moyens mis en oeuvre afin de réduire les risques. (Hollnagel, 1999) a défini les barrières, en tant qu'équipement, des constructions ou règles qui peuvent arrêter le développement d'un accident.
Mais selon (Harms-Ringdahl, 2003a) et (NASA, 2003), une barrière est vue comme un dispositif physique ou une commande administrative qui ramène le risque des résultats non désirés à un niveau acceptable.
Généralement, ajouter chaque barrière, augmente le coût (Leveson, 2004) et la complexité du système, et parfois, même, elles présentent de nouveaux risques.
L'analyse de barrière est employée pour choisir, optimiser et vérifier les barrières (Kjellén et al., 1995), et pour déterminer comment ces barrières ou commandes peuvent faillir. Ainsi l'analyse de barrière est appliquée afin de choisir les barrières et vérifier leurs conditions nécessaires, incluant : (1) l'efficacité, (2) le temps de réponse, et (3) le niveau de confiance (De Dianous et al., 2006).
Elle fournit une manière structurée de considérer les événements liés à un manquement de sûreté du système (Livingston et al., 2001) et d'identifier plus clairement les scénarios qui ont un niveau insuffisant de contrôle de risque (De Dianous et al., 2006).
Cependant l'analyse de barrière devrait également fournir des informations afin d'estimer les coûts des barrières et leurs effets négatifs sur la productivité. (Polet, 2002) démontre que le risque de franchissement de barrière par l'opérateur est augmenté quand une barrière réduit la productivité ou le confort de l'opérateur ou augmente sa charge de travail. Il présente un indicateur appelé « contrôle et perte de contrôle » pour mesurer le coût et le bénéfice de franchissement de la barrière du point, de vue de l'opérateur (Polet, 2002).
L'analyse de barrière est employée, aussi, en grande partie pour étudier des accidents. (Hollnagel, 1999) déclare qu'un accident peut être décrit comme un ensemble de barrières qui se ont échoué.

5.1. Classification de barrières

Les théories utilisées dans l'analyse de barrière ont été à l'origine basées sur les travaux successifs de la théorie des dominos de Hienrich dans les années 30, de Haddon en 1966 et de Gibson en 1961, qui ont développé le concept d'un accident comme dégagement anormal ou inattendu d'énergie (Livingston et al., 2001). Le concept de barrière est dérivé de l'analyse des processus d'accidents comme contact entre l'agent dangereux (énergie) et la cible (un objet vulnérable et valable) ((Kjellén et al., 1995), (Trost et al., 2004) et (PSA, 2005)), et donc une barrière a été définie comme protecteur de la cible d'un ou plusieurs risques ((Guldenmund, 2005) et (Livingston et al., 2001)).

Evidemment, cette barrière est physique, autrement, elle ne peut pas protéger la cible (Guldenmund, 2005). Dans le contexte de la défense en « profond », le concept de barrière inclut également les barrières qui empêchent quelques sortes de « perte de contrôle » (Guldenmund, 2005). (Polet, 2002) et (Zhang et al., 2004) déclarent que les barrières sont employées pour empêcher des événements ou des accidents mais pour inclure également les mesures qui sont prévues pour ressusciter la cible et pour atténuer la sévérité des conséquences négatives.
Selon (Hollnagel, 1999) la connaissance et des qualifications, et la surveillance sont également considérées comme barrières. (Guldenmund, 2005) regroupent les différents éléments du matériel et des barrières de comportement. (Hasan, 2002) explique que des barrières sont employées pour éviter l'exposition de l'opérateur aux phénomènes dangereux. (Hollnagel, 1999) sépare les barrières protectrices des barrières préventives.

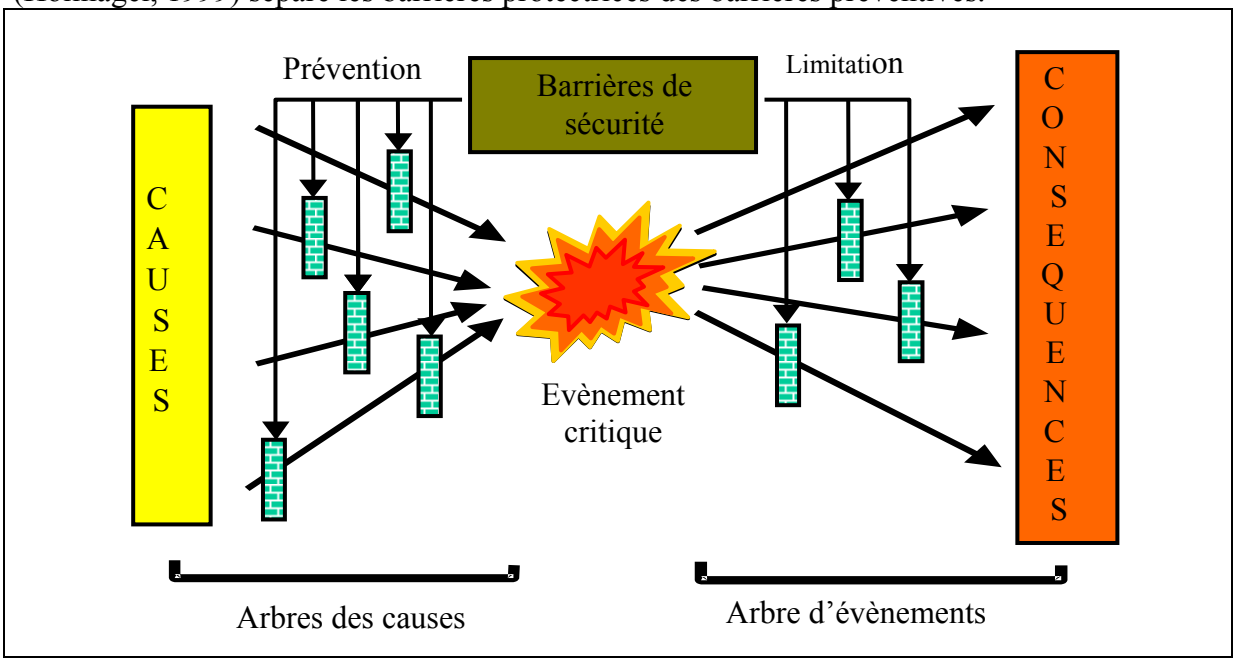


Figure 18. Les fonctions de sûreté de barrières et de réduction qui sont présentées dans le modèle de papillon (traduit)

Il définit une barrière comme un « équipement, des constructions ou des règles qui peuvent arrêter le développement d'un accident ». (De Dianous et al., 2006) emploie la même idée sous forme du diagramme du papillon présenté sur la figure 18. Dans ce modèle, la fréquence de l'occurrence des événements est réduite, en tenant compte de la fiabilité de barrières. Dans ce modèle les effets des barrières sont classifiés suivant leur façon d'empêcher un accident et d'atténuer ses effets. Dans (PSA, 2005) des barrières de contrôle sont présentées pour contrôler les risques, et des barrières de défense sont présentées pour protéger la cible (figure 19).

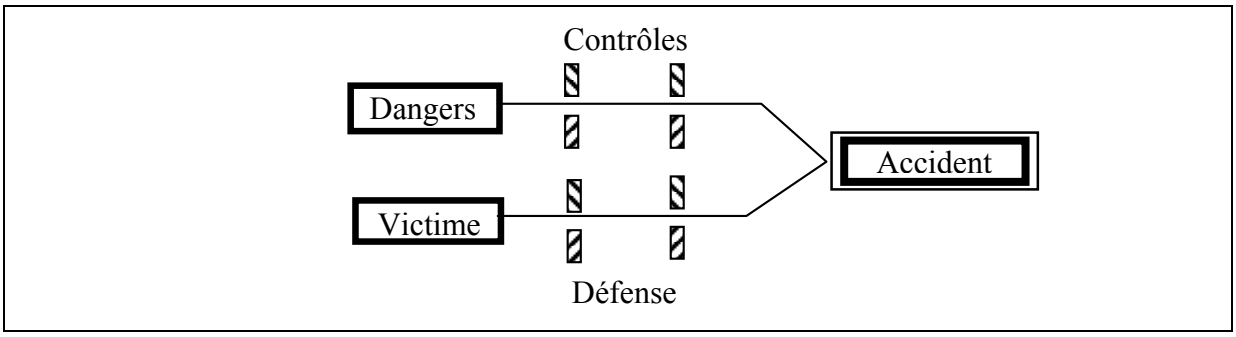


Figure 19. Modèle d'accident par bris de barrières

La notion de barrière entoure une large gamme de mesures préventives telles que les gardes, le matériel de protection personnel, des méthodes de travail, la formation, la surveillance, l'espace, le temps, des plans de secours et de gestion et des commandes d'organisation telles que des revues de conception et de sécurité et des évaluations des risques ((Livingston et al., 2001) et (NASA, 2003)).
(De Dianous et al., 2006) distingue quatre catégories principales des barrières : (1) barrières passives, (2) barrières actives, (3) actions humaines, et (4) barrières symboliques.
Il semble que la troisième classe dans cette classification est un cas spécifique de la deuxième classe. Aussi la quatrième classe est un cas particulier de la première classe, et parfois de la deuxième classe.
(Rausand, 2005h) a distingué cinq types de barrières (sauvegardes), par ces rôles : (1) identifier la déviation, (2) compenser la déviation, (3) empêcher l'escalade de la déviation, et (4) libérer le processus de la déviation dangereuse.
Hollnagel a présenté une classification pour les barrières en quatre classes, expliquée par (Polet et al., 2003) et (Zhang et al., 2004) : (1) barrières matérielles, (2) barrières fonctionnelles, (3) barrières symboliques, et (4) barrières immatérielles.
Selon (De Dianous et al., 2006), les barrières de sécurité peuvent être les systèmes physiques et d'ingénierie ou les actions humaines basées sur des procédures spécifiques ou des commandes administratives incluant :

- L'action d'un opérateur,
- Un système de prévention (couche de protection pour empêcher la corrosion),
- Un système de commande de secours (soupape de sécurité de pression),
- Un système physique (digue, mur de conservation),
- Un système sécuritaire (extincteur).

(Hollnagel, 1999) a distingué trois systèmes différents de barrière : physique, techniques, et facteurs /organisationnel humain.
Une autre sorte de classification intéressante pour le rôle des barrières, présentée par (De Dianous et al., 2006), inclut : (1) les barrières « d'évitement », les barrières de « prévention », et les barrières de « limitation/mitigation ».
(Polet, 2002) constate que les barrières sont des défenses en série que le concepteur peut installer pour rester dans un domaine de fonctionnement normal sûr malgré l'occurrence d'un dysfonctionnement technique ou humain.
(Hollnagel, 1999) dit que la fonction d'une barrière est d'empêcher une action d'avoir lieu ou de protéger le système et les personnes des conséquences. Il a présenté, aussi, une autre idée en expliquant l'approche de MORT qui définit les barrières de commande et les barrières de sécurité. Selon lui, la différence est que les barrières de commande se relient aux flux d'énergie voulus ou prévus, tandis que les barrières de sécurité se relient aux flux non désirés ou fortuits d'énergie.

(Polet, 2002) a considéré des barrières comme des critères d'optimisation du point de vue de l'homme. Il constate que dans un système donné « humain–machine », l'action d'un opérateur humain est au commencement délimitée par plusieurs limites telles que la limite de l'acceptabilité de coût, la limite des ressources disponibles et la limite de l'acceptabilité prescrite de sécurité, et ces limites peuvent être considérées comme des barrières.
(Ternov et al., 2004) a eu la même idée, en disant que les barrières comme des différentes sortes de défenses, pour empêcher l'opérateur de faire une action erronée ou capture les erreurs de l'opérateur avant qu'elles influencent le système. Il a représenté différentes méthodes de classification de barrières comme : administratives contre technique, et faible (relative) contre fort (absolue), selon leur capacité à attraper des actes de perturbations / désordre.
Selon cette classification, les barrières administratives sont souvent plus faibles que les barrières techniques.
(Harms-Ringdahl, 2003b), utilise, aussi, la notion de barrière pour des aspects d'organisation.
MORT propose également une distinction entre plusieurs types différents de barrières. Ceux-ci sont (Hollnagel, 1999) :

- Conception d'équipement ;
- Barrières physiques ;
- Dispositifs avertissant ;
- Procédures/procédés de travail ;
- Connaissance et qualifications ;
- Surveillance.

5.2. Attributs de barrières

La question des caractéristiques des barrières n'est pas bien clarifiée dans les textes scientifiques.
(Määttä, 2003) constate que plus il y a de risque dans un système, plus la fiabilité est nécessaire dans des mesures de sécurité, sans expliquer les autres exigences pour les barrières ou la façon de calculer la fiabilité d'un groupe de barrières.
(Polet, 2002) insiste sur le point que la barrière ne doit pas augmenter le charge mentale et physique ou le temps du cycle de production au niveau du travail de l'opérateur, il a essayé de définir un indicateur pour ces effets.
Selon (Clemens, 2002) distingue trois critères pour les barrières : (1) efficacité, (2) faisabilité, et (3) coût.
(De Dianous et al., 2006) présente des attributs de l'efficacité, le temps de réponse, et le niveau de confiance, pour les barrières.
Il apparaît que ces attributs ne sont pas bien définis. D'abord parce qu'il y a une intersection entre la définition de l'efficacité et le niveau de confiance, quand la « probabilité de l'exécution » est considérée comme un indicateur pour l'efficacité, qui est complémentaire de la « probabilité d'échec » utilisée dans la définition du « niveau de la confiance ». En plus, le temps de réponse est défini comme une durée, dépendant du comportement transitoire de l'efficacité de barrière, et sans clarifier l'information suffisante de ce comportement.

6. Gestion de risque

(Harms-Ringdahlen, 2004) a présenté le système de gestion des risques comme une partie du système de gestion globale qui inclut l'organisation, la planification, les responsabilités, les pratiques, les procédures, les procédés et les ressources pour développer, réaliser, réviser et maintenir une politique pour contrôler les risques.

Le but principal de la gestion des risques est de garder les risques à un niveau acceptable programmer pour éliminer les risques inacceptables ou les diminuer à un niveau acceptable (Labodova, 2003).
Selon (Wheeler, 2000), jusqu'aux années 90, typiquement, la gestion du risque était réactive, non structurée, moins holistique et mal documentée. Mais, l'évolution des situations de travail confirme la nécessité de la création de systèmes de gestion de sécurité, basés sur la modification de la culture globale de sécurité (Kennedy, 1998).
Selon (Harrissona et al., 2003), l'efficacité de la prévention d'accident de travail a augmenté par la décentralisation de la gestion au niveau des employés impliqués et donne le rôle principal à jouer par les comités d'hygiène et de sécurité en collaboration avec les syndicats.
Bien qu'une partie importante de la gestion de risque doit être appliquée lors de l'utilisation de produits, selon (Benedyket, 1998), la gestion de l'environnement d'utilisation de produit est très difficile, car beaucoup de mesures de contrôle ne s'appliquent pas dans cet environnement. Par exemple, il est rare de pouvoir présenter la formation pour des utilisateurs des produits ; la surveillance est habituellement absente ; le choix des utilisateurs est impossible ; des avertissements aux utilisateurs ne peuvent pas être soutenus avec l'action disciplinaire ; les instructions souvent ne sont pas lues ou aperçues, l'entretien est souvent maigre et incontrôlable. Donc, des analyses de risque et des évaluations des risques devraient, aussi, considérer la mauvaise utilisation ou l'utilisation inhabituelle du système et être mises à jour régulièrement et à l'arrivée de nouvelles informations.
(Clemens, 2002) confirme la même idée, en indiquant que la valeur d'une analyse qui reste dans un classeur, tandis que le système subit des changements, est perdue pour le propriétaire du système.
La gestion de risque doit être commencée au début du cycle de vie du système pour tenir compte du choix des solutions optimales de conception et des solutions alternatives opérationnelles (Tiusanen et al., 2003), et devrait être constamment être passés en revue et mis à jour, parce que les changements peuvent mener à la modification des critères existants et à l'addition de nouveaux critères (Määttä, 2003).
Lors de la détermination de la stratégie de gestion des risques, la concentration pour éliminer les causes « racines » est très importante, pour empêcher l'occurrence et la répétition de plusieurs accidents, car la cause « racine » ne s'applique pas à une occurrence seulement, mais a des implications génériques à un large groupe d'occurrences possibles (ONS, 1992).
La MORT c'est une des approches efficaces et systématiques pour trouver les causes « racines » dans le contexte de l'organisation et du système.
Afin d'évaluer le rendement du système de gestion de risques pour répondre aux exigences des règlements de contrôle de risque, un ensemble de conditions doit être développé. Celles-ci sont dérivées d'exigences des règlements. Les mesures doivent être basées sur des requêtes régulières, des normes acceptées, de propres expériences de la compagnie et des systèmes de valeur.

6.1. Prévention de risques

Le contrôle de risque est établi par la réduction des risques associés aux phénomènes dangereux en tenant compte des barrières de sécurité, de sorte que les phénomènes dangereux soient définis avec un couple acceptable sévérité / fréquence d'occurrence ((Labodova, 2003) et (De Dianous et al., 2006)).
La correction et la réduction de risque, à l'échelle de composant, sont habituellement basée sur le fait de diminuer la sévérité et la probabilité des échecs (NASA, 2002). (Clemens, 2002) propose une liste des mesures, applicables pour réduire les échecs techniques.
Selon (Leveson, 2004), des échecs de composants peuvent être empêchés en augmentant l'intégrité ou la résistance des composants. Ils peuvent également être évités par les contrôles

lors de fabrication, et des commandes opérationnelles, telles que des inspections périodiques et l'entretien préventif.
Pour diminuer des erreurs humaines, des méthodes spéciales doivent être appliquées, dans les domaines administratifs et organisationnels, et aide technologique comme la supervision, la formation, établir les procédures de sécurité et les dispositifs de l'alerte.

6.2. Les niveaux de confrontation de risque

Selon (Wheeler, 2000), il y a des risques qu'on ne peut pas totalement les éliminer mais, main on peut les contrôler et diminuer à des niveaux acceptables. (Clemens, 2002) a distingué quatre niveaux de confrontation à un système dangereux : (1) réduire, (2) éviter, (3) transférer, et (4) accepter.
Selon (Charlwood, 2003), le risque résultant des erreurs et des omissions des personnes, les défauts et les échecs des objets façonnés et le comportement normal du monde doivent être atténués jusqu'à atteindre un niveau acceptable, mais, dans tous les cas, le risque qui est inhérent à une activité quand tout se comporte comme prévu est toujours inacceptable.
En termes d'élimination des dangers dans un système, MORT liste quatre niveaux de confrontation, par ordre d'efficacité (Hollnagel, 1999) :

- Elimination par la conception,
- Installation des dispositifs de sécurité appropriés (barrières),
- Installation des dispositifs d'avertissement (alarmes),
- Développement des procédures spéciales pour manipuler la situation.

Normalement, il est impossible d'éliminer tous les risques dans une SDT. Les raisons étant qu'il serait trop coûteux parfois et dans d'autres cas ce ne serait pas pratique, alors, les contrôles proportionnés doivent être imposés sur les dangers non–éliminés (Trost et al., 2004).

Synthèse du chapitre I

Dans ce chapitre les concepts de base reliés aux accidents professionnels sont discutés. Ces concepts nous aideront à mieux comprendre les processus et les causes des accidents.
D'autre part une classification de techniques d'analyse d'accidents est présentée pour distinguer les techniques d'analyse d'accidents et les techniques d'analyse de risque, qui seront présentées ultérieurement.
Les techniques d'analyse d'accidents sont appliquées pour identifier les causes des accidents, pour estimer les conséquences des accidents déjà réalisés, et pour proposer des mesures préventives pour empêcher de futurs accidents. Ce sont des analyses a posteriori d'accidents.
Par contre les techniques d'analyse de risque sont les analyses qui sont faites avant l'accident, pour empêcher son occurrence.
Il y a des méthodes d'analyse d'accidents qui peuvent être utilisées, aussi, pour l'analyse de risque. Parmi elles, on utilisera les techniques d'analyse d'énergie et l'analyse de barrières, pour développer de nouvelles méthodes d'analyse de risque, applicables lors de la conception de situations de travail.
Nous utiliserons l'analyse d'énergie pour calculer l'index de risque pour chaque séquence de simulation d'opération de travail.
L'analyse de barrières sera utilisée à plusieurs niveaux pour analyser les effets de barrières sur la réduction de dangers, la protection de cible et la réduction de la probabilité des accidents.
Ces techniques seront appliquées sur la plate–forme Delmia, comme un module pour intégrer l'analyse de risque dans le processus de conception de systèmes socio–techniques complexes.
Ensuite, les concepts d'analyse de risque se sont présentés.
Les processus d'analyse de risque sont considérés comme un effort pour identifier, quantifier et évaluer, et contrôler le risque. Chacune de ces étapes est présentée pour clarifier les processus d'analyse de risque et avoir une idée du problème afin d'intégrer ce processus dans le processus de conception. L'objectif est de donner une image des concepts et ces paramètres, utilisés lors d'analyse de risque, et la façon de les déterminer.
Une classification des méthodes d'analyse de risque est présentée et les applications de la logique floue, l'environnement 3D et en réalité virtuelle dans l'analyse de risque sont envisagées.
La faisabilité, les contraintes et les avantages de faire l'analyse de risque lors de la conception de SDT sont discutés.
Comme un concept clé d'analyse de risque lors de conception, le concept de barrière est plus précisément étudié.
Dans la section concernant la gestion de risque, les approches et les points de vue concernant la prévention des risques sont présentés.
Ce chapitre est important comme une introduction pour les prochaines parties, pour présenter les concepts de base, et pour insister sur l'importance d'intégrer l'analyse de risque dans le processus de conception.
Il fournit, aussi, des informations de base pour mieux comprendre l'application actuelle de l'environnement numérique dans l'analyse de risque, pour avoir la possibilité de comparer les avantages des développements qui seront proposés, en comparaison avec la situation actuelle.
Ces techniques, en particulière, peuvent être utilisées pour faire l'analyse de risque professionnel pour l'humain lors de la conception de SDT à différentes échelles pour le corps humain.
Finalement on va utiliser les résultats de ce travail pour intégrer les agents d'analyse de performance et d'analyse de risque lors du déplacement d'humain dans un lieu de travail dangereux.

CHAPITRE II : MODELISER LE RISQUE DANS LA SITUATION DE TRAVAIL

1. Zone dangereuse floue

Ces dernières années la technique de réalité virtuelle a été largement répandue pour concevoir des situations de travail.
Malgré l'efficacité de ces techniques, il n'y a aucune technique réellement appropriée pour présenter les risques professionnels potentiels dans un environnement virtuel, et ce dernier est l'un des défis les plus importants dans ces méthodes.
Les approches traditionnelles pour définir les zones dangereuses (ZD) ne sont pas appropriées pour la présentation dans les environnements virtuels. Selon (Määttä, 2003), la réalité virtuelle convient pour visualiser les risques mécaniques d'écrasement et les limitations de l'espace. Néanmoins les systèmes qui intègrent des éléments électriques, biologiques ou d'autres risques que mécanique ne trouveront pas les mêmes avantages à employer les modèles tridimensionnels pour évaluer les dangers.
Comment est-t-il possible de présenter d'autres risques dans un environnement industriel virtuel ? Indubitablement, le calcul de l'index de risque correspondant à une zone dangereuse autour d'un objet dangereux peut être utile. Mais, normalement, la limite de cette zone n'est pas explicitement définie.
L'information manquante lors des premières parties de la conception, et la complexité de calcul en cas de plusieurs dangers limitent les approches traditionnelles. En plus, la visualisation d'une ZD dans la situation virtuelle est un autre problème important. Définir une zone dangereuse conventionnelle implique un changement brutal de risque aux frontières de cette zone, mais le consensus est de dire que les risques augmentent progressivement en proportion de la distance de l'objet dangereux.
L'amplitude du risque dépend des positions de l'agent dangereux et de la cible, et de leurs caractéristiques. Calculer un indice de risque pour chaque situation exige des modèles mathématiques complexes, qui ne sont pas pratiquement applicables.
L'utilisation des ensembles flous permet à un système symbolique conventionnel de s'adapter à des phénomènes et des comportements continus. On utilise cette caractéristique de l'ensemble flou pour définir la zone dangereuse, pour faciliter l'analyse de risque d'une manière plus réaliste.

1.1. Les concepts de bases

Les risques professionnels correspondent à des risques dus aux processus, aux activités de manipulation et matérielles dans le lieu de travail et sont des phénomènes aléatoires. Beaucoup de techniques ont été développées pour analyser les risques, mais malgré beaucoup de simplifications, ils sont toujours complexes (Wunsch et al., 2005), et difficiles à utiliser.
(Gallego, 2004) a défini la zone dangereuse comme une partie de la surface au sol où un événement nocif peut se produire.
Nous allons proposer une autre définition pour la zone dangereuse basée sur le concept d'énergie, en utilisant le concept de l'ensemble flou. Dans cette méthode un accident est représenté comme un écoulement d'énergie qui entre en contact avec la cible vulnérable.
Selon la norme présentée dans (CEC, 2003), la zone dangereuse désigne n'importe quelle zone dans et/ou autour des machines dans lesquelles une personne exposée est sujette à un risque pour sa santé ou sa sécurité.

1.1.1. L'ensemble flou

Un ensemble flou, défini par Lotfi A. Zadeh et présenté dans ((Jager, 1995), (Hellmann, 2001) et (Trencseni, 2004)), est un ensemble avec l'appartenance évaluée dans l'intervalle de [0,1]:

$$\mu_A : X \rightarrow [0,1]$$

La fonction d'appartenance, associe à chaque élément dans l'ensemble spécifié un degré d'appartenance (Ru et al., 1996).
Les ensembles flous sont le concept de base soutenant la théorie floue. La définition de l'ensemble floue est basée sur cette idée que dans le monde réel, contrairement aux modèles mathématiques traditionnels, beaucoup de changements ne sont pas catastrophiques mais progressifs en nature (Takagi, 1997). Avec la logique floue, on peut exprimer en termes mathématiques plusieurs concepts qui ne sont pas précisément définis, car à la différence de la logique binaire, elle n'exige pas qu'une proposition soit seulement vraie ou fausse mais assigne une valeur d'appartenance (entre 0 et 1). Alors, nous pouvons déclarer qu'un élément répond à une exigence même si cette condition n'a pas un sens clair, en lui donnant une valeur d'appartenance différente de 0 ou de 1 (Naddeo, 2001).
Les propositions logiques peuvent être liées à l'intersection ou à l'union des ensembles flous, et la négation dans une proposition floue peut être liée au complément d'un ensemble flou (Jager, 1995).

1.1.2. La zone dangereuse

Une zone dangereuse (ZD) est définie comme un espace présentant un risque significatif. Théoriquement, cette zone est déterminée pour un niveau prédéfini de risque. Ceci ne signifie pas que pour tous les points dans cette zone il y a la même probabilité et la même sévérité de danger, mais en considérant la limitation du calcul mathématique et la collecte de données il n'y a aucune approche pour modéliser, précisément, le risque approprié pour tous les points dans diverses conditions.
Pour démontrer la limitation des approches traditionnelles, dans leur représentation des zones dangereuses, nous pouvons imaginer une zone dangereuse, pour les piétons, autour d'une voiture en train de s'arrêter. En employant des méthodes traditionnelles nous définissons la ZD comme un espace uniforme autour d'un objet dangereux (figure 20).

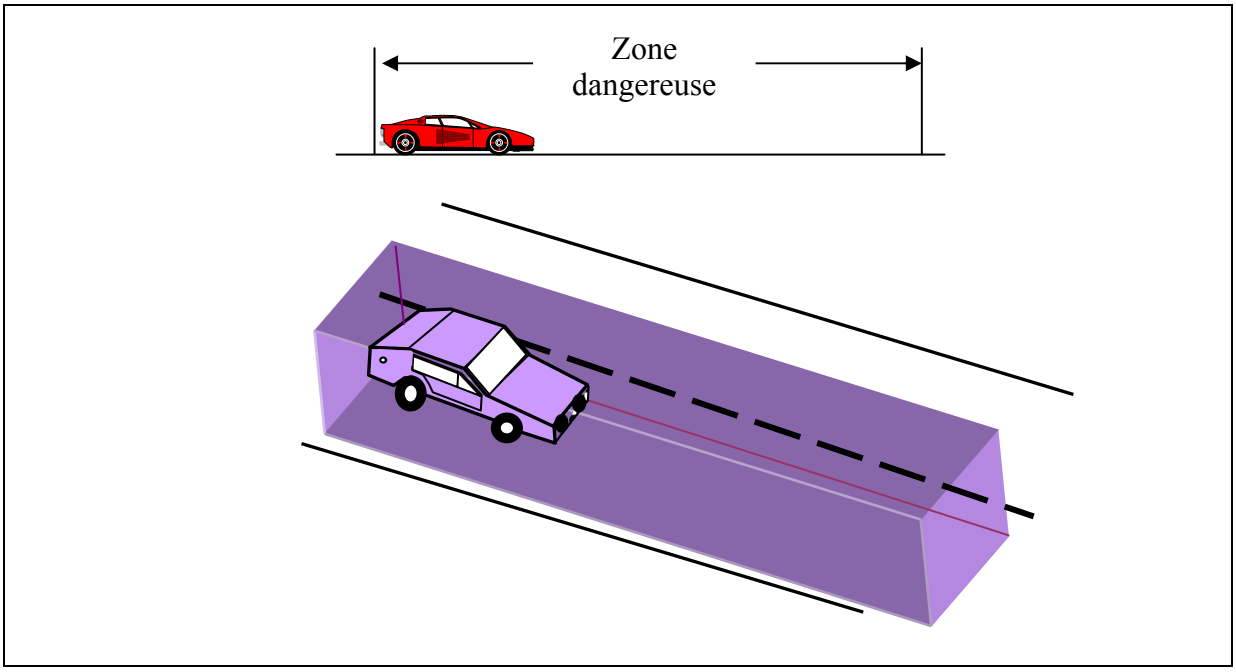


Figure 20. Démonstration de zone dangereuse, pour un piéton, avec des approches traditionnelles

Dans ce cas, le risque est considéré avec un changement brutal, aux frontières de la zone de danger, mais dans la réalité, le risque augmente progressivement, lorsque la cible s'approche de l'objet dangereux. Pour résoudre ce problème, De Winter (De Winter, 2004) a développé un modèle mathématique pour définir une forme géométrique, représentant le danger calculé devant une voiture. Mais, la définition de cette zone pour différentes situations (environnement différent : la construction de route, précipitations, pente de route, température, direction du soleil, vitesse différente ; conducteur différent : la personnalité, âge, genre, taille, lassitude ou ivresse, etc.) exige énormément de travail et présenter les résultats de ce travail est très difficile. Cette approche est trop coûteuse et alors, n'est pas toujours faisable. Ces problèmes existent également pour d'autres zones dangereuses parmi lesquelles, les postes de travail industriels. Nous proposons d'utiliser le concept de l'ensemble flou multidimensionnel pour modéliser la zone dangereuse. La plus importante particularité de ce modèle est l'utilisation directe des ensembles flous comme une carte pour montrer des dangers.

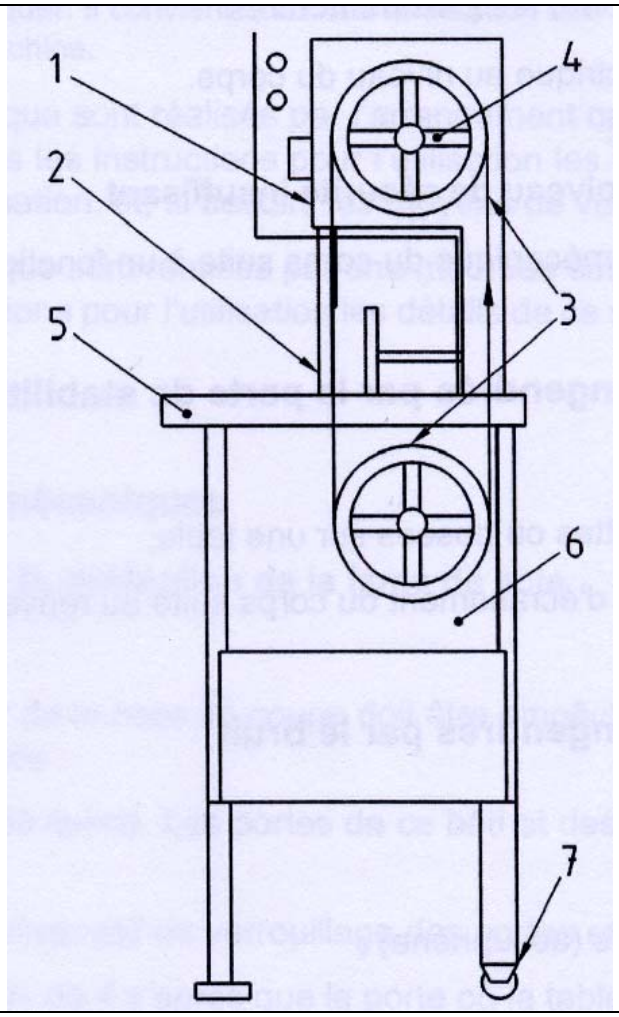


Figure 21. Les zones dangereuses précisées pour la machine « scie à ruban » par (EN, 2003)

Sur l'exemple industriel, la figure 21 montre les zones dangereuses, définies selon la norme européenne (EN, 2003), pour la machine « scie à ruban ». Cette définition est très simple. Les dangers et les phénomènes dangereux pour chaque zone sont expliqués dans cette norme. Mais les limites des zones dangereuses ne sont pas explicitement expliquées, ce qui peut créer des ambiguïtés pour faire des analyses de risque.

1.1.3. Espace flou

On propose une définition de l'espace floue (Fuzzy Space, FS) comme une extension de la théorie des ensembles flous obtenue en assignant une fonction d'appartenance unidimensionnelle ou multidimensionnelle comme univers du discours à un espace réel dans l'environnement. Nous considérons l'espace multidimensionnel sous forme de $\Re^n$ pour univers du discours, où n est le nombre de dimensions dans cet espace ($n \geq 1$).
Un ensemble flou est caractérisé par la fonction d'appartenance suivante :

$$\mu_A : X \rightarrow [0,1]$$

$\mu_A(x)$ est le degré d'appartenance du point x dans A, et donc le FS peut être exprimé comme suit :

$$f(x) = \{(x, \mu_A(x) | x \in \Re^n, \mu_A(x) \in [0,1]\}.$$

Si F et G sont les FSs dans un espace à *n* dimensions, alors, l'intersection $F \cap G$ est également un FS. Il peut être défini par la fonction de minimum, comme : $\mu_{F \cap G} = \min \{\mu_F(x), \mu_G(x)\} \forall x \in F, G$ et l'union de A et de B, $A \cup B$, est également un FS défini par : $\mu_{F \cup G} = \max \{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \forall x \in A, B$.
D'autres définitions peuvent aussi être acceptables, pour l'intersection et l'union des espaces flous.

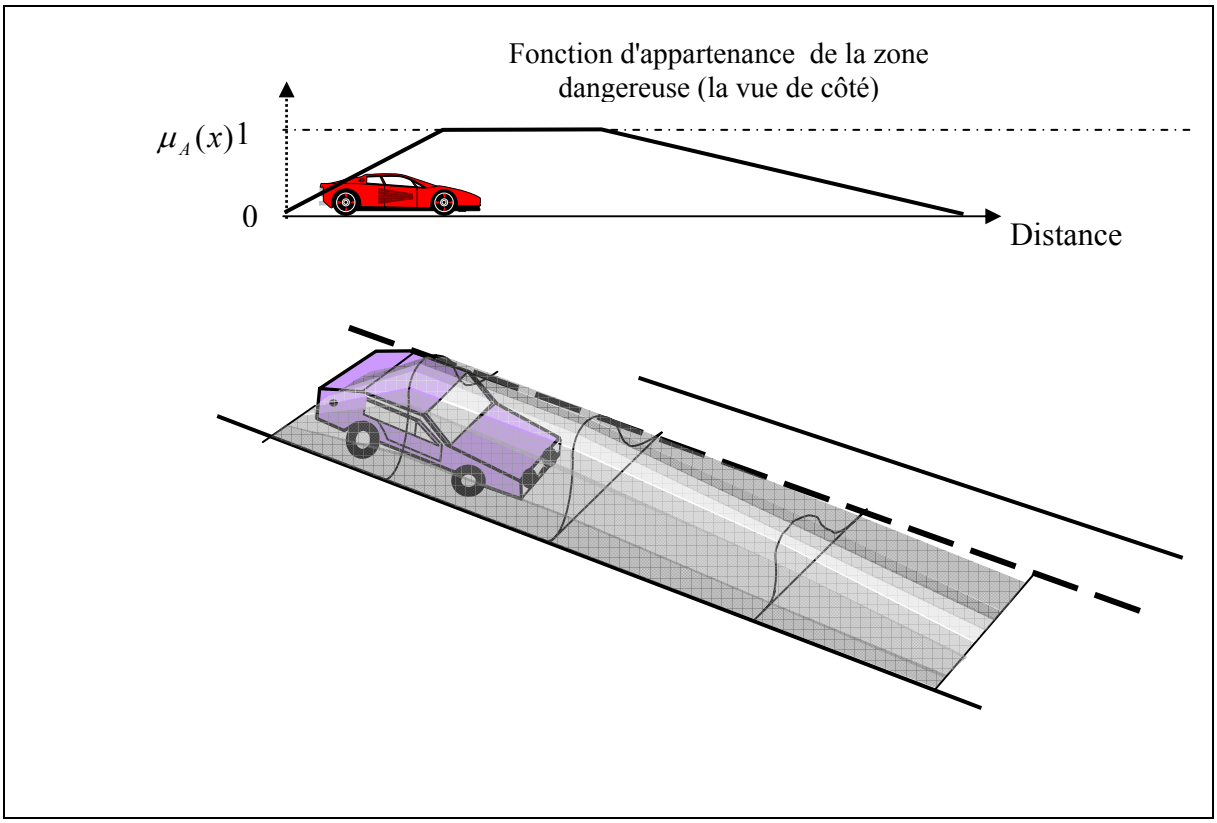


Figure 22. Démonstration d'une zone dangereuse autour d'une automobile en appliquant l'approche floue

Les exigences pour définir l'union et l'intersection des ensembles flous, présentées dans (Jager, 1995) sont aussi valables pour les espaces flous.
Ces propositions peuvent être généralisées à plusieurs ensembles flous. Par exemple une définition pour l'intersection de *n* espaces flous peut être définie comme :

$$B=(A_1 \cap A_2 \cap \ldots A_n)= \int_{x_1 \times x_2 \times \ldots x_n} \min(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \ldots, \mu_{A_n}(x_n)):(x_1, x_2, \ldots, x_n)$$

La définition complète d'un FS exige la détermination des paramètres suivants :

- Paramètres de forme : ces paramètres représentent la forme géométrique générale de FS, et sont généralement choisis parmi les ensembles flous ou leur combinaison. En fait, ils sont déterminés directement par un concepteur.
- Paramètres de taille : les paramètres de taille déterminent la grandeur de la fonction d'appartenance, et ils dépendent de l'amplitude du danger et de la vulnérabilité de la cible. Dans certains cas, la zone décrite par un FS, peut être infinie, dans certaines ou toutes les dimensions.
- Paramètres de positionnement : les paramètres de positionnements déterminent l'endroit et la direction des espaces flous. Ces paramètres sont déterminés en fonction de la configuration du système.

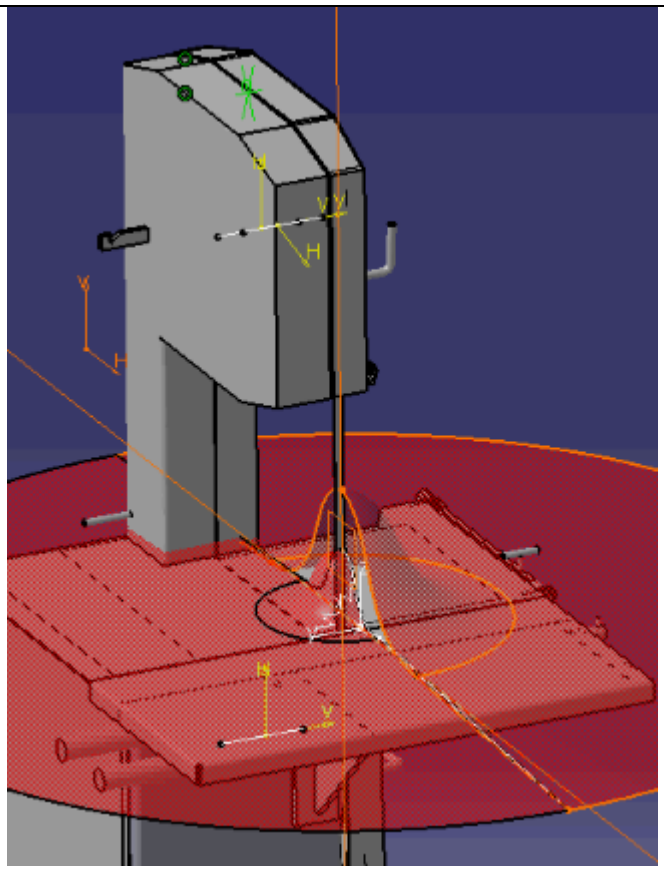
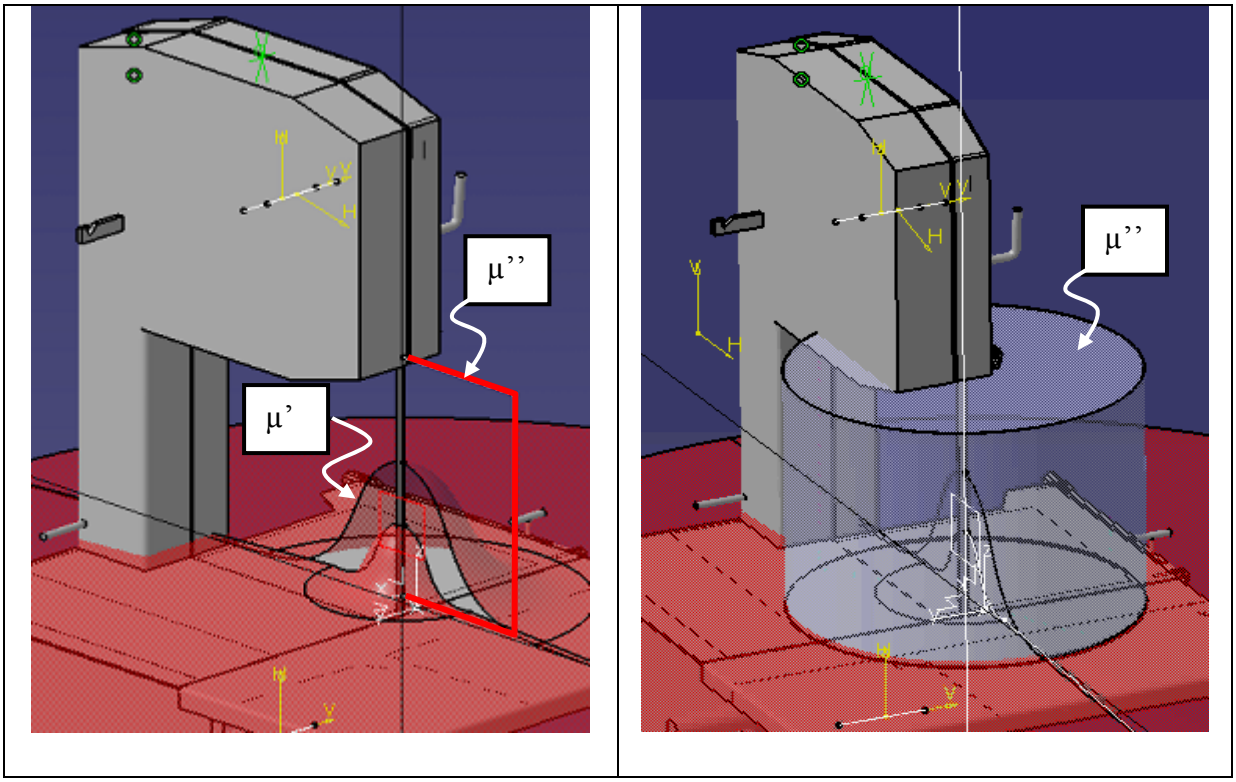


Figure 23. La zone dangereuse floue bidimensionnelle autour de la lame de la scie à ruban

Une zone dangereuse décrite par l'espace flou est une carte géographique de distribution de danger dans l'environnement, pour une cible ou une famille de cibles spécifiques. Dans les méthodes d'analyse de risque, basée sur des scénarios, une zone dangereuse floue (ZDF) montre la distribution de la sévérité d'un accident en relation avec la place de la cible, selon les conditions expliquées par le scénario. La probabilité de l'accident doit être calculée séparément, en considérant la chaîne d'évènements, par exemple avec l'analyse de l'arbre de défaillance ou l'arbre d'évènements, en connaissant les processus accidentels (scénarios).
La figure 22, montre un plan schématique de ZD. Elle montre une mesure de la sévérité des accidents autour de la voiture de l'exemple précédent selon la position du piéton au moment

de l'impact, sans considérer la probabilité de l'impact. Par conséquent la figure n'est pas une démonstration de la fonction de distribution de probabilité. Un des points les plus importants dans cette approche est que l'augmentation de danger est progressive.
Selon cette définition, le degré de sévérité dans la zone dangereuse est défini de manière proportionnelle avec la "fonction d'appartenance" de cible, dans la zone dangereuse. De cette façon, la sévérité est une caractéristique de la zone dangereuse, qui dépend de la position et des paramètres de l'objet dangereux, des barrières et de la cible. Augmenter le danger augmente la surface ou le volume de la zone dangereuse et/ou les degrés d'appartenance.
Cette définition est faite basée sur le fait que dans la définition traditionnelle, chaque point de la situation de travail peut être juste à l'intérieur ou à l'extérieur d'une zone dangereuse, mais selon cette nouvelle définition, un point non seulement peut être à l'intérieur ou à l'extérieur de la zone, il peut aussi avoir une situation intermédiaire, ayant un degré d'appartenance entre zéro et un.
La Figure 23 montre la zone dangereuse floue définie autour de la lame d'une scie à ruban. Cette zone est définie pour présenter le danger pour la main de l'opérateur, en deux dimensions, et elle montre que le devant de lame est plus dangereux que l'arrière.



(a) (b)

Figure 24. La façon de définir les zones dangereuses tridimensionnelles :
(a) appliquer des espaces flous uni et bidimensionnels et
(b) appliquer deux espaces flous bidimensionnels

Pour définir une zone dangereuse en trois dimensions, nous ajoutons un autre espace flou, uni ou bidimensionnel (figure 24). On calcule le degré d'appartenance de chaque point par :

$$\mu(X)=\mu'(x)\cap\mu''(x)$$

μ'(X) et μ''(X) sont les degrés d'appartenance du point X dans chacun des espaces flous. Cela veut dire que pour qu'un point soit dans la zone dangereuse, il faut qu'il se situe dans les deux espaces flous.

Dans cet exemple, le premier espace flou définit la distribution dans le plan horizontal, et le deuxième définit la hauteur verticale que l'espace flou horizontal a effectivement.

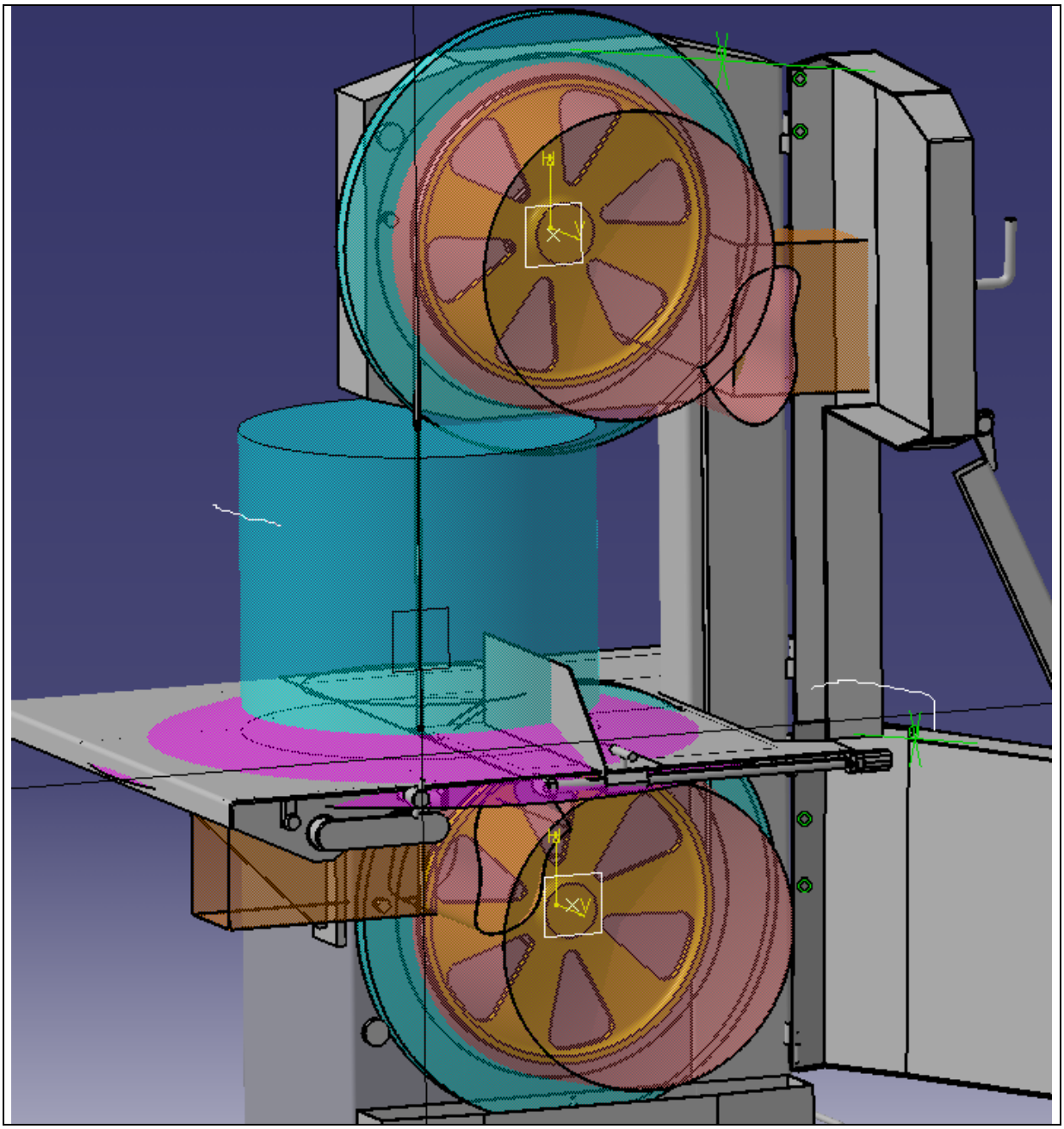


Figure 25. Les zones dangereuses floues, définies pour les parties indiquées par la norme européenne pour une scie à ruban

La Figure 25 montre les zones dangereuses floues pour une scie à ruban, en accord avec la norme européenne.

1.2. Calculer les paramètres de la zone dangereuse

Dans ce travail, on suppose que sur la base de l'avis des experts ou des lois de la physique, on connaît les formes et la position (la direction et les cordonnées) de la zone dangereuse floue. Mais, par contre, les valeurs des paramètres des zones dangereuses, qui définissent les largeurs des zones, restent inconnues. Par exemple pour un objet radioactif, on sait que la

radiation diminue en fonction du carré de la distance, et la zone de danger est centrée sur l'objet. Mais pour définir la zone dangereuse, on a besoin de savoir le montant d'un autre paramètre, qui définit l'amplitude du danger, à partir de l'amplitude des radiations. Connaissant ce danger, on sait comment il pourra être réduit en s'éloignant de la source de danger, et finalement, on peut définir la zone dangereuse autour de cet objet.
En pratique, la considération de tous les éléments effectifs relatifs au danger est très difficile. Par exemple le danger devant une voiture en marche, pour un piéton, dépend de plusieurs paramètres pour lesquels chacun peut donner plusieurs valeurs. Calculer le danger pour chacune des combinaisons de ces paramètres avec les méthodes conventionnelles est presque impossible. Pour l'exemple, on va voir la façon de déterminer la zone dangereuse devant une voiture, en considérant seize attributs différents, qui décrivent l'environnement, le conducteur et la voiture. Même si on simplifie ce problème, en disant que ces attributs sont discrets et que chacun peut avoir, seulement, quatre valeurs différentes, pour définir la zone dangereuse, il faut qu'on considère 4^16 = 4 294 967 296 combinaisons différentes ! Considérer toutes ces combinaisons pour définir la zone dangereuse floue, est impossible. Ce problème augmente si on considère des attributs continus, comme la vitesse par exemple, qui a un rôle incontestable, pour définir ce danger.
Même si on utilise la logique floue pour faciliter le travail, il faut définir les règles floues pour beaucoup de ces combinaisons. Comme exemple de difficultés, on peut signaler que lors du développement des règles floues avec MATLAB, même si on considère, justement quatre attributs, on ne peut pas voir tous les attributs en même temps sur l'écran. D'autre part, si on considère plus de trois attributs, les experts ne peuvent pas superposer les effets de tous les attributs en même temps, dans leurs têtes, pour déterminer les résultats raisonnables.
Ces problèmes techniques et pratiques augmentent considérablement en ajoutant le nombre d'attributs, et pour considérer les effets de seize attributs, les difficultés dépassent largement la limite de la pratique.
C'est pour cela qu'on a appliqué une approche étape par étape pour intégrer les attributs. A chaque étape, on intègre les résultats de deux, trois ou au maximum quatre attributs précédents, pour définir un attribut intermédiaire qui résume les attributs détaillés.
L'avantage d'utiliser le système flou est la possibilité d'intégrer les données de différentes natures dans le même système, de manière simple et facile à éditer et à comprendre.
Dans ce projet, on a développé un logiciel, sur MATLAB, pour considérer seize attributs qui peuvent affecter la zone dangereuse dans les catégories essentielles suivantes :

- L'environnement et la zone de vue,
- Le conducteur,
- Le mécanisme d'arrêt.

Chacune de ces catégories est le résultat d'un système d'inférence floue, qui est le résultat d'un autre système d'inférence floue, à un niveau plus détaillé.
Les attributs peuvent être désactivés, dans ce cas une valeur par défaut est utilisée pour eux. Les données d'entrées peuvent être des données numériques exactes ou des données linguistiques. Les étiquettes linguistiques sont déjà préparées, par utilisateur, et sont associées à des valeurs fixes.
Après avoir défini la valeur de chaque attribut, cette valeur intervient dans un système d'inférence floue et s'intègre avec les autres données d'un même niveau, pour former un nouvel attribut général, significatif pour l'utilisateur. Par exemple, la pluie, la neige, le brouillard, et la luminosité forment les conditions d'environnement, dans une échelle entre 0 et 100.
Cette valeur est traduite en utilisant les règles floues, afin que chacune des conditions corresponde à un poids différent. En modifiant ces poids et la définition des étiquettes linguistiques et éventuellement des règles, le moteur d'inférence peut être calibré.

Alors, la définition de l'environnement qui est une définition conceptuelle, sera quantifiée en utilisant les données de l'utilisateur. Dans le cas idéal ces données peuvent venir du système de récupération automatique de données de l'environnement. Dans la deuxième étape, ce résultat s'intègre dans un autre système d'inférence floue avec les résultats pour le conducteur et le mécanisme d'arrêt, pour former le résultat final, sous la forme d'une sortie numérique.
Cette sortie est le paramètre de la taille de zone dangereuse, qu'on connaît sous le nom de distance de sécurité.
En connaissant les paramètres de la zone dangereuse et la position des piétons par rapport à la voiture on peut calculer les degrés d'appartenance des piétons dans la zone dangereuse et donc finalement on peut calculer un index de risque pour eux.
La figure 26 montre la façon d'intégrer les données pour former le résultat final. Les branches sont des attributs d'entrée, définis par des étiquettes linguistiques ou des valeurs numériques exactes. Au centre, les données sont accumulées pour former le résultat. L'utilisateur peut même donner les données intermédiaires, sans être obligé de préciser les attributs partiels. Par exemple, il peut définir l'environnement dans la situation « Bien », sans préciser qu'il n'y a pas de neige, ni de pluie ou de brouillard.
La figure 27 illustre une image de l'interface de ce système avec l'utilisateur.
Pour les attributs comme la neige ou la pluie, l'utilisateur ne peut pas trouver une échelle numérique facilement. Dans ce cas, les étiquettes linguistiques, comme « un peu », « moyenne » et « beaucoup » sont proposées.
Par contre pour les attributs comme la vitesse et le poids, l'utilisateur est libre de choisir les données exactes ou sélectionner une des étiquettes linguistiques proposées.
Le point important pour que ce système soit valide est d'avoir une solution pour le calibrer. Pour assurer le résultat, il faut d'abord que la structure d'intégration de données soit cohérente. Il faut que les attributs soient indépendants et que les attributs accumulés à chaque étape soient complémentaires pour bien définir l'attribut de résultat.
Des fonctions d'appartenance, les règles et les manières d'agréger les résultats doivent être définis en considérant les caractéristiques nécessaires pour les systèmes flous.
Pour calibrer ce système, on a besoin d'avoir un niveau considérable d'expertises ou de données expérimentales.
En considérant la compréhensibilité des systèmes flous, un expert peut facilement les manipuler pour arriver au résultat désiré et convenant avec la réalité.
D'autre part, il y a plusieurs méthodes pour la formation de système flou, qui utilisent des données expérimentales par réseaux de neurones pour former le système d'inférence floue.
Il faut noter que même si calibrer ce système peut prendre du temps et être coûteux, l'avantage d'avoir une définition pour les zones dangereuses floues, en considérant les attributs d'entrée, justifie cette démarche. D'autre part, la possibilité d'intégrer plusieurs zones dangereuses et les effets de barrières, est un autre avantage, qu'il faut prendre en compte.

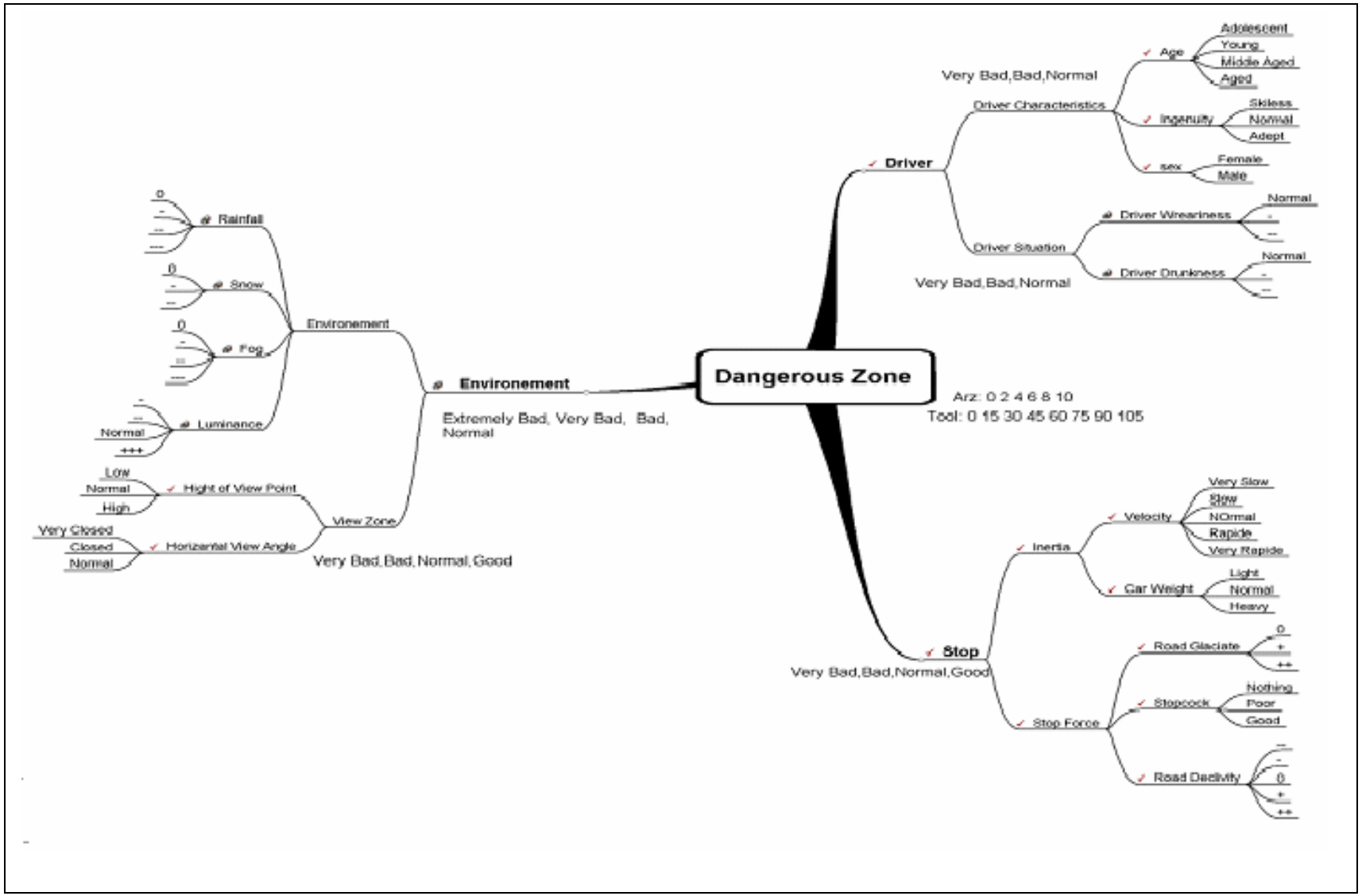


Figure 26. La méthode pour intégrer les attributs détaillés pour former les attributs intermédiaires et les paramètres de la zone dangereuse

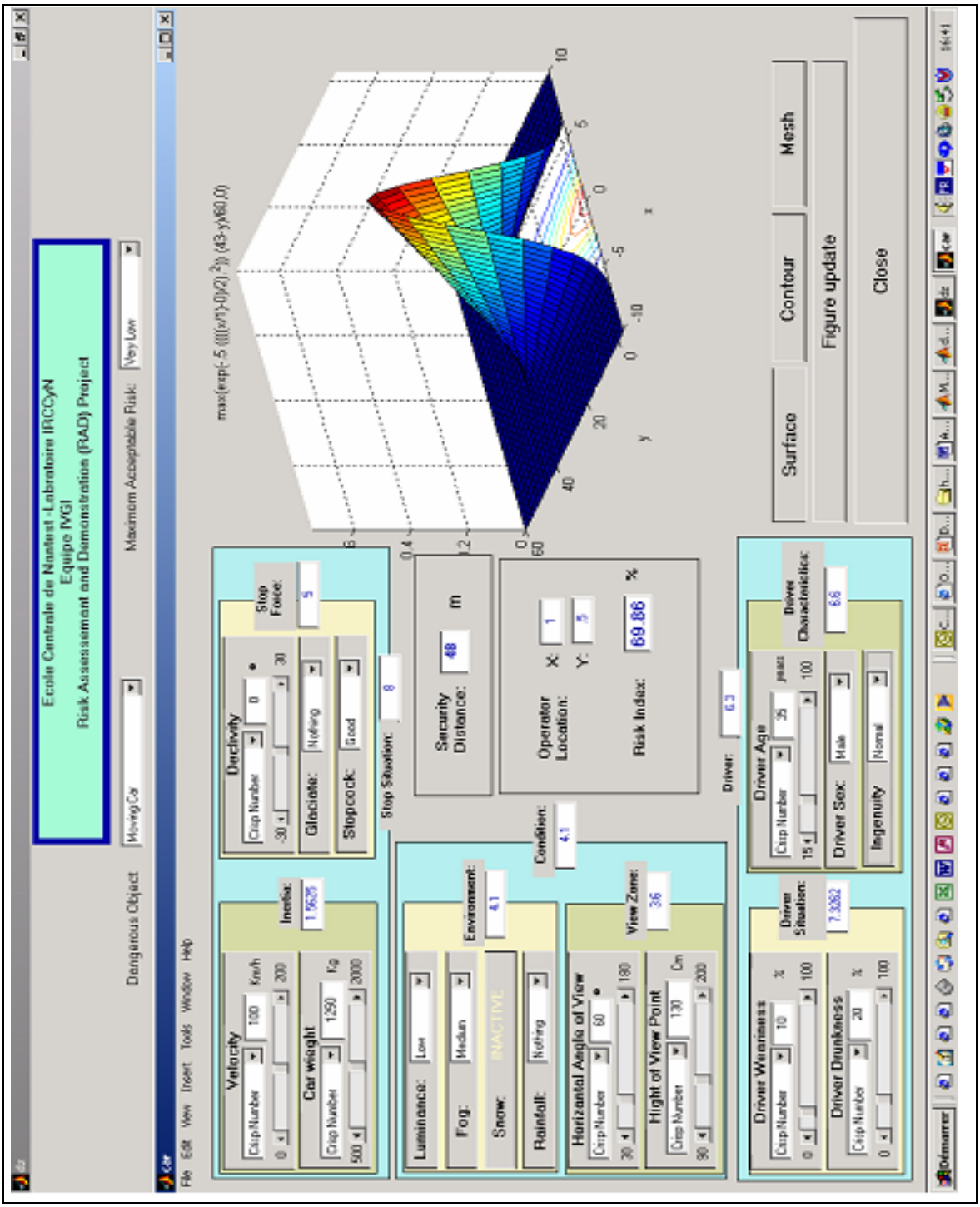


Figure 27. L'interface utilisateur avec le système d'inférence floue pour définir les paramètres de la zone dangereuse

1.3. L'effet de la probabilité dans la définition de la zone dangereuse

Comme exemple, nous considérons une zone dangereuse, selon la définition traditionnelle, autour d'un conducteur électrique à haute tension et nous estimons l'index de risque dans cette zone (figure 28). Pour évaluer le risque on doit évaluer la sévérité et la probabilité. Généralement, le calcul de l'index de risque est fondé sur quelques hypothèses implicites. Elles sont définies pour surmonter quelques défis, comme des données inachevées (et imprécises), de l'information incertaine, et des calculs lourds.

Une partie de ces simplifications est la considération d'un risque similaire pour tous les points dans la zone dangereuse. Par exemple, dans la figure 28, en passant de la distance de 5,0001 mètres vers la distance de 4,9999, les dangers semblent augmenter soudainement. Mais en

réalité, le risque augmente progressivement, comme on s'approche de l'objet dangereux. On a trouvé qu'en utilisant la définition de la zone dangereuse floue, ce problème sera résolu.
Mais le deuxième problème est de considérer la probabilité de risque pour les différentes situations (la température, l'humidité, etc. différents) ou pour les événements aléatoires.
Au moment d'appliquer les méthodes d'analyse de risque basées sur des scénarios, des caractéristiques des objets dangereux, des barrières et des cibles sont prédéfinies dans la définition de scénario. Ces définitions peuvent être représentées dans un arbre d'événements. Dans ce cas, à chaque simulation nous étudions une branche de l'arbre d'événements, en supposant que les événements dans la chaîne des événements correspondants sont certainement arrivés.

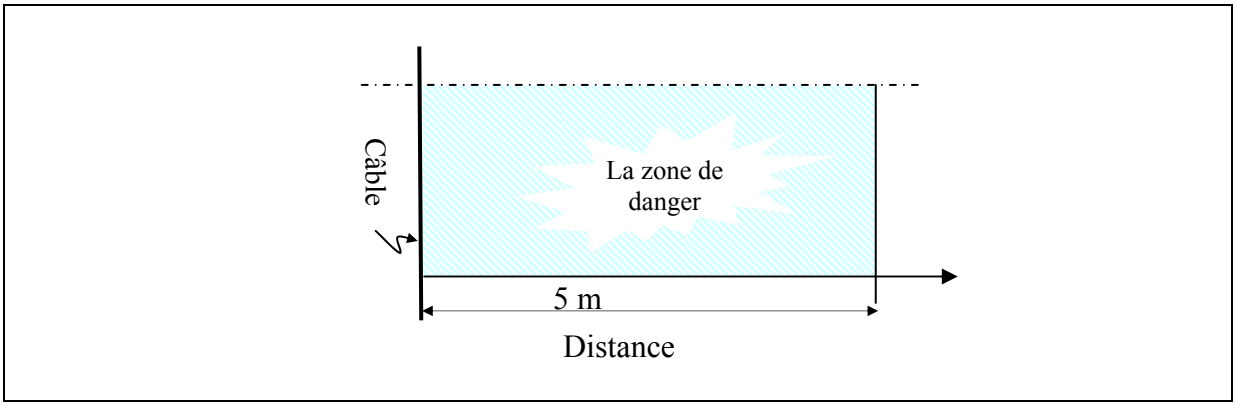


Figure 28. La zone dangereuse autour d'un conducteur d'électricité selon la définition traditionnelle

L'influence de la probabilité est donc réduite, et nous pouvons nous concentrer sur l'évaluation de la sévérité des accidents. Cette condition nous aide à séparer les concepts de « probabilité » et de « sévérité ».
Mais, si on voulait parler précisément, chaque zone dangereuse doit être déterminée pour un niveau de confiance prédéfini (par exemple $1-\alpha= 0.95$). Cela veut dire que la probabilité que la sévérité soit plus que ce que nous avons prévu est 0,05.
Cette définition est comparable avec les définitions des courbes de croissance normale de tailles des enfants qui sont tracées pour les niveaux de confiance de %75 et de %97. Pour dire qu'un enfant n'est pas normal, avec une confiance élevée, on considère la courbe de %97, mais pour un niveau de confiance modéré pour la décision, on considère la courbe de %75. On peut jouer de la même façon avec la zone dangereuse. Le choix du niveau de confiance dépend de la stratégie de direction pour avoir de bons compromis entre l'espérance de risque et le coût de prévention. Un concepteur conservateur choisit le niveau le plus élevé de confiance.
La figure 29 montre cette situation pour notre exemple.
Comme indicateur de l'incertitude dans la prévision, nous pouvons étudier l'intervalle de confiance pour le risque dans la zone dangereuse.
Sans information, l'évaluation de la sévérité d'un accident est incertaine et imprécise. Statistiquement, ceci signifie que l'intervalle de confiance est très vaste. Par exemple si nous ne savons pas la tension de l'électricité, et l'humidité de l'air, nous ne pouvons pas estimer exactement la sévérité d'une perte.

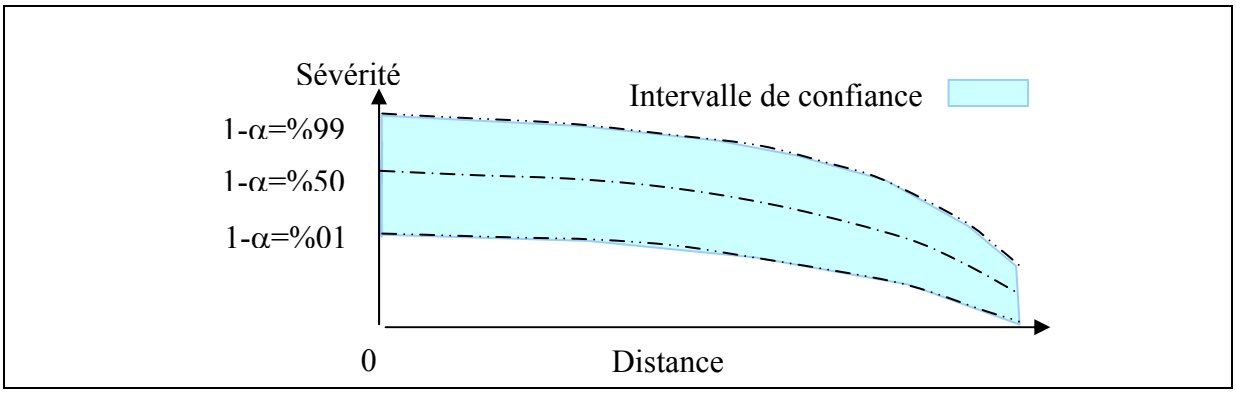


Figure 29. La démonstration de l'effet du niveau de confiance sur une zone dangereuse floue

Avec plus d'information, le risque peut être mieux évalué. Dans l'analyse de scenarii nous assumons que nous évaluons le risque correspondant des situations prédéfinies. Dans ce cas-ci nous considérons des caractéristiques précises pour l'objet, les barrières, et la cible de risque (voyez figure 30).

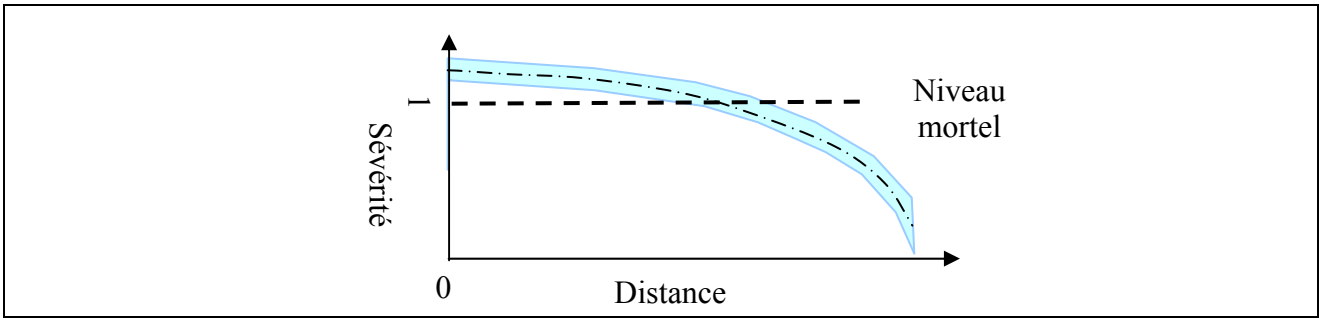


Figure 30. L'effet de la réduction d'incertitude sur la réduction de distance de la confiance

Idéalement, si nous avions toutes les informations reliées à tous les paramètres de la sévérité, nous aurions la même ligne pour la sévérité, dans tous les niveaux de confiance.
Aussi, si nous choisissons un niveau exact de confiance, nous aurons seulement une ligne pour définir la sévérité pour notre point de vue.
En plus, par simplicité, nous pouvons éliminer les sévérités au-dessus « du niveau mortel », en considérant ce niveau comme sévérité maximum possible. La figure 31 démontre le résultat final de notre discussion.

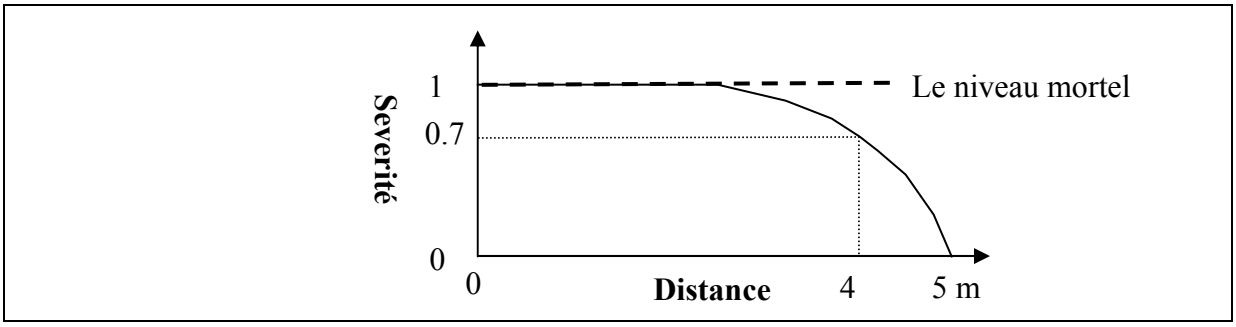


Figure 31. La zone dangereuse floue, sans considérer l'effet de probabilité

Par simplification, dans ce travail, nous ne considérons qu'une seule fonction d'appartenance pour la zone dangereuse, en supposant que nous sommes dans la certitude que toutes les informations sont exactes ou que nous avons fixé un niveau de confiance.
Pour les évènements aléatoires, nous choisissons un niveau qui convient à ce niveau de confiance. Dans ce cas, nous pouvons choisir le facteur de coefficient, lié à notre point de vue et à nos stratégies.

1.4. Intégrer les espaces flous

En utilisant les zones dangereuses floues, les effets accumulés de plusieurs objets dangereux et les effets de protection de barrières peuvent être considérés facilement.
Les propriétés complexes peuvent être construites en combinant les propriétés simples en utilisant des lois de composition.

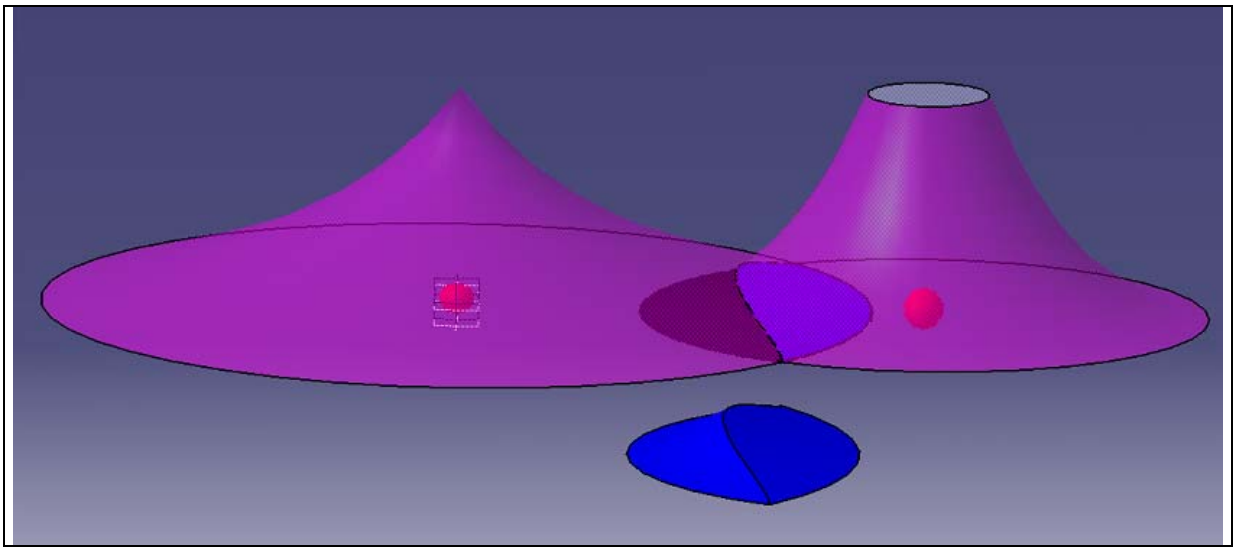


Figure 32. Une démonstration de l'intersection de deux zones de danger floues, en deux dimensions

La Figure 32 montre la façon de calculer l'espace commun entre deux zones dangereuses, en utilisant l'intersection de deux espaces flous. Cette méthode peut être appliquée pour trouver les régions avec plusieurs dangers, et surtout pour appliquer les effets de barrières en utilisant la négation floue.
La Figure 33 est une illustration de l'union de deux zones dangereuses, qui peut être appliquée pour calculer les risques de plusieurs sources de dangers.
Dans l'environnement 3D, le calcul de l'intersection et l'union floue peut être fait, facilement, en utilisant les opérations géométriques.
Ces simplifications réduisent le volume de calculs et fournissent la possibilité de créer des applications interactives correspondant aux changements de la situation de l'opérateur dans l'environnement. Ainsi la complexité du modèle sera réduite. Créer un espace dynamique est l'un des avantages les plus importants des applications de réalité virtuelle, et ce modèle permet de soutenir ces possibilités. De cette façon, on est capable de définir des caractéristiques observables et calculables de ZDs non-linéaires pour le temps discret, produit par les séquences de la simulation en 3D.

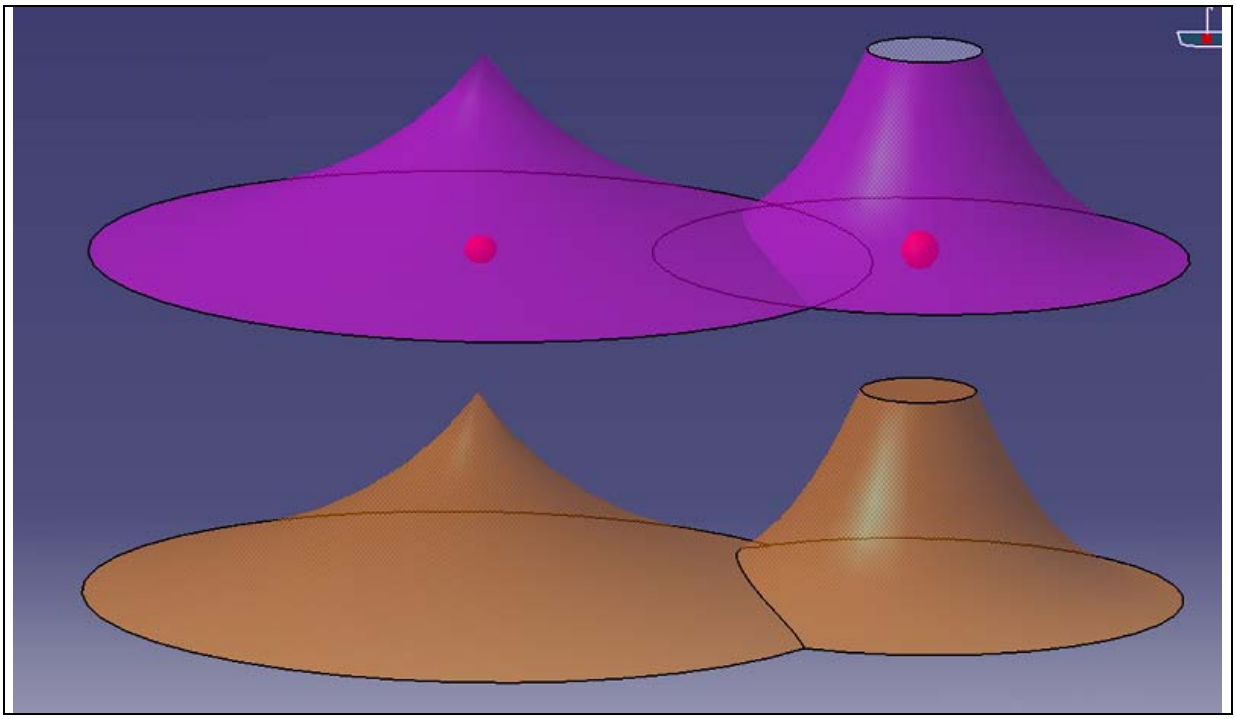


Figure 33. Une illustration de l'union de deux zones dangereuses, en deux dimensions

Des zones dangereuses floues se modifient selon des paramètres du système, et ceci pourrait augmenter l'exactitude, la flexibilité, et la compréhensibilité de la simulation.
La combinaison infinie des choix de fonctions d'appartenance et de propositions floues (Duan, 1999), permet à l'utilisateur de définir les zones dangereuses pour divers dangers.

1.5. Perspective de l'utilisation de la zone dangereuse floue dans la réalité virtuelle

Les zones dangereuses floues peuvent être représentées dans la situation de travail, comme des formes ou des surfaces semi–transparentes. En plus, pour donner impression de la présence de l'utilisateur dans la zone de danger, nous pouvons employer plusieurs indicateurs comme les indicateurs numériques, les effets sonores, la vibration ou le retour d'effort qui représente, à chaque fois, la valeur d'appartenance de la participation de l'utilisateur dans une zone dangereuse. D'autres cas possibles sont liés à la réalité augmentée. L'utilisateur peut porter les lunettes, qui indiquent l'index de risque lié à sa position, dans une situation de travail réel. Dans ce cas, nous aurons besoin : de capteurs pour déterminer la position de l'utilisateur, d'information d'environnement, et d'un système dynamique d'inférence formé pour permettre l'évaluation du danger.

2. Approche de l'impact de l'agent de danger

Cette section vise à développer une approche d'analyse de barrière, également présentée dans (Shahrokhi et al., 2006a), que l'on a adaptée à l'utilisation lors du processus de conception. Elle comprend un système d'information de risque et une approche de simulation de risque. Le module d'analyse de risque emploie les données du modèle de conception, pour fournir la possibilité d'examiner la sécurité des diverses configurations, dans la plate–forme de conception.
Pour la simplicité, ici nous essayons de modéliser les dangers qui peuvent menacer un opérateur dans un lieu de travail industriel.

Chaque partie d'une situation de travail, incluant : les solutions, les produits, les outils, les consommables, l'environnement ou l'humain peuvent être une source de danger pour un opérateur. On suppose qu'en utilisant des arbres d'événements, il est possible de calculer la probabilité de l'accident. Connaissant cette probabilité et la sévérité d'un accident, nous pouvons calculer l'index de risque d'accidents, qui est un indicateur de la perte prévue qui peut être produite par l'accident. Des index de risque peuvent être calculés statiquement, en analysant les arbres d'événements et les conséquences reliées d'accidents ou dynamiquement, selon la mesure instantanée de paramètres du système, lors d'une analyse de simulation. Un modèle dynamique peut décrire des phénomènes dans un système dans un temps discret, alors qu'un modèle statique décrit le système à un instant donné de temps et dans un état supposé d'équilibre (Chen, 2003).
Pour utiliser les résultats de simulations faites par ordinateur, on étudie un processus dynamique en le divisant à une série discrète de séquences statiques.
(Donald, 1998) explique comment un utilisateur typique d'ERGO, en utilisant cette méthode, peut produire des séquences de mouvement et puis évaluer les séquences pour évaluer des risques potentiels liés à chaque activité.
Il est supposé que la sévérité de l'accident soit une fonction des paramètres d'agent dangereux, de la vulnérabilité de la cible, et de la durée de l'exposition de la cible à l'agent dangereux. Pour calculer l'index de risque, en raison de la variation des agents dangereux sur les différents organes humains, nous sommes forcés de séparer ces effets pour chaque partie du corps humain. En connaissant les paramètres physiques et chimiques de l'agent nocif, les « facteurs de dommages » sont déterminés. Ils expliquent la conséquence de l'exposition de l'agent nocif à chaque partie du corps humain. Nous supposons que les dommages de cible sont une fonction linéaire de la durée d'exposition de la cible aux effets dangereux (on peut supprimer cette hypothèse en ajoutant des fonctions définissant les dommages). Par conséquent l'unité du facteur de dommages, est le pourcentage des dommages à l'organe d'humain, pour chaque unité de temps d'exposition (en seconde). Il y a des méthodes quantitatives pour évaluer les effets du contact avec les constituants chimiques et radioactifs pour chacun des organes humains (IAEA, 2004). Pour d'autres genres de sources de danger, ce facteur peut être calculé en employant la logique floue pour récapituler les avis d'experts.

2.1. Développement de scénario

Un scénario d'accident est une description d'une situation indésirable. Il contient des combinaisons d'événements ou des situations typiques et possibles (Khan et al., 1998).
Les scénarii décrivent des phases ou des modes de fonctionnement différents et des conditions typiques, comme des conditions dégradées, des états de secours etc. (ONR, 2000).
On propose un modèle pour analyser les scénarios, en modélisant l'accident comme un impact d'un agent nocif sur une cible.

2.2. Modéliser un accident comme une interaction danger–cible

Beaucoup de risques dans les situations de travail complexes sont produits par les mécanismes de transformation d'énergie (Trost et al., 2004).
On peut trouver une grande attention, dans les littératures scientifiques, pour expliquer l'accident par ce mécanisme.
(Khan et al., 1999) a listé les facteurs qui déterminent l'échelle des risques, produits par ces énergies, comme :

- L'amplitude,
- Le facteur d'énergie,
- Le facteur de temps,
- Les relations d'intensité et la distance,

- Le facteur d'exposition,
- Le rapport « intensité–dommages » (on l'appelle le facteur de danger).

Selon (De Dianous et al., 2006), la conséquence potentielle des phénomènes dangereux est définie par la sévérité de l'accident et la vulnérabilité de la cible, on peut analyser des attributs des agents dangereux et des cibles (victimes) afin d'évaluer les scénarios d'accidents.
(Labodova, 2003) a proposé une méthodologie pour analyser le risque, basée sur l'identification des sources du risque et des systèmes de cibles possibles et sur l'identification des actions possibles entre sources et cibles.
Selon (Ru et al., 1996), un risque peut donc être vu comme :

- Les effets nuisibles si une menace arrive,
- Les effets nuisibles si une vulnérabilité est exploitée.

Selon (PSA, 2005) les dommages se produisent quand un agent nocif entre en contact avec une personne ou des capitaux. (Greene, 2005) définit l'exposition comme la manière dont le destinataire probable du mal peut être influencé par le danger.

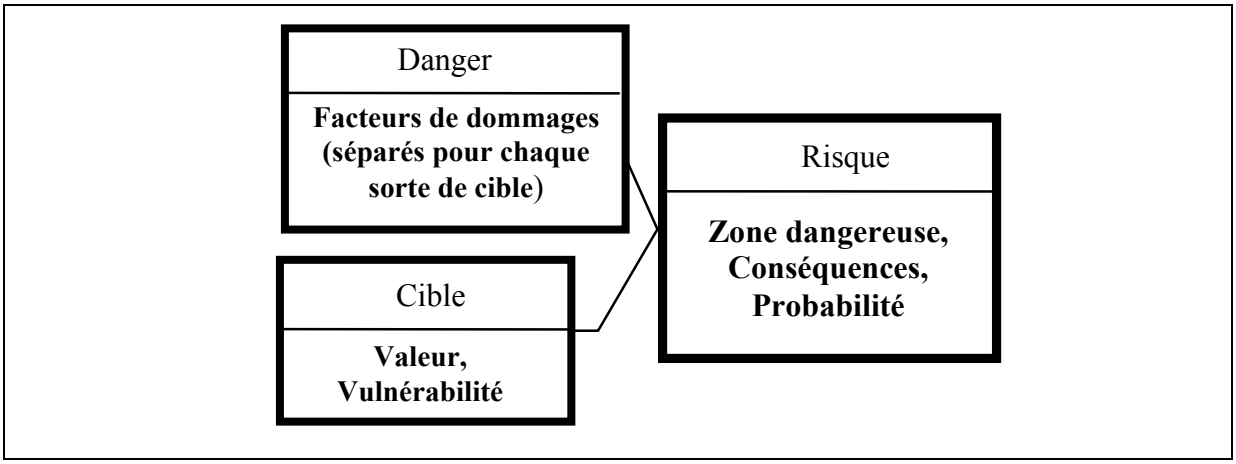


Figure 34. Méthode de calcul de l'index statique de risque

Selon (Gupta, 2002), le nombre d'accidents dépend de plusieurs paramètres, parmi eux, le taux et la durée du dégagement de l'agent nocif, des conditions d'environnement (par exemple climat), et de la densité de population dans la région affectée.
D'après (PSA, 2005), pour employer MORT, nous devons d'abord identifier les épisodes principaux dans la séquence d'opérations, caractérisées par :

- une cible vulnérable exposée à –
- un agent de mal dans –
- l'absence de barrières proportionnées.

La figure 34 montre notre façon de modéliser le risque à base des attributs du danger et de la cible (Shahrokhi et al., 2006b).

2.3. Facteur de dommage

Des tentatives ont été faites pendant longtemps pour trouver une manière générale d'exprimer le risque de sorte qu'on puisse comparer le risque entre différents types d'agents nocifs.
Un de ces efforts est représenté par les modèles d'ORCA et ComputerMan, exprimés par (ONR, 1998d), qui permettent à l'utilisateur d'évaluer les effets antipersonnel liés à divers mécanismes de dommages. Etant donné un niveau d'impact ou d'exposition, ORCA calcule des dommages anatomiques et l'effet sur la performance individuelle de l'exposition à l'énergie cinétique (fragment), thermique, produit chimique, laser et autres. L'effet des

dommages calculés est caractérisé par l'affaiblissement prévu de chacune de 24 possibilités élémentaires humaines (par exemple, vision, connaissance et résistance physique). ORCA fonctionne en utilisant un modèle anatomique identique. ComputerMan, cependant, traite seulement des dommages pénétrants, et sa sortie est limitée aux niveaux de la dégradation de performance et aux probabilités de survie.
D'après (Khan et al., 1998), la capacité de faire évaluer un agent nocif dépend des trois facteurs suivants :

- La nature du danger (l'inflammabilité, explosibilité ou toxicité),
- La quantité de matériel qui peut contribuer aux risques,
- La fréquence prévue du risque, en l'absence de mesures spéciales pour l'empêcher.

Cependant, développer un modèle général d'accident, comme un impact d'agent nocif sur une cible, exige de caractériser la capacité de créer des dommages par chaque agent nocif pour chaque sorte de cibles.
Dans le modèle qu'on va proposer, on suppose qu'une série d'attributs, nommés « les facteurs de dommages » caractérisent les effets indésirables de chaque agent nocif sur chaque genre de cibles. Dans le pire des cas, on peut utiliser un système d'inférence floue pour calculer ces attributs, à base des avis des experts.

2.4. Les modélisations dynamique et statique de risque

On suppose qu'un accident est une interaction entre un agent dangereux et une cible, et la sévérité d'un accident peut être caractérisée connaissant les attributs de danger, la vulnérabilité de cible, et le mode et la durée d'exposition.
L'entité « risque » décrit les risques qui peuvent être produits en exposant chaque cible à chaque agent nocif. L'entité de risque est introduite pour caractériser le risque pour chaque couple de risque–cible, selon la probabilité et la sévérité de l'accident.
Le facteur de dommages est un des attributs de cette entité, définit les pourcentages des effets préjudiciables de l'agent dangereux sur la cible, par unité de temps, pour une exposition directe (en l'absence de mesure de protection). Ce facteur est mesuré comme un nombre entre 0 (pour aucun effet nocif) et 1 (pour la destruction complète de la cible). Cet attribut est calculé en fonction des paramètres de risque, en employant les formules physiques ou des systèmes d'inférence flous. Pour faire une analyse quantitative, nous devons évaluer ce facteur pour toutes les cibles (y compris des humains) de préférence sur une échelle monétaire. Toutefois, il peut être préférable d'avoir des résultats plus précis dans beaucoup de cas, en représentant les relations temporelles non linéaires.
Un autre attribut d'entité de risque, la vulnérabilité de cible, est un indicateur entre 0 et 1, qui est employé pour mesurer les effets des barrières de protection. Assigner 1 à cet attribut indique une cible non protégée, et 0 présente une cible totalement protégée. Les nombres entre ces deux limites présentent le pourcentage de la vulnérabilité de la cible après la protection. Il faut noter que la vulnérabilité de cible est définie séparément pour chaque couple étudié de danger–cible.
Les dommages d'une cible sont mesurés par la réduction de sa valeur. La valeur de la cible indique l'importance absolue ou relative de la cible. (Gallego, 2004) présente l'"index d'importance" pour mesurer la valeur de la cible en considérant : (1) Valeur économique, (2) Valeur utile, (3) Valeur de bénéfice, et (4) Valeur de service.

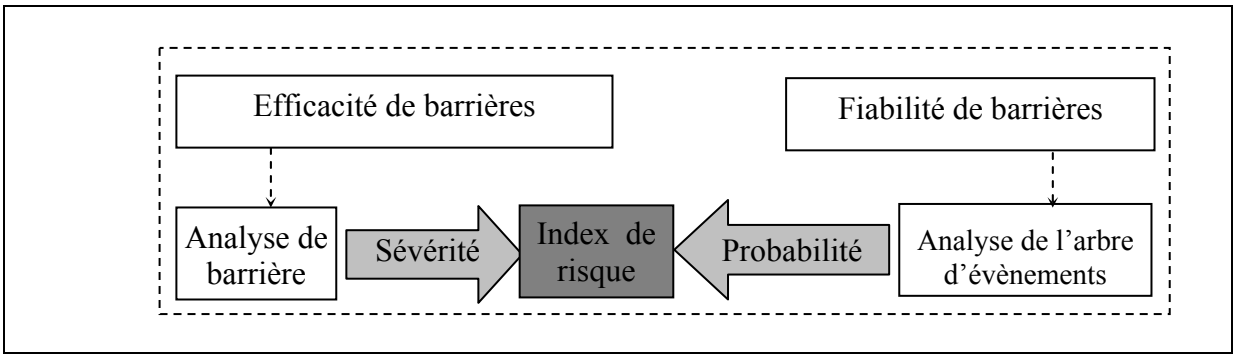


Figure 35. Calcul de l'index de risque basé sur l'arbre d'évènements et l'analyse de barrières (Shahrokhi et al., 2006d)

Des index de risque peuvent être calculés en mode de recherche, en analysant les arbres d'événements et leurs conséquences, ou en mode instantané, selon la mesure instantanée, lors d'une analyse de simulation de scénario. Une forme modifiée de l'arbre d'événements est associée à chacune des entités de risque pour calculer la probabilité de l'accident. Par l'analyse de l'arbre d'événements la fiabilité des barrières est prise en considération pour calculer les probabilités d'accidents, et l'efficacité de barrières est prise en compte pour calculer la sévérité d'accidents, par l'analyse de barrière (figure 35).
En mode statique, connaissant le facteur de dommages de risque, la vulnérabilité de cible, et la valeur de cible, la sévérité d'accidents est estimée (figure 36).

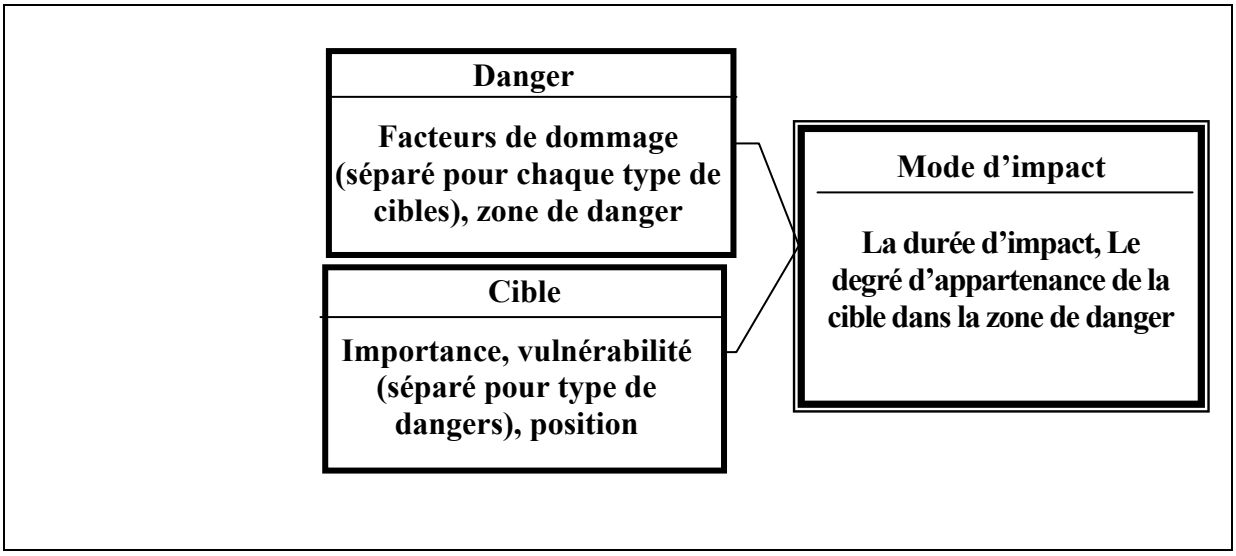


Figure 36. Les attributs des concepts "danger", "cible" et "mode d'impact" dans le mode instantané

En mode instantané, pour chaque séquence de simulation, un index de risque est calculé séparément, selon la position et les caractéristiques de l'agent nocif et de la cible. Une zone dangereuse, dans la forme de l'espace flou, est alors associée à chaque risque. Cet ensemble flou décrit la distribution géographique de l'agent dangereux dans le lieu de travail (figure 37). Toutes les zones dangereuses sont normalisées pour couvrir le degré d'appartenance dans l'intervalle [0,1]. Ceci facilite l'association de plusieurs risques à une zone dangereuse. En mode instantané, le facteur de dommages de risque est multiplié par le degré d'appartenance de la présence de la cible dans la zone dangereuse.

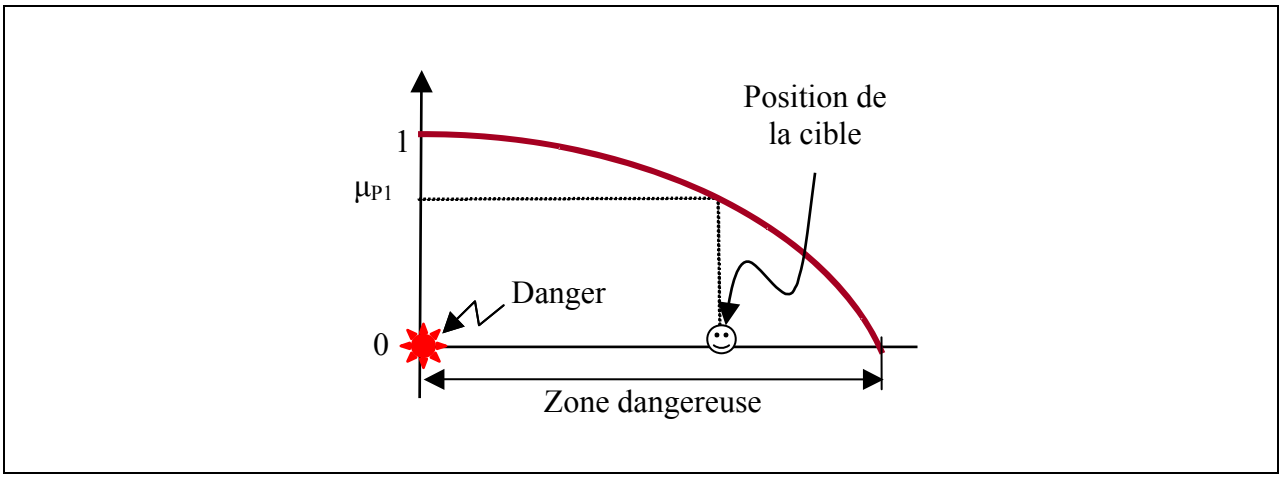


Figure 37. Calcul de degré d'appartenance d'une cible dans la zone dangereuse

La probabilité de risque est calculée par l'analyse des arbres d'événements, qui sont associés aux risques. Les barrières de probabilité modifient la probabilité de risque en ajoutant des barrières d'événements.
Pour des humains, dans beaucoup de cas, les risques ont différents effets sur les différents organes de corps, par exemple le rayonnement radioactif est plus dangereux pour les yeux que pour les mains. Nous considérons les organes du corps de l'opérateur comme des cibles, et pour chaque organe, l'index de risque peut être calculé selon des facteurs de l'importance de l'organe et de sa vulnérabilité, et de sa distance à la source de danger, séparément. Une simulation est combinée de plusieurs séquences, et des index de risque pour chaque séquence sont calculés, séparément. L'accumulation de tous les index de risque de séquences, tenant compte des temps de séquences fournit l'index de risque total de l'activité. Par conséquent, considérant seulement une source d'énergie, pour la séquence k, avec la durée du t_k nous aurons :

$$\xi_k = t_k \sum_x \sum_i \xi_{kxi}$$

Là où ζ_k est l'index de risque de séquence k, et ζ_{kxi}, est l'index du risque d'agent nocif i pour la cible X, dans la séquence k.
Nous supposons avoir fixé la probabilité et la sévérité de risque pendant la séquence qui peut être acceptable dans des temps suffisamment petits de la séquence de simulation. L'index de risque pour chaque séquence (ζ_{kxi}) est calculé par des index cumulant de risque de toutes les paires de cible /risque. Il peut être calculé en multipliant la probabilité et la sévérité de risque. Nous pouvons développer cette relation pour le risque i comme :

$$\xi_{kxi} = P_{ki} E_k \mu_{kxi} \phi_x \delta_{xi}$$

L'analyse d'arbre d'événements fournit les P_{ki}, qui sont la probabilité que la situation simulée se produise. E_k est la quantité d'énergie de la source de danger, et le μ_{kxi} est le degré de présence de la cible x dans la zone dangereuse, correspondant au risque i. Φx est le facteur d'importance de la cible X, et δxi représente sa sensibilité liée au risque i. Évidemment, parfois les risques ne correspondent pas à un espace limité ou un objet dangereux donc il n'est pas nécessaire de leur assigner une zone spéciale. Dans ces cas nous pouvons simplifier le

modèle en assignant le degré d'appartenance de 1 à tous les points du lieu de travail. Dans ce cas-ci nous aurons un modèle classique d'analyse d'énergie.
Dans le mode instantané, en plus des barrières qui sont introduites en mode statique, les barrières de la zone dangereuse sont présentées. Ces barrières protègent quelques régions du lieu de travail contre l'agent nocif. En coupant les espaces flous, ces barrières réduisent les degrés d'appartenance de points du lieu de travail dans les zones dangereuses.

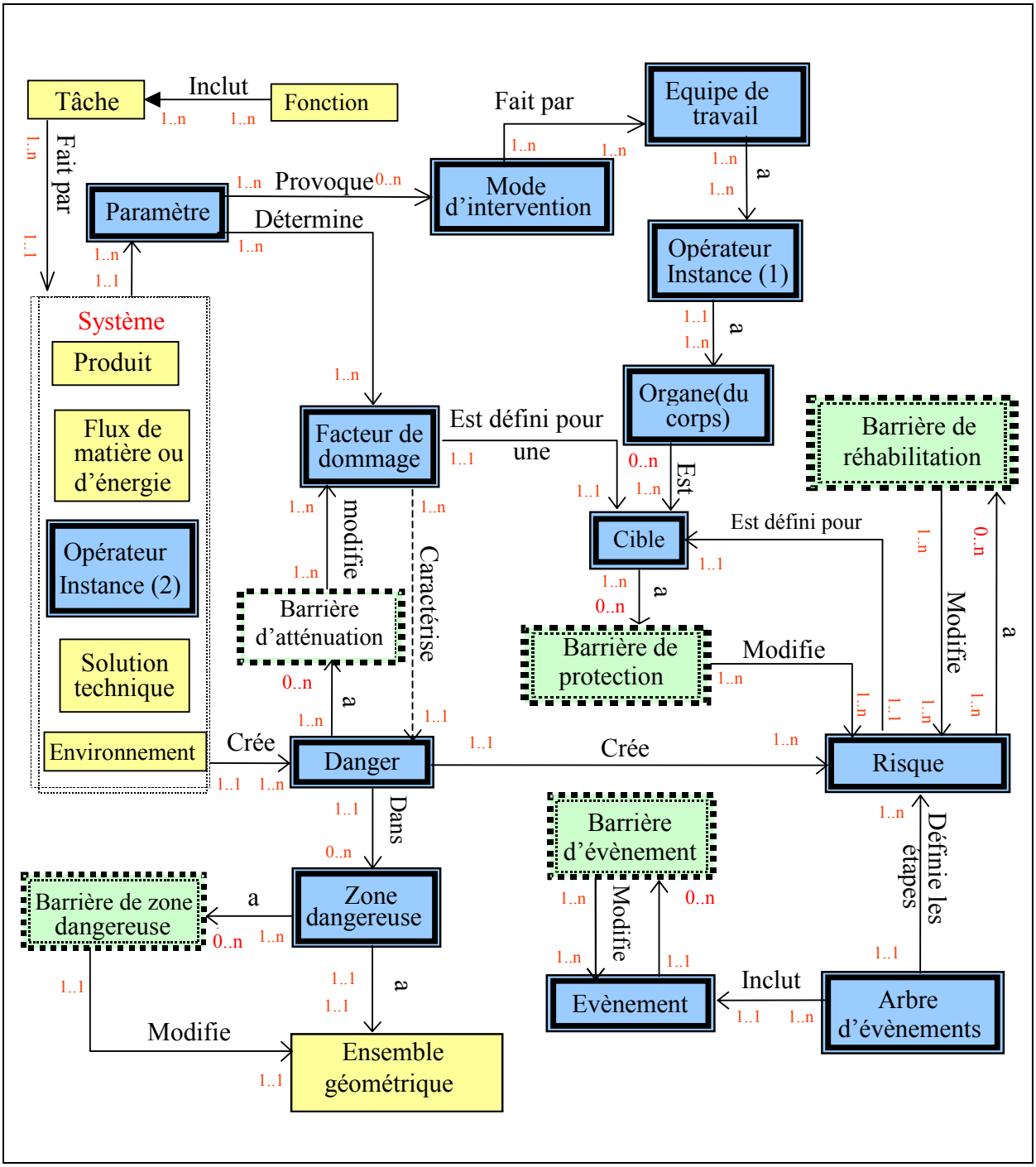


Figure 38. **Diagramme de classes du modèle**

Basé sur le modèle présenté sur la figure 38 et en utilisant Visual Basic, nous avons établi un module d'analyse de sécurité dans la plate–forme de DELMIA pour analyser les risques

professionnels pour des humains. En utilisant l'ordinateur pour simuler le lieu de travail, le facteur de dommages de risque, la vulnérabilité de cible, et la zone dangereuse pour chaque séquence de simulation sont calculés séparément. Les profils géométriques transparents sont employés pour montrer les zones dangereuses floues lors de la simulation tridimensionnelle du lieu de travail. En utilisant l'ordinateur pour simuler un cycle de production, la position de chaque partie du corps de l'opérateur (par exemple la tête, la main etc...) peut être calculée, à chaque étape de la simulation. Ayant cette position, le degré d'appartenance de la présence de la cible dans les zones dangereuses pour chaque organe du corps de l'opérateur est calculé. À chaque moment, la sévérité du risque pour une partie du corps humain dépend de sa position, de la nocivité de la source de danger (qui est expliquée par ses facteurs de dommages), et de la vulnérabilité des organes liés aux effets dangereux (voir la figure 15).
Les index de risque sont évalués pour différentes configurations de disposition du lieu de travail en associant les formes géométriques aux barrières et aux zones dangereuses.
La figure 38 présente le diagramme de classes du modèle informatique utilisé pour développer les entités de risque. Cette figure illustre les relations entre les dangers, les zones dangereuses, les cibles (les organes du corps humain) et les barrières correspondantes (voir la section 3.5 de partie III).
Dans ce cas les évaluations et créations de zones dangereuses sont effectuées en adaptant les attributs du système simulé. Cela signifie que le changement de processus ou les modes de fonctionnement du système, et même les dysfonctionnements, peuvent être considérés pour calculer l'index de risque lors d'un mouvement simultané de l'opérateur et de l'objet dangereux. D'autre part, en utilisant les interfaces interactives, on peut également calculer l'index de risque pour un opérateur réel par rapport à ses réactions.
Cette approche adaptative donne un aspect dynamique aux méthodes conventionnelles (figure 39).

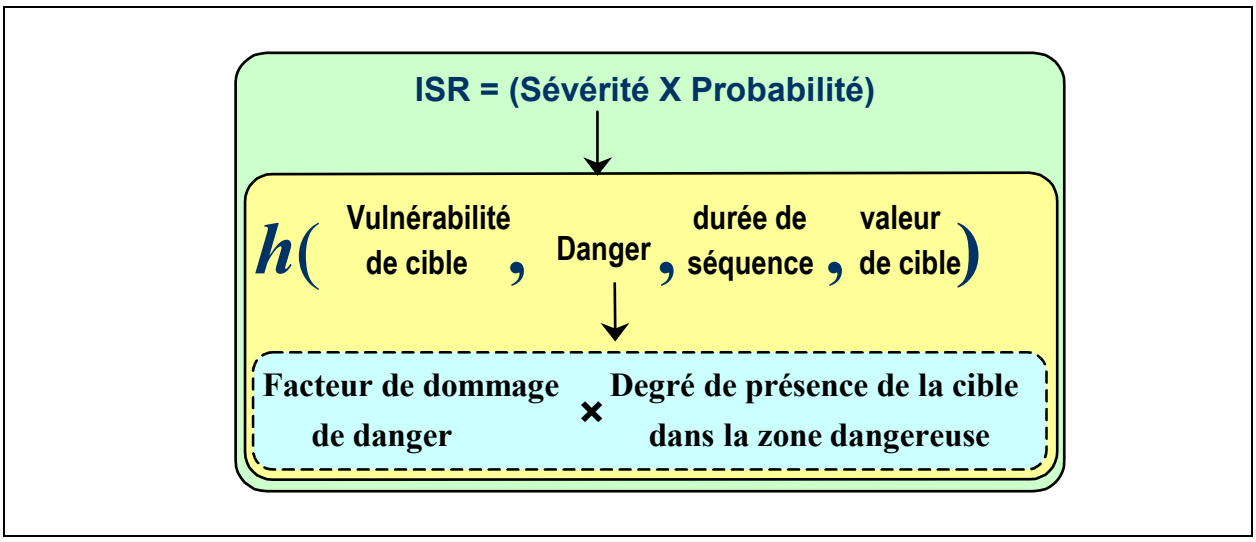


Figure 39. La méthode de calcul de risque en cours de simulation tridimensionnelle

2.5. Modélisation de barrières

Les barrières sont toutes les mesures de sécurité qui sont développées pour empêcher ou atténuer les accidents.
(Trost et al., 2004) représente le travail de Haddon sur les différentes mesures ou barrières utilisées pour contrôler les effets nocifs du transfert d'énergie, comme suit :

(a) Prévenir la création (ne pas produire ou ne pas fabriquer d'énergie),
(b) Réduire la quantité, par exemple, les tensions, le stockage de carburant,
(c) Empêcher le dégagement (force de retenue d'énergie),
(d) Modifier le taux de dégagement, par exemple, ralentir le taux de chauffe, la vitesse,
(e) Séparer dans l'espace ou le temps, par exemple, les lignes électriques hors de portée,
(f) Interposer les obstacles matériels, par exemple, l'isolation, les verres de sécurité,
(g) Modifier des surfaces de concentration de choc, par exemple, arrondir des arêtes vives,
(h) Renforcer la cible, par exemple, renforcer les structures contre les tremblements de terre,
(i) Limiter les dommages, par exemple, avertir et agir rapidement,
(j) Remettre en état la personne et les objets

Dans le modèle de l'impact, présenté ici, nous avons modélisé ces rôles en modifiant les caractéristiques de l'agent dangereux, de la zone dangereuse, de la cible ou des paramètres nocifs du contact entre le risque et la cible. Ils peuvent également directement commander et atténuer les conséquences d'un accident produit (voir les figures 40 et 41). Cette classification nous permet d'appliquer les effets de barrières sur les entités de risques. Par conséquent ils peuvent avoir différents effets protecteurs, préventifs, et/ou des effets d'atténuation. Évidemment, il y a quelques types de barrières qui jouent plusieurs de ces rôles en même temps. Par exemple un mur protecteur peut jouer le rôle « d'une barrière de zone dangereuse » en arrêtant l'énergie dangereuse, et en même temps peut jouer le rôle d'une « barrière d'événement », qui réduit la probabilité de la présence de l'humain dans la zone dangereuse.

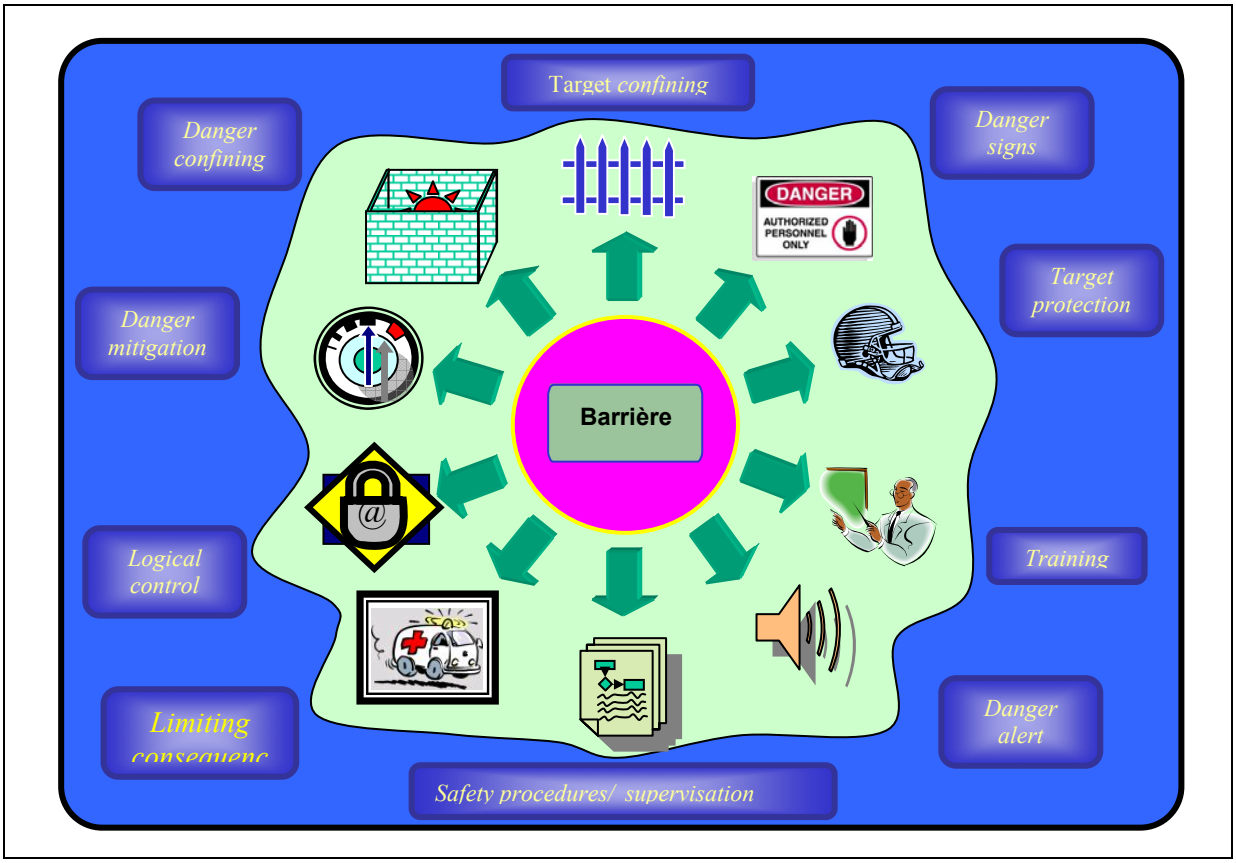


Figure 40. Une représentation schématique de la variété de barrières

L'avantage de ce modèle est sa flexibilité de modélisation pour les différents types de barrières, et la possibilité de l'intégration du modèle dans l'application de conception de SDT.

De cette façon, l'association de la forme géométrique des barrières avec le risque peut être analysée selon la modification de disposition du lieu de travail, et les franchissements d'une barrière relative à une zone dangereuse peuvent être étudiés à partir de la définition de chaque zone dangereuse par un profil géométrique modélisé par un espace flou. Les barrières, selon leurs rôles de protection, sont classifiées dans six catégories :

- Les barrières d'événement, qui réduisent la probabilité des événements dangereux,
- Les barrières de contrôle, qui réduisent l'amplitude du risque (facteur de dommages),
- Les barrières de protection, qui réduisent la vulnérabilité de la cible,
- Les barrières de zone de danger qui réduisent le degré d'appartenance,
- Les procédures de sécurité qui changent les durés d'exposition au danger de la cible,
- Les barrières de réhabilitation, qui réduisent directement la sévérité des accidents.

Dans ce modèle tous les effets de barrières sont traduits en tant qu'ajout de barrières ou de modifications des attributs des entités de risque. Pour chaque type de barrière, plusieurs méthodes de modélisation sont proposées, le choix dépend du genre d'analyse qui est prévue et de l'effet des barrières sur le système. Ajouter les barrières de sévérité et de probabilité fournit la possibilité d'évaluer leur efficacité en comparant la sécurité du système, avec et sans elles. Une barrière peut avoir plusieurs effets, en même temps.

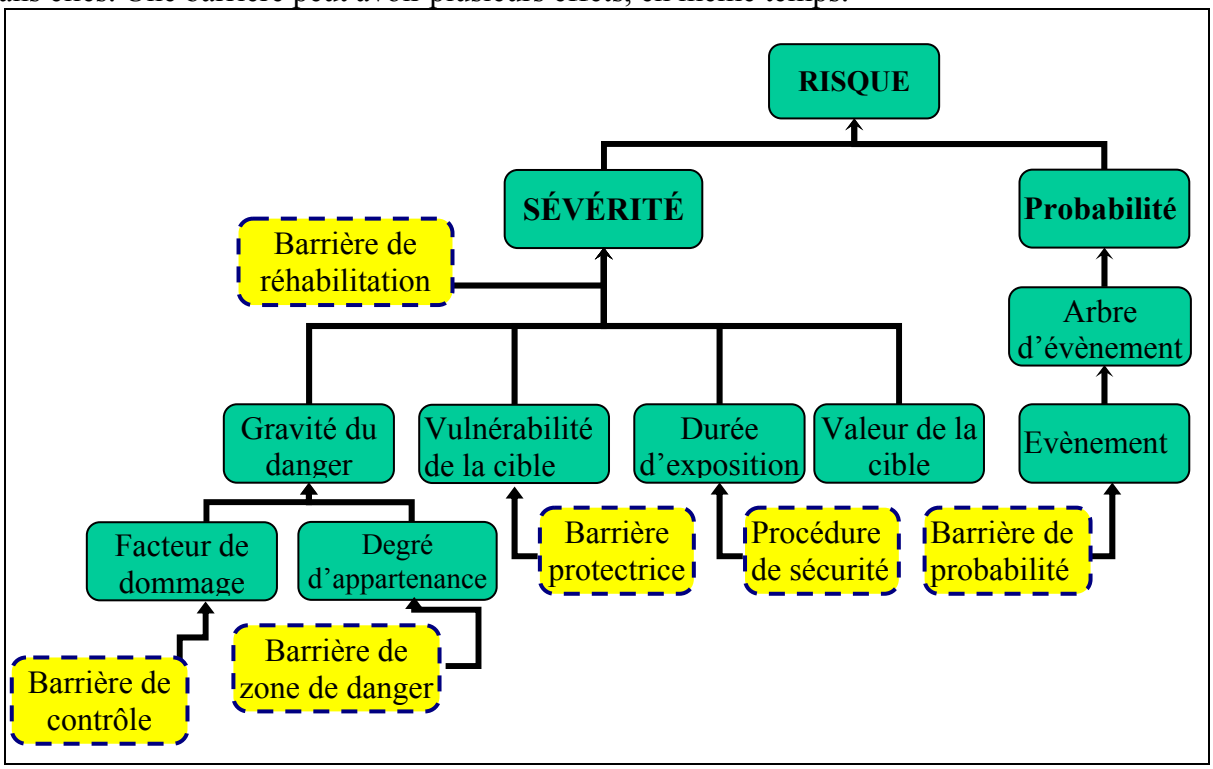


Figure 41. Séparation des effets de barrières en analyse de risque

EXEMPLE

Un exemple d'analyse de risque de radiation par source radioactive pour un travailleur peut bien montrer les processus d'analyse. Les principes utilisés pour cet exemple sont extraits de (UOF, 2000). Le cas concerne la sécurité dans les travaux avec usage de substances radioactives dans les laboratoires universitaires. Pour analyser le risque de radiation, on doit modéliser les paramètres de la source d'énergie, la cible, et le mode d'exposition. Le « Facteur de Qualité (FQ) » normalise les effets de radiations qui sont émis par les différentes matières. Par exemple, ce facteur pour les rayons gamma est 1, et pour les particules alpha, 20, ce qui démontre que la particule alpha est potentiellement 20 fois plus dangereuse pour le

corps humain que le rayon gamma. Le calcul de la dose équivalente (par unité « rem ») est obtenu en multipliant la dose absorbée (par unité « rad »). Rad est une unité de radiation qui se définit par l'énergie absorbée par unité de masse. Pour un travailleur normal, la radiation absorbée pendant un travail de routine pour l'ensemble de son corps doit être inférieure à 5 rem/an. Les mains, les pieds, la peau, ou un organe pris séparément, peuvent supporter des radiations jusqu'à 50 rem/an, mais la limite pour les yeux est 15 rem/an. Il y a une relation linéaire entre le temps d'exposition et la radiation. Mais l'effet de distance est bien plus important, et la gravité diminue de manière proportionnelle au carré de la distance et en fonction des matières dans l'environnement. D'autre part, l'énergie initiale de la source de radiation diminue au cours du temps à cause de la perte d'énergie, de manière exponentielle. La durée d'affaiblissement peut être de quelques minutes ou quelques milliards d'années. Si c'est atténuation est rapide, elle doit être considérée en utilisant la formule :

$$A(t)= A_0 e^{-\lambda t}$$

A est l'activité de radiation en fonction du temps, A_0 est l'activité initiale, et λ est la constante de matière. Les barrières peuvent être les boucliers, les vêtements, les détecteurs, les signes de dangers, la formation etc. Chacune a une fiabilité et une efficacité. En plus, elles peuvent empêcher la libération de rayonnement dans la SDT, protéger une partie de la SDT du rayonnement, protéger une partie ou toutes les parties du corps de l'opérateur ou séparer l'opérateur de la source d'énergie dans l'espace ou le temps. Les mesures d'urgence, qui sont mises en place pour soigner les personnes contaminées ou pour éviter de développement de la contamination à d'autres personnes, doivent aussi être considérées. Modéliser les effets de tous ces paramètres et barrières (voir table 2) doit être fait en séparant chaque paramètre par rapport à l'intensité d'énergie, la vulnérabilité de l'opérateur et le mode d'exposition du corps de l'opérateur aux radiations.

Table 2. Méthode de modélisation des paramètres de l'exemple 1

Paramètre	Méthode de modélisation
Distance entre l'organe du corps de l'opérateur et la source de radiation	La définition de la zone dangereuse en considérant la dégénérescence d'énergie par rapport à la distance et calcul du degré d'appartenance de l'organe dans la zone dangereuse produite par la source de radiation
Différence de l'effet de la radiation sur des organes différents	Différence entre les facteurs de dommages de rayonnements pour les organes différents
Effet du temps d'exposition	Cumul des index de risque pour les séquences de travail, en considérant la durée des séquences en multipliant par le nombre de cycles de répétition de l'activité par an
Atténuation d'énergie, au cours de temps	La diminution dynamique des facteurs de dommage ou de la zone dangereuse
Utilisation des boucliers autour de la source de radiation	Couper la zone dangereuse
Protections individuelles	Modifier la vulnérabilité des organes de l'opérateur concerné
Barrières plus fiables	(1) Appliquer les probabilités de casser les barrières dans l'arbre d'événements et (2) simuler le cas de barrières pour estimer les conséquences sur les doses absorbées
Mesures d'urgence	Diminuer la sévérité des risques en considérant les mesures d'urgence

2.6. Discussion sur l'approche impact de l'agent de danger

Un modèle géométrique est développé dans la plate-forme de DELMIA pour simuler une partie de l'opération et de l'entretien d'un centre nucléaire supposé. Notre objectif était d'évaluer l'applicabilité du modèle par le processus de conception.
Les arbres d'événements sont associés aux risques, et une macro en Visual Basic est développée pour calculer les effets de barrières et les index de risque basés sur la structure arborescente d'événements. Dans nos expériences nous avions les zones dangereuses pour simuler l'écoulement d'énergie des matériaux radioactifs et nous avons mesuré les distances entre les sept organes importants du corps de l'opérateur aux sources d'énergie. Ces distances sont employées pour calculer le degré d'appartenance de la présence de chacun de ces organes dans les zones dangereuses.
Nous avons examiné les possibilités de modèles pour modéliser diverses situations. Ils sont particulièrement adaptés pour modéliser les effets protecteurs de diverses barrières. Définir en outre des zones dangereuses comme espaces flous sur la base d'un critère d'énergie, zones qui sont montrées par des formes semi–transparentes, fournit une bonne perception des dangers par la simulation du procédé de production. Ceci peut être utile dans la formation et fournir un outil multidisciplinaire de communication.
Nos expériences ont montré que cette approche est capable de modéliser les effets de protection de barrières. Cependant, des études supplémentaires sont nécessaires pour prouver son applicabilité dans un vrai environnement de conception. En particulier, l'applicabilité des « facteurs de dommages » comme mesure universelle de risque devrait être prouvée pour différents risques. Le système d'inférence floue est une méthode générale de calcul qui peut être employée pour calculer le facteur de dommages. Toutefois, si on utilise la logique floue, le résultat dépend considérablement de la définition des fonctions d'appartenance, des méthodes d'inférence et de défuzzification, et l'évaluation des résultats est très difficile.
En mode instantané, on suppose que l'augmentation des dommages est une fonction linéaire du temps d'exposition, ce qui, généralement, n'est pas exact. Calculer les dommages exacts exige de définir des modèles compliqués, qui emploient une grande quantité d'information. Employer les systèmes d'inférence floue peut faciliter ce problème.
Dans ce travail, nous supposons que la quantité des dommages est une fonction linéaire du temps d'exposition, ce qui n'est pas toujours exact. En définissant le facteur de dommages comme fonction temporelle, nous pouvons cumuler les effets et mettre en place des indicateurs statistiques et dynamiques qui soient compatibles avec les contraintes d'une simulation en temps réel de situations de travail sur la plate–forme de conception de situations de travail sur laquelle nous travaillons. Toutefois, dans certains cas, cela reste un processus compliqué, et nous ne disposons pas toujours d'information accessible pour la validation de l'approche. L'utilisation d'un système d'inférence floue reste une solution intéressante pour la définition des différents modèles et des fonctions à manipuler.

3. L'intégration des modèles des entités de risque dans le modèle de la situation de travail

Actuellement des approches sur ordinateur sont employées pour concevoir les situations de travail complexes. Toutefois, indépendamment de l'importance de l'analyse de sécurité lors du processus de conception, ces approches ne fournissent pas une perception valide du risque. Pour choisir des solutions sûres et productives, les concepteurs ont besoin de la vérification systématique de sécurité pendant la conception.
Nous croyons que la construction d'un système de données d'entités de risque dans la plate-forme de conception peut être utile en remplissant cette condition. Nous avons développé une structure d'entités comme le danger, les zones dangereuses, le risque, les événements

dangereux et les barrières dans un système d'information de risque sous le titre de la structure d'entités de risque.
La conception du lieu de travail industriel peut impliquer la création de certaines de ces entités. La construction du système d'information de risque, parallèlement au développant de plans, permet à des concepteurs d'identifier les points faibles de sécurité le plus tôt possible.
Ce travail constitue une partie des efforts au sujet du développement d'un modèle d'analyse de risque, présenté dans (Shahrokhi et al., 2005b), pour l'appliquer lors du processus de conception. En particulier, il présente une nouvelle structure pour l'arbre d'événements et une méthode pour intégrer les barrières dans cette structure. Cette approche vise à fournir un modèle de barrière à intégrer dans l'application de conception de SDT. Nous avons examiné ce modèle par développer une boîte à outils incorporée dans DELMIA, un des systèmes les plus utilisés pour l'Ingénierie de Production Assistée par Ordinateur.

3.1. Les concepts de bases

Les fonctions de sécurité sont mises en place pour empêcher des accidents. Un accident est une séquence d'évènements fortuite menant aux conséquences indésirables réelles (Määttä, 2003). Ces événements sont une chaîne d'échecs, de défauts, de dysfonctionnements et d'erreurs (Hollnagel, 1999). Nous voudrions éliminer les accidents, mais généralement nous ne pouvons pas. Par conséquent nous essayons d'identifier et d'évaluer leurs risques afin de les éliminer ou de les diminuer à un niveau acceptable en ajoutant des mesures préventives, des barrières. Les barrières sont les dispositifs matériels, commandes administratives et signes d'alertes employés pour réduire le risque en fournissant une intervention physique (par exemple, un garde-fou) ou la séparation dans le temps ou l'espace (NASA, 2003). Ils doivent suffisamment réduire le risque, et ils ne doivent être faciles à défaire ou détourner, et ils ne doivent pas présenter de nouveaux risques, ne doivent pas empêcher le travail (Turner et al., 2003). Les barrières doivent non seulement assurer l'exploitation sûre, dans la situation normale, mais le système doit continuer à fonctionner sans risque, quand les changements se produisent (Leveson, 2004). Analyser le risque est nécessaire pour garantir la sécurité dans tout le cycle de vie du système et dans diverses situations. L'analyse de risque est une procédure systématique pour identifier et évaluer des risques et des caractéristiques de sécurité (Harms-Ringdahl, 2003a). L'analyse de risque a besoin d'une quantité considérable d'information et d'effort, et les avantages ne peuvent pas être entièrement visualisés à moins de faire une analyse compliquée. L'objectif de l'analyse de risque est d'évaluer des risques afin de choisir les meilleures configurations pour le système et les mesures de sauvegarde appropriées (Smith, 2003). Il y a de nombreuses techniques d'analyse de risque. Dans ce travail, les concepts des approches d'analyse d'énergie, d'analyse de barrières et d'analyse d'arbre d'événements sont utilisés, pour développer un système d'analyse intégré. L'analyse d'arbre d'événements est appliquée dans l'analyse des scénarios d'accidents qui suivent la succession des événements physiques et du comportement humain (Kjellén et al., 1995). En utilisant une structure arborescente, le concepteur analyse diverses combinaisons d'événements et estime leurs conséquences. Cette analyse est basée sur la définition d'un événement comme occurrence en temps réel décrivant une action discrète, typiquement une erreur, un échec, un défaut de fonctionnement ou des phénomènes naturels (NASA, 2003). L'analyse d'énergie est employée pour déterminer des sources de danger et des effets de barrières et pour estimer l'énergie qui peut être absorbée par une cible. Une analyse d'énergie a une résolution au niveau bas, mais elle dépend de l'information à un niveau relativement brut et peut être exécutée dans la phase amont de projet (Kjellén et al., 1995).
L'analyse de barrières est le processus de choix, d'optimisation et de vérification des barrières (Kjellén et al., 1995), et qui sert à déterminer comment ces barrières ou commandes peuvent échouer.

3.2. Analyse de sécurité par ordinateur

Les applications informatiques fournissent une plate-forme de conception multidisciplinaire, pour analyser et examiner les systèmes de production et les prototypes industriels. L'ordinateur aide à construire les modèles conventionnels de sécurité, à simuler les scénarios d'accidents, et à estimer les dommages potentiels (Khan et al., 2000).
D'autre part, la réalité virtuelle est employée avec succès pour la conception et l'examen des prototypes virtuels pour évaluer leurs paramètres de sécurité et pour la formation à la sécurité (Määttä, 2003). Ils fournissent des informations liées aux risques mécaniques tels que l'écrasement, le cisaillement et l'impact. En particulier, des modèles d'humains numériques sont appliqués pour identifier les risques mécaniques, et des désordres biomécaniques et pour évaluer des paramètres ergonomiques. De la même façon que l'évaluation des risques pendant l'étape de conception n'a pas attiré une attention appropriée (Khan et al., 1998), nous pouvons avoir la même réflexion sur le développement des approches de conception assistée par ordinateur. Ceci signifie que l'analyse de sécurité dans les applications de conception est réellement limitée à l'évaluation du lieu de travail simulé, et à analyser les scénarios d'accidents. De cette façon, il faut travailler plus, pour développer de nouvelles techniques d'analyse de risque dans la plate–forme de réalité virtuelle (Shimizu et al., 2003).
Récemment les efforts pour appliquer les approches d'analyse de risque dans les applications de conception assistée par ordinateur ont augmenté. (Van Houten et al., 2005) présente les équipements qui sont fournis en employant l'environnement virtuel et les prototypes numériques pour l'analyse de FMEA pendant le processus de conception. Un modèle automatisé est illustré dans (Bernard, 2002) afin de tenir compte des conditions de sécurité humaine, par le processus de conception.
(Giannini et al., 2003) présente une méthode automatisée pour effectuer l'analyse de HAZOP, développée comme application de CATIA, en employant le langage de programmation Visual Basic, et en employant Access pour développer la base de données.

3.3. Le modèle des entités de risques

Nous introduisons une approche pour intégrer des entités de risque dans un modèle général des entités PPR (produit, processus et ressources).
Pour définir ce modèle nous avons utilisé l'arbre de spécification du logiciel DELMIA. Les entités de produit, ressource et processus déterminent la structure de la situation de travail. Pour faire une analyse de risque lors de la conception, nous avons aussi défini les entités de risque suivantes : zones dangereuses, risques, événements dangereux, barrières et cibles sous forme de structures hiérarchiques. Ces entités peuvent être associées à chacun des produits ou ressources dans chaque étape des processus.
Ce modèle permet de définir les zones dangereuses dynamiques autour de l'objet dangereux. En utilisant ce modèle on peut simuler la SDT, par ordinateur, pour calculer l'indice de risque dans chaque étape du processus. Lors de la simulation, cet indice peut être calculé en fonction de la distance entre la cible (opérateur ou une partie de son corps) et l'objet dangereux.
En utilisant cette approche, le concepteur peut directement évaluer les conséquences de ses choix d'alternatives sur le risque professionnel total du projet.
L'objectif de ce travail est de montrer les relations entre les causes, les déviations (ou les évènements dangereux), et les conséquences, sous une forme applicable et compréhensible, pour faire des études multidisciplinaires lors de la conception. Pour développer le système d'information de risque, nous définissons les entités de risque et leurs interdépendances.
La Figure 42 présente un modèle pour les entités de risques selon (Hasan, 2002). Dans ce modèle, les différentes sortes de barrières ne sont pas distinguées, la façon de calculer la

gravité de risque n'est pas présentée, alors, la position du danger et de la cible, le mode de contact ne sont pas modélisés. Ce modèle est adapté pour développer un système d'information de risque, mais ne présente pas une technique d'évaluation des risques qui puisse être utilisée dans un environnement 3D.

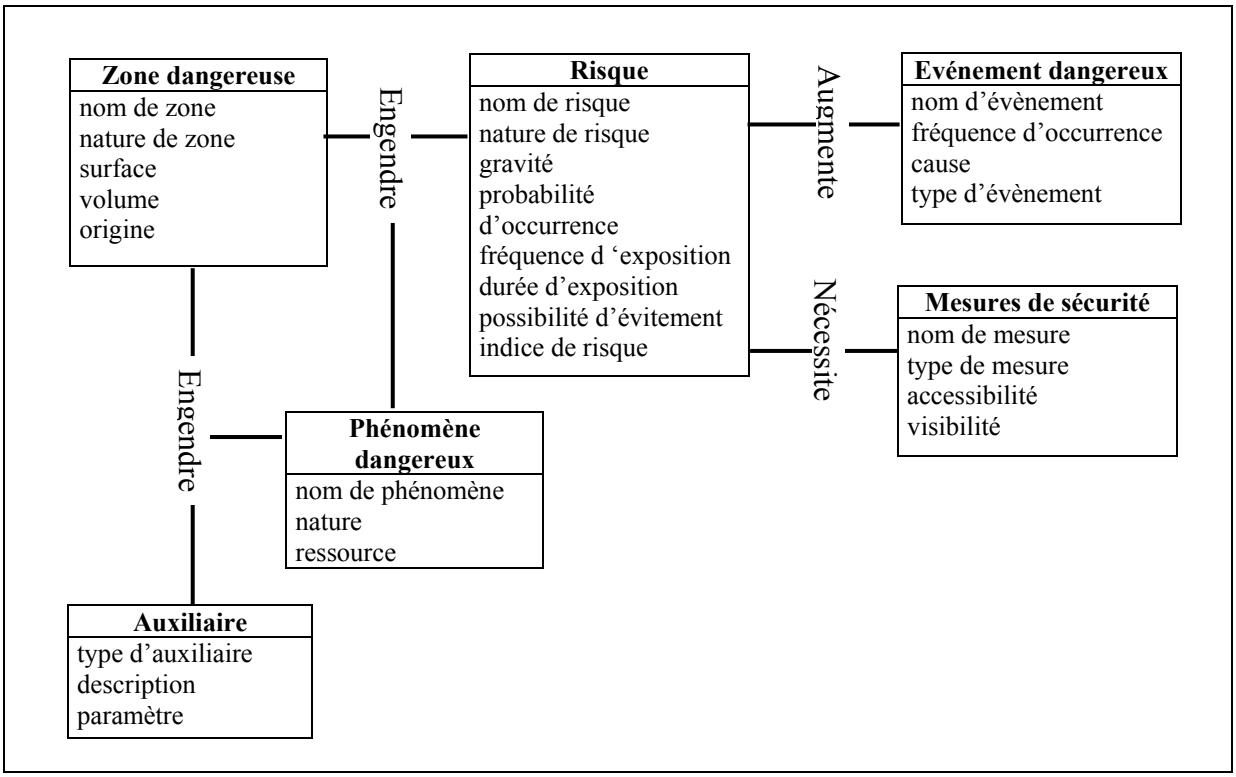


Figure 42. Une illustration schématique des entités de risque selon (Hasan, 2002)

Lors de la conception, une partie très importante du travail du concepteur est sa façon d'agir avec les barrières. Il a besoin de présenter les effets de chaque modification qu'il fait, soit sur les entités essentielles de risques (zone dangereuses, risque, évènement,.. .), ou soit dans la forme de ces entités. La facilité et la précision de cette présentation jouent un rôle important pour l'applicabilité de chaque modèle. Pour couvrir cette exigence on a présenté un modèle des entités de risque, en se concentrant en particulier sur les définitions des différentes formes de barrières.

3.3.1. La cible

Les cibles sont l'humain, la propriété et les parties environnementales d'un système. Nous avons présenté les attributs d'importance et de vulnérabilité de la cible pour modéliser les conséquences d'accidents.
Un facteur d'importance d'une cible illustre sa valeur ou son importance.
Un autre facteur, le facteur de vulnérabilité modélise certains des effets de barrières. Ce facteur est un indicateur numérique entre zéro et un.

3.3.2. La zone dangereuse

Selon une définition classique, la zone dangereuse est une zone à l'intérieur et/ou autour d'un objet dangereux, où une cible exposée est sujette à un risque (CEC, 2002).
En utilisant le concept d'énergie, nous avons développé une nouvelle définition pour une zone dangereuse, qui a un rôle essentiel dans notre approche, et nous simplifions ainsi la définition

d'autres entités (par exemple le risque et les barrières). Cette définition est proposée dans (Shahrokhi et al., 2004b), pour fournir une analyse dynamique d'énergie par la simulation de processus. Dans cette analyse, les énergies absorbées par des cibles dans les séquences de simulations sont accumulées pour calculer un index total de risque d'opération. Pour faire une analyse d'arbre d'événements ou une analyse conventionnelle d'énergie, une définition des zones dangereuses n'est pas obligatoire. Selon l'approche d'analyse d'énergie, des énergies potentielles et cinétiques, et les conditions environnementales (par exemple polluants toxiques d'air) qui pourraient causer du mal aux personnes ou aux choses, sont considérées comme les agents dangereux et les zones dangereuses sont définies autour d'elles. De cette façon une zone dangereuse peut être interprétée comme une zone d'énergie. Ainsi les zones dangereuses peuvent être attachées ou assignées aux matériels ou à l'équipement dans le lieu de travail. Certains agents dangereux sont seulement présents dans des cas spéciaux ou créés selon les paramètres du processus (par exemple pression, température, composition) (Rausand, 2005h), alors, les zones dangereuses peuvent apparaître, seulement, dans quelques étapes des processus.

Dans notre recherche bibliographique nous avons constaté que les auteurs traitent la zone dangereuse comme un espace uniforme. La raison doit peut-être être que cela facilite le processus de modélisation et permet de fournir une analyse compréhensible de sécurité. En considérant que l'énergie absorbée change proportionnellement à la distance entre la cible et la source d'énergie, pour avoir un modèle plus précis, nous avons défini la zone dangereuse comme un espace flou.

Toutefois, la définition conventionnelle de la zone dangereuse est un cas spécial de définition de l'espace flou, et peut être représentée par ce modèle (par exemple en utilisant les ensembles flous rectangulaires).

Si une source de danger a divers effets selon différentes formes de distribution géographique, nous devons lui assigner plusieurs zones dangereuses en même temps.

3.3.3. Agent de danger

Un objet dangereux peut avoir un ou plusieurs agents de danger.

Les agents de danger sont les chemins de sources et de propagation de l'énergie stockée sous forme électrique, chimique ou mécanique comme (Rausand, 2005i) :

- Des pièces mécaniques mobiles,
- Un rayonnement nucléaire,
- Un rayonnement électromagnétique (infrarouge, ultra -violet y compris, laser, radar, et fréquences radio),
- Du feu ou une explosion,
- Des liquides et des gaz toxiques et corrosifs s'échappant de récipients ou étant produits,
- Le bruit y compris les vibrations supersoniques,
- Le danger biologique, y compris la croissance bactérienne, tel qu'un réservoir de carburant.

Les causes sont des phénomènes qui créent des déviations. Plusieurs conséquences peuvent suivre une cause et, alternativement, une conséquence peut avoir plusieurs causes (Rausand, 2005h). L'homme, la machine et l'environnement peuvent être causes de dommages et être également endommagés (Määttä, 2003).

Un facteur de dommage, d'un agent de danger pour une cible, montre le taux de dommages ou le taux de réduction de valeur de la cible exposée à l'agent de danger.

3.3.4. Risque

Le risque est une combinaison de la probabilité et du degré de dommage (Khan et al., 1998), et un index de risque est un indicateur quantitatif de risque, qui généralement est calculé en multipliant la probabilité d'accidents avec sa valeur estimée de sévérité (JLr-einen, 1996).
L'interaction entre chaque agent de dangers, et chaque cible peut être caractérisée par un ou plusieurs risques.
Dans notre modèle pour avoir une analyse dynamique d'énergie par la simulation de processus, des risques doivent être associés aux zones dangereuses. Plusieurs risques peuvent être assignés à la même zone, parce qu'il y a des objets dangereux qui produisent divers effets dangereux dans un même espace géographique. Par exemple un gaz de toxine produit divers effets sur le corps humain.
D'autre part un risque peut être commun à plusieurs ZDs, qui sont créées par différents objets dangereux. La sévérité du risque augmente selon le degré d'appartenance de la cible dans les zones dangereuses. Cette situation est présentée dans la figure 43. Par conséquent la modification d'une zone dangereuse peut changer l'attribut de sévérité en tous les risques qui sont présentés dans cette zone. Si nous ne voulons pas faire une analyse de simulation, il n'est pas nécessaire d'assigner des zones dangereuses aux risques.

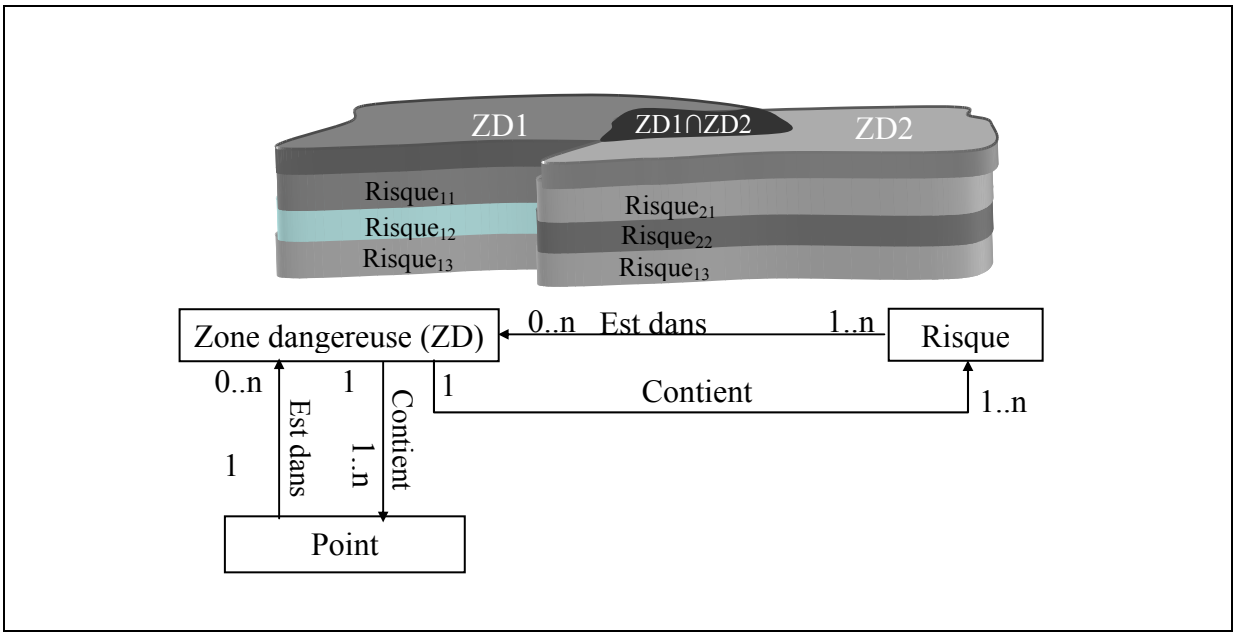


Figure 43. Interrelations entre la zone dangereuse et les autres entités de risque

3.3.5. Evénement dangereux

Des risques sont le résultat de quelques événements et conditions qui influent directement ou indirectement sur la probabilité des accidents ou de leur sévérité (figure 44). Les événements dangereux concernent les phénomènes qui mènent aux cas suivants :

- Production ou dégagement d'agent de danger,
- L'opérateur étant présent dans la zone dangereuse,
- Contact entre l'agent de danger et l'opérateur,
- Réduction de la possibilité de récupération, après accident.

Les méthodes qualitatives d'analyse de risque sont développées pour déterminer la probabilité des accidents à base de probabilité des séries d'événements. Chaque événement dans cette série peut être considéré comme un événement dangereux parce que quand il se produit, les

risques augmentent. Cependant l'occurrence d'un accident a besoin d'une série d'événements appelés une « coupe minimum ». Pour chaque accident nous pouvons distinguer plusieurs coupes minimums, et il est possible qu'un événement soit un membre de coupes minimums de plusieurs accidents. Nous avons utilisé la structure arborescente d'événements pour démontrer ces relations. Pour avoir le calcul correct, les événements dans ce modèle doivent être statistiquement indépendants. La structure d'événements est employée pour démontrer seulement les divers ensembles de coupe, et leur position dans la structure peut être différente de leurs ordres d'occurrence.

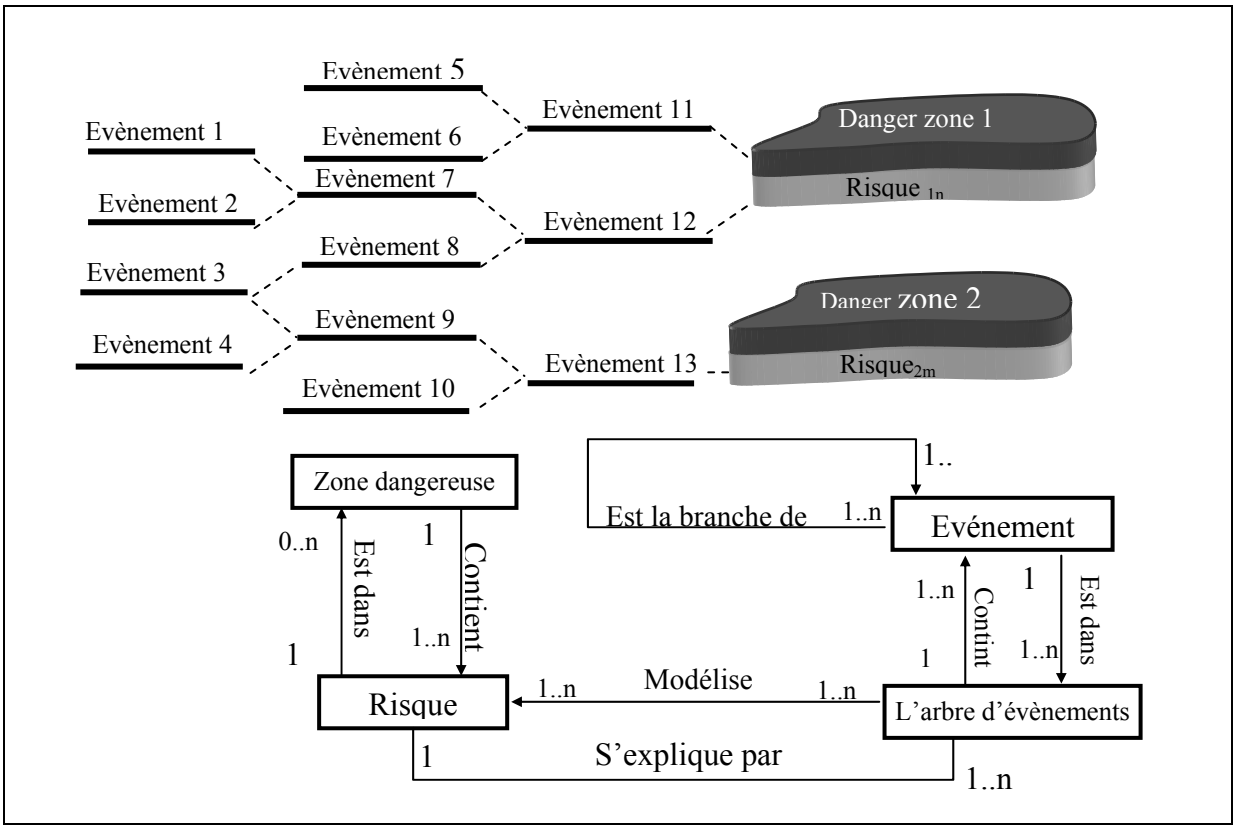


Figure 44. Les interrelations entre les évènements dangereux et les autres entités de risque

3.3.6. Barrière

Une fois que des risques ont été identifiés, le concepteur doit choisir les barrières pour empêcher les accidents. Il peut :

(a) Empêcher un événement d'avoir lieu (barrières préventives),

(b) Contrecarrer ou réduire l'impact des conséquences d'accidents (barrières protectrices).

Nous les appelons respectivement « barrières de probabilité » et « barrières de sévérité ».

L'analyse de barrière aide le concepteur à choisir la meilleure barrière conçue en fonction des objectifs de conception. Certaines des barrières affectent des zones dangereuses. Ces barrières seront considérées seulement lors de la simulation de processus de production.

On doit noter que, généralement, les effets de protection supplémentaire, résultant de l'ajout des barrières successives, se réduisent rapidement. C'est parce qu'ajouter une nouvelle barrière, affecte seulement le reste du risque qui est fortement réduit par les barrières précédentes.

La figure 45 montre les effets protecteurs de quatre barrières identiques en série, chacune avec la fiabilité 1-d.

Dans ce modèle, la fiabilité est calculée, en supposant l'indépendance entre la probabilité d'échec de barrières et d'autres entités de risque qui peuvent être compliquées autrement. En intégrant le modèle de risque dans le système d'information de produits/processus/ressources (PPR) une plate-forme identique de conception de sécurité et productivité (SP) a été développée sur la pate-forme DELMIA.

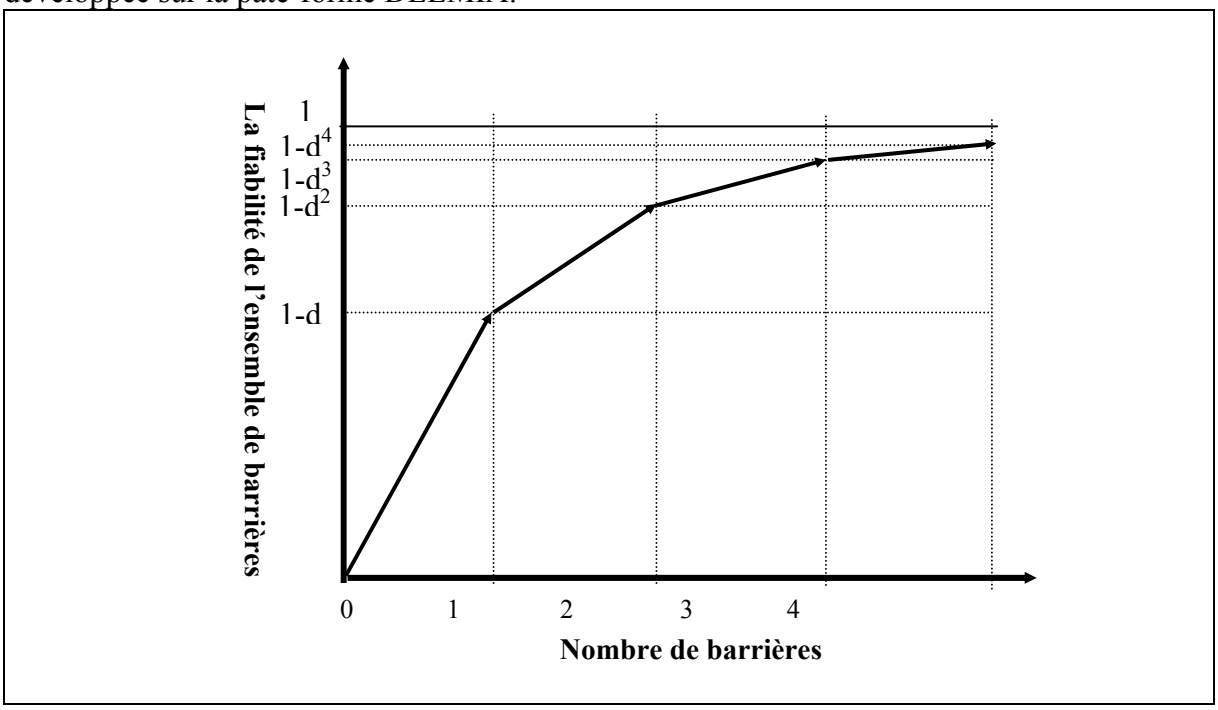


Figure 45. Les effets protecteurs d'utilisation des barrières successives

Ceci a été fait en fournissant la possibilité d'un lien entre les entités de PPR et les entités de risque, qui sont présentées dans la table 3. DELMIA fournit une structure hiérarchique sous la forme d'un système d'information de type PPR, appelé « arbre de spécifications ». Les productions et les matériaux peuvent avoir ou ne pas avoir des profils géométriques associés. En plus, des attributs peuvent être assignés à chaque entité, comme les paramètres, et les liens entre ces paramètres peuvent être définis comme relations.

Table 3. Les relations possibles entre les entités PPR et les entités de risque

Entité de PPR	Relation	Entité de risque
Produit (ou Composant)	Peut être	Cible Source de danger Barrière
Processus	Peut inclure	Evènements dangereux (s) Barrières (comme les procédures de sécurité)
Ressources (homme, équipement ou matériel)	Peut être	Cible Source de danger Barrière

En utilisant le Visual Basic, nous avons développé une boîte à outils spéciale pour définir et placer des entités de risque dans l'arbre de spécifications de DELMIA (voir la section 3.5). Cette technique permet à l'utilisateur d'associer les entités de risque aux produits, aux ressources et aux processus. Par cette méthode les formes géométriques peuvent être définies pour décrire des zones dangereuses et des barrières physiques. Après importation de chaque entité de risque de la bibliothèque d'entités, l'utilisateur définit les attributs de ces entités. Ces attributs sont sauvés comme paramètres d'entité. La place d'entités dans l'arbre de spécifications de DELMIA, définie par l'utilisateur, présente des relations hiérarchiques entre les entités.

La figure 46 présente une photo d'écran de l'application. On y voit un schéma de l'interface développée pour modifier les caractéristiques de barrières dans cet outil. Dans cette image l'intégration des entités de risques dans les entités de conception et le processus de mesure des distances des organes du corps d'un opérateur à une zone dangereuse schématique, lors de mouvements sont illustrés.

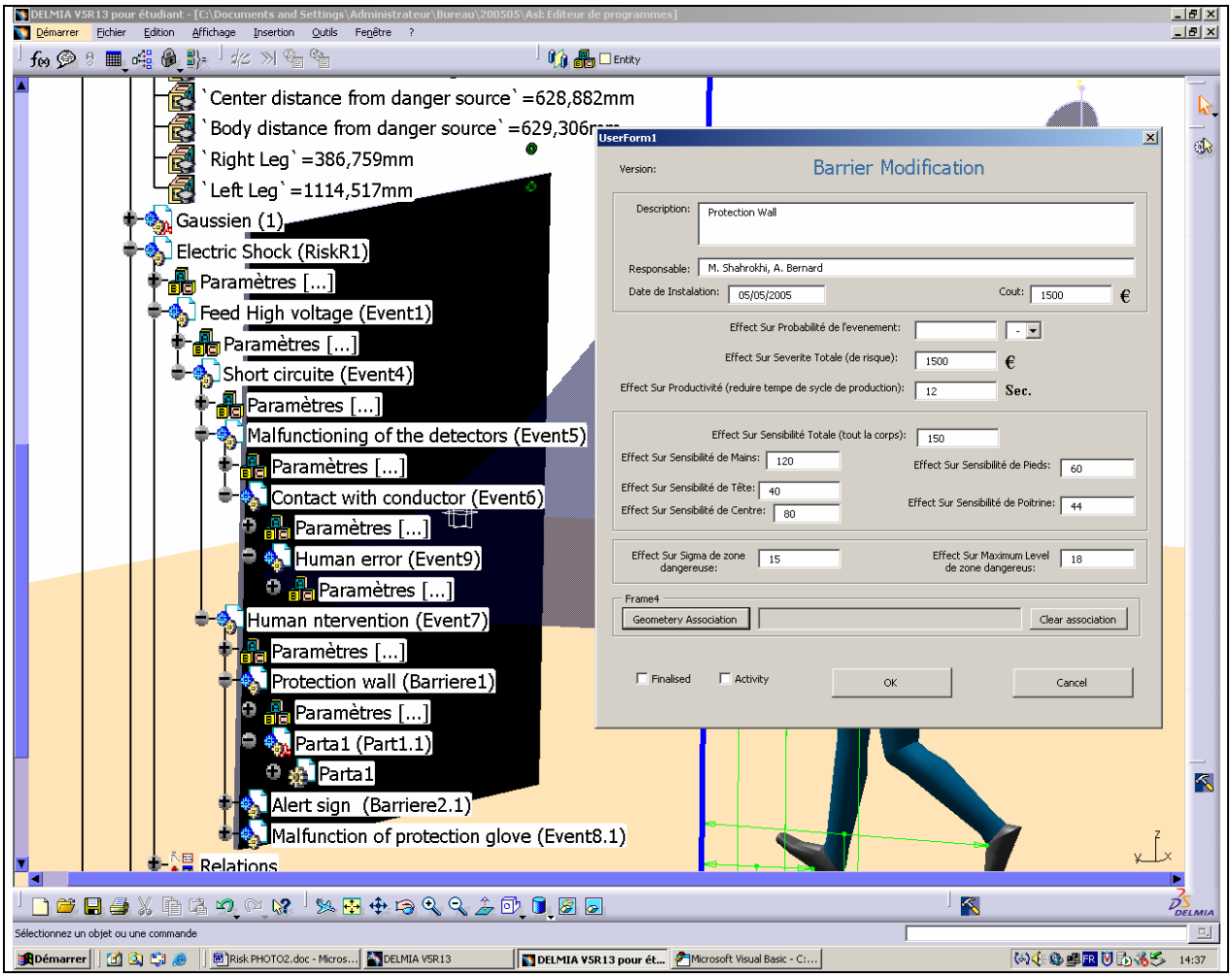


Figure 46. **Une boite de dialogue d'entrée des attributs de barrières**

3.4. Considération des effets de barrières dans l'analyse de l'arbre d'évènements

Dans cette section on présente une approche pour considérer les effets de barrières sur la probabilité des événements par l'analyse d'arbres d'événements. Comme cela est expliqué dans (Shahrokhi et al., 2006g), une structure pour modéliser des ensembles de barrières est

développée. En utilisant les techniques d'analyse de fiabilité, on a proposé une approche pour calculer les effets de barrières sur la probabilité des événements. Pour intégrer la structure de l'arbre d'événements dans la plate–forme DELMIA, une nouvelle structure pour l'arbre d'événements et une méthode pour intégrer les barrières sont proposées.
Selon (PSA, 2005), des barrières de commande sont présentées pour contrôler les risques, et des barrières de défense sont présentées pour protéger la cible, et un accident est défini comme résultat de transformer les échecs latents en échecs actifs de barrières sous forme de séquence d'événements. Ces événements peuvent être étudiés par une approche d'analyse d'arbre d'événements. L'analyse d'arbre d'événements (Event Tree Analysis, ETA) est une technique symbolique de logique qui explore le système et permet l'évaluation de la probabilité des résultats défavorables (Clemens, 2002) (Huang et al., 2001) (Rausand, 2005b). Elle illustre les ensembles d'évènements liés à différentes conséquences. La figure 47 présente un arbre conventionnel d'événements.

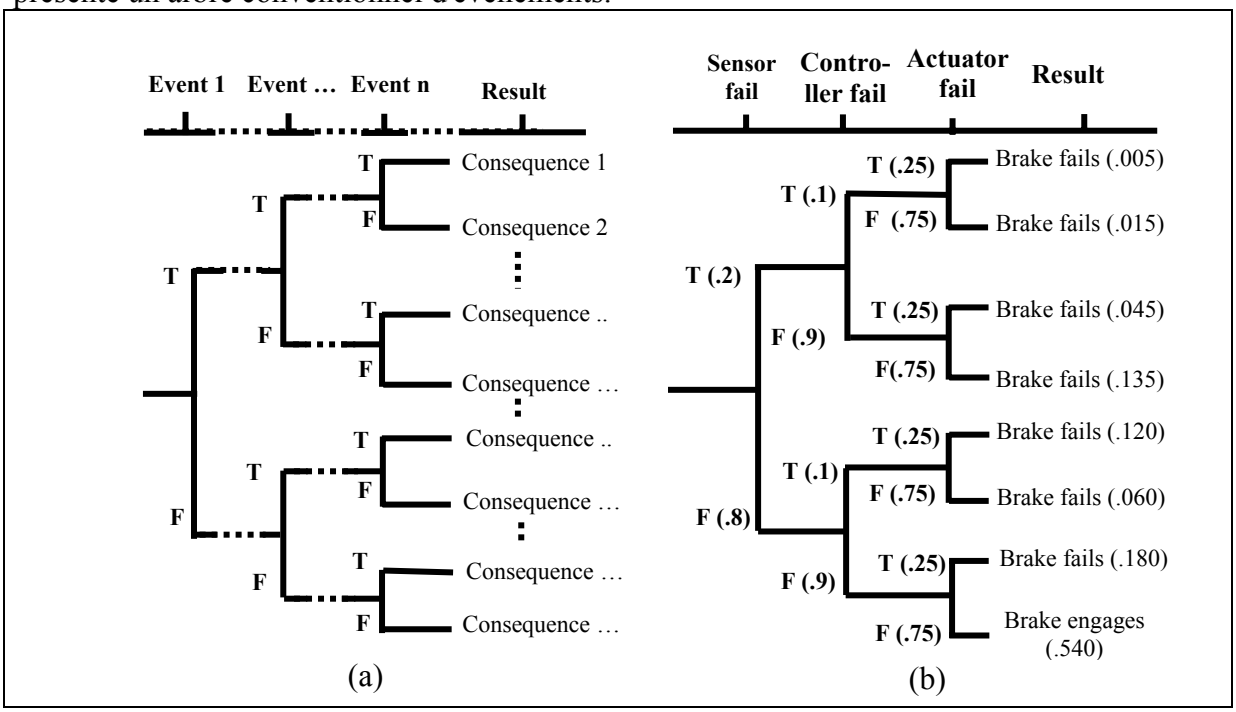


Figure 47. a) Un schéma de l'arbre d'évènements et (b) un exemple d'arbre d'évènements

Les lettres T et F démontrent respectivement l'occurrence ou la non–occurrence des événements, et les nombres dans les parenthèses sont les probabilités des événements. L'arbre d'évènements est principalement appliqué dans l'analyse des scénarios d'accidents qui suivent fondamentalement les lois de la physique mais il a été aussi appliqué aux analyses des conséquences de l'erreur humaine (Kjellén et al., 1995) (Rausand, 2005b). Par cette analyse, les échecs et les erreurs multiples peuvent être analysés. Elle peut être employée comme guide de déploiement des ressources pour améliorer le contrôle du risque par l'identification et l'analyse des échecs potentiels, des secteurs de vulnérabilité du système (Clemens, 2002).
Elle est particulièrement utile pour analyser des dispositifs protecteurs, des systèmes de réponse de secours, et des dispositifs mécanisés de sûreté (Clemens, 2002). Pour appliquer des analyses d'arbre d'événements, nous avons besoin des taux d'échecs pour les équipements appropriés, donc l'analyse avec le degré élevé de résolution ne peut pas être faite avant la technologie de détail (Kjellén et al., 1995). Le taux d'échec d'un composant est traité comme variable aléatoire pour décrire la variabilité du taux d'échec et l'incertitude (Huang et al., 2001).

Les résultats de l'analyse d'arbre d'événements peuvent être employés pour (Rausand, 2005b) : (1) juger de l'acceptabilité du système, (2) identifier des occasions d'amélioration, (3) recommander des améliorations, et (4) justifier la répartition des ressources pour des améliorations.
Le problème concernant le fait d'appliquer l'arbre d'événements est que plusieurs analyses d'arbre peuvent être nécessaires pour un système particulier, aussi, l'occurrence simultanée de plusieurs voies d'échec est négligée. Bien que des voies multiples d'échec du système puissent être révélées, les niveaux de sévérité de la perte liés aux voies particulières ne peuvent pas être distinguables sans analyse additionnelle (Clemens, 2002).

3.4.1. Description de modèle

Dans le cadre de ce travail, un modèle pour exécuter l'analyse de risque lors de la conception est présenté. Une partie de ce projet concernant le modèle du processus d'accidents est décrit. Une forme modifiée d'arbre d'événements est développée, en appliquant une transformation sur l'arbre conventionnel d'événements. Ce modèle est intégré dans l'arbre d'entités de conception, utilisé dans DELMIA. Au contraire de la structure arborescente d'événements conventionnelle, dans l'arbre proposé, tous les événements concernant un résultat défavorable particulier (événement supérieur) sont regroupés dans un arbre séparé. La racine de cet arbre est un événement supérieur, qui est caractérisé par un « risque », et les branches sont les événements. Un risque est associé à un ou plusieurs éléments du système : les solutions techniques, les produits, les outils, les matériaux, les consommables, les humains, l'environnement, et même les barrières.

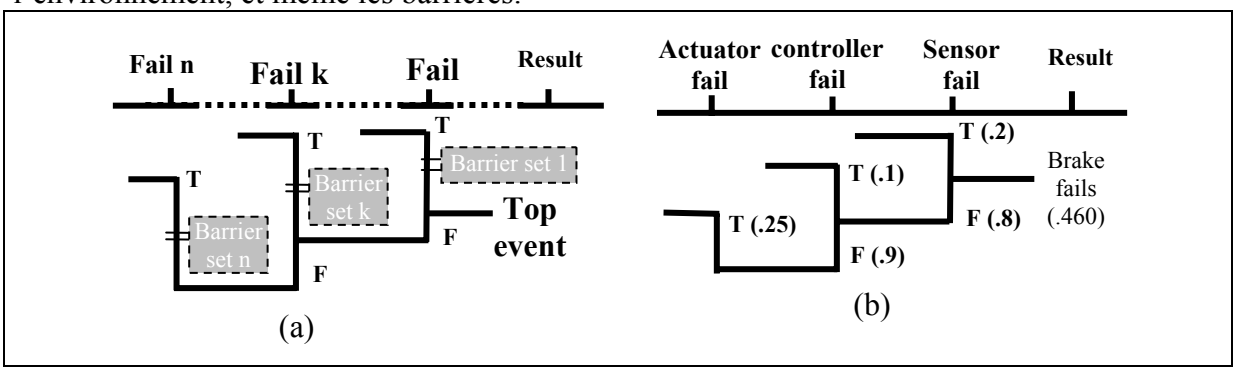


Figure 48. (a) La forme schématique de l'arbre d'évènements modifié et (b) l'arbre d'évènements modifié de l'exemple précédent

La figure 48-a montre une forme schématique du modèle proposé pour l'arbre d'évènements, et la figure 48-b illustre l'arbre d'événements de l'exemple précédent, dans le format modifié. Comme l'arbre d'événements conventionnel, dans ce modèle, la probabilité d'accidents est calculée simplement, en multipliant les probabilités des événements, ce qui implique l'indépendance des événements (ZIO, 2002), toutefois la probabilité des événements est réduite en appliquant les effets de barrière. Les barrières qui sont montrées dans l'arbre d'événements sont seulement les barrières qui ont un effet sur la probabilité des événements (barrières de probabilité). D'autres méthodes sont nécessaires pour modéliser les barrières qui ont un effet sur la sévérité d'accidents.
Un ensemble de barrières de probabilité est illustré sur la figure 49, il inclut une structure de barrières séries et parallèles. Les nombres dans les parenthèses, dans cette figure, sont les fiabilités des barrières. La relation des barrières dans ce modèle est montrée comme :

B1.OU. (((B5.ET.B4).OU.(B5.ET.B3)).ET.B2)=B1.OU.(B5.ET.(B3.OU.B4).ET.B2)

Les relations « OU » et « ET » montrent respectivement la relation de substitution et de complémentation. La fiabilité totale de la structure est calculée en considérant des relations séries et parallèles.

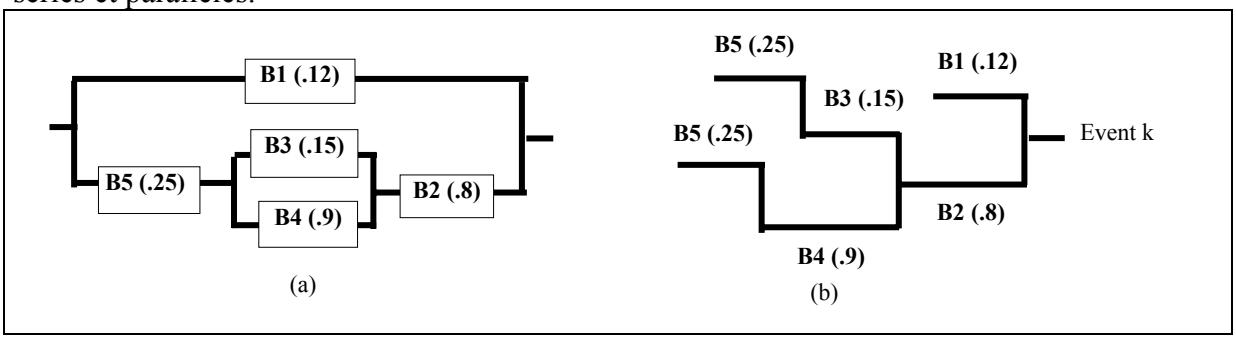


Figure 49. (a) Un diagramme bloc, et (b) son équivalent dans la forme de structure de barrières

La fiabilité de la structure de barrières est calculée en employant la même méthode de calcul que celle qui est employée pour calculer la fiabilité d'un ensemble de composants, en divisant la structure en groupes séparés de barrières séries et parallèles.

La fiabilité totale, R, pour les n barrières parallèles est calculée comme : $R=\prod_{i=1}^{n} r_i$, et pour les barrières séries est calculée par : $R=1-(\prod_{i=1}^{n}(1-r_i))$.

De cette façon la probabilité de l'événement, après application des barrières, sera calculée comme : $P(e_k^+)=P(e_k^-)(1-R_k)$

R_k est la fiabilité de l'ensemble des barrières associées à l'événement k, et e_k^- et e_k^+ sont les probabilités d'évènements respectivement avant et après l'application des barrières.

3.4.2. Discussion sur l'intégration de barrières dans l'arbre d'évènements

L'approche présentée emploie les techniques de base de l'ingénierie de la fiabilité, pour modéliser les effets de barrières de probabilité. Basé sur ce modèle, un module d'analyse de sûreté est développé dans la plate–forme de DELMIA. La figure 29 présente un écran tiré de ce module. Un système d'information est conçu pour faciliter le processus d'analyse de risque. Une bibliothèque d'événements et d'entités de barrières sont développées, et de cette façon ces entités peuvent être importées directement dans l'arbre de spécifications de DELMIA.

Basé sur la structure de données présentée, en utilisant le Visual Basic, un logiciel a été développé pour définir les paramètres d'entités et pour calculer les probabilités dans l'arbre d'évènements. Comme dans plusieurs des approches d'analyse de fiabilité, des barrières sont modélisées en considérant deux états : fonctionnement et échec. De cette façon, des occurrences des événements peuvent être illustrées comme variables aléatoires de Bernoulli, avec les probabilités correspondantes. Comme les autres méthodes d'arbres d'événements, la sévérité des accidents est considérée comme paramètre connu. Le modèle présenté pour évaluer la sévérité des accidents doit être employé en même temps que ce modèle.

Dans cette section, nous avons passé en revue le concept de barrière de probabilité dans les lieux de travail industriel et nous avons développé une approche d'analyse d'événements, y compris un modèle modifié d'arbre d'événements et une structure de barrières sous la forme d'un arbre. Les méthodes d'analyse de fiabilité sont employées pour calculer les effets d'évitement des barrières sur l'arbre d'événements. Basé sur ce modèle, une bibliothèque d'entités de risque et un logiciel sont développés pour calculer les probabilités d'accidents

dans la plate–forme de DELMIA. Ces modèles peuvent être employés afin de faire l'analyse de risque, lors de la conception de situations de travail.

3.5. Le modèle informatique

Pour valoriser l'applicabilité des résultats de cette thèse dans l'environnement de conception, un système d'analyse de risque a été développé, avec la plate-forme de DELMIA. Il peut être utilisé pour analyser des accidents et les maladies professionnelles. Ce système utilise l'arbre de spécification conventionnel de DELMIA, qui regroupe les processus, les produits et les ressources dans une structure hiérarchique (figure 50).

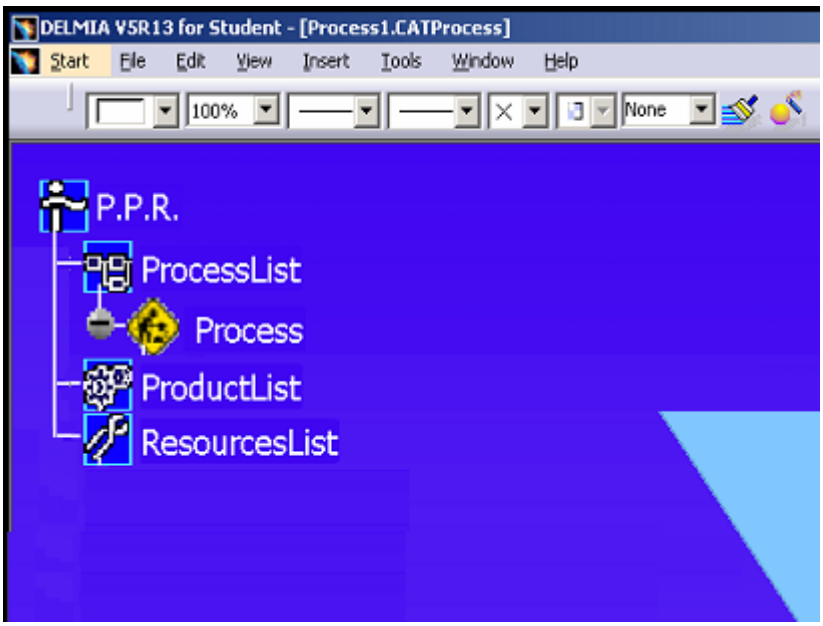


Figure 50. L'arbre des spécifications de DELMIA

Un ensemble ***entités de risque*** est développé, sous la forme d'un catalogue des éléments, qui peuvent être importés et intégrés dans l'arbre de spécifications de DELMIA.
Ce système organise les entités de risque dans une structure de données hiérarchique qui peut être accompagnée par les relations entre les données.
Une série d'outils de modification des paramètres et d'analyse de risque sont développés en utilisant un programme écrit en Visual Basic sur la plate-forme DELMIA. Ces outils sont capables de distinguer les entités de risques et de calculer les indicateurs de risque en fonction de la structure hiérarchique des entités. La forme de l'arbre est utilisée pour définir les opérateurs 'ET' et 'OU' qui déterminent les relations entre les évènements dans l'arbre des évènements et les barrières associées.
La Figure 51 montre un schéma général et simplifié de la structure de cette base de données.
Dans ce cas, il est possible d'importer les entités de risque et de les associer aux produits, ressources ou processus dangereux.
Pour faciliter cela, chacune des entités, dans la figure précédente, est définie comme une classe, qui contient des entités plus détaillées.
Par exemple, la plus grande classe, « Hazard », est une classe composée d'un ensemble d'entités de zone de dangers, de risques, de l'arbre d'évènements, d'évènements, de cibles et des barrières correspondantes.

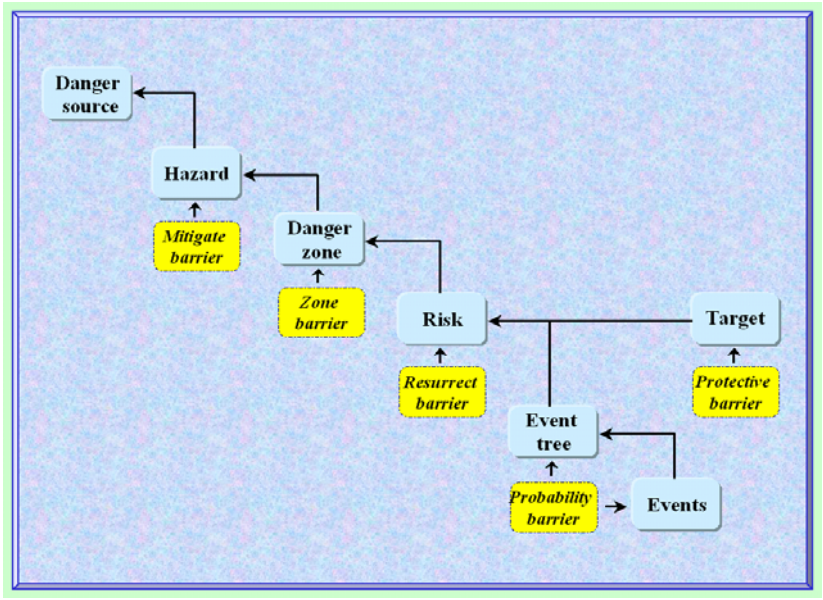


Figure 51. **Les entités de base du système d'analyse de risque**

En s'associant à un produit ou une ressource, dans l'arbre de spécification de DELMIA, il développe une structure de données prédéfinies et prête à être modifiée par l'utilisateur, en important la notion de risque, par un arbre d'évènements associé à des barrières correspondantes, le tout inséré automatiquement dans le système (Figure 52).

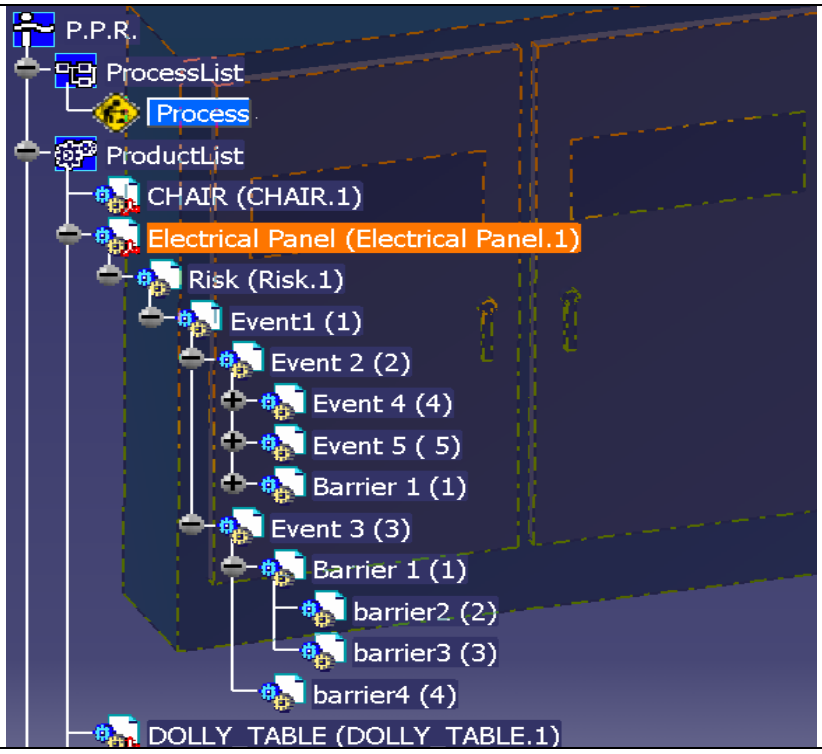


Figure 52. **La structure hiérarchique développée pour le risque et l'arbre d'évènements**

Ensuite l'utilisateur peut modifier cette structure avec les outils conventionnels de DELMIA (comme copier, coller et supprimer), pour définir les relations entre les évènements, les risques et les rôles de barrières (Figure 53).
Un programme en Visual Basic est spécialement développé pour modifier les paramètres des entités de risque en considérant les modifications appliquées par l'utilisateur.

Figure 53. Une structure de l'entité de HAZARD, pour la scie à ruban, avant modification

Pour adapter les entités importées, dans le premier pas, l'utilisateur explique le danger et ses paramètres. Ces paramètres seront utilisés pour créer les zones dangereuses floues dynamiques et calculer la sévérité de l'accident dynamiquement, en considérant le changement du danger (figure 54).
Pour créer ces relations, il faut créer les relations entre les paramètres manuellement.
Le nom et la description de chaque danger sont présentés par des boites de dialogue, et il est possible de définir les paramètres qui ont un effet sur le danger et sa dangerosité (par exemple la température, la vitesse, la radiation, et le poids, jusqu'à trois paramètres).
S'il y a des barrières qui sont utilisées pour réduire le danger ou pour contrôler ses paramètres, on les représente par les barrières de dangers. Ces barrières peuvent limiter un niveau maximum ou réduire le danger.
Pour chaque barrière, on définit son nom et une description et on associe un objet dans l'environnement 3D (figure 55).
Le paramètre « R(%) » est la fiabilité de la barrière pour appliquer ses effets sur le paramètre de danger. En choisissant l'option « s », l'opérateur demande la création d'une situation aléatoire pour la fiabilité de barrière (« Vrai » ou « Faux »), en considérant le degré de fiabilité (R), défini par l'utilisateur.
Ensuite, l'utilisateur doit définir les risques associés à ce danger. Pour chaque risque, il faut définir trois parties (figure 56).

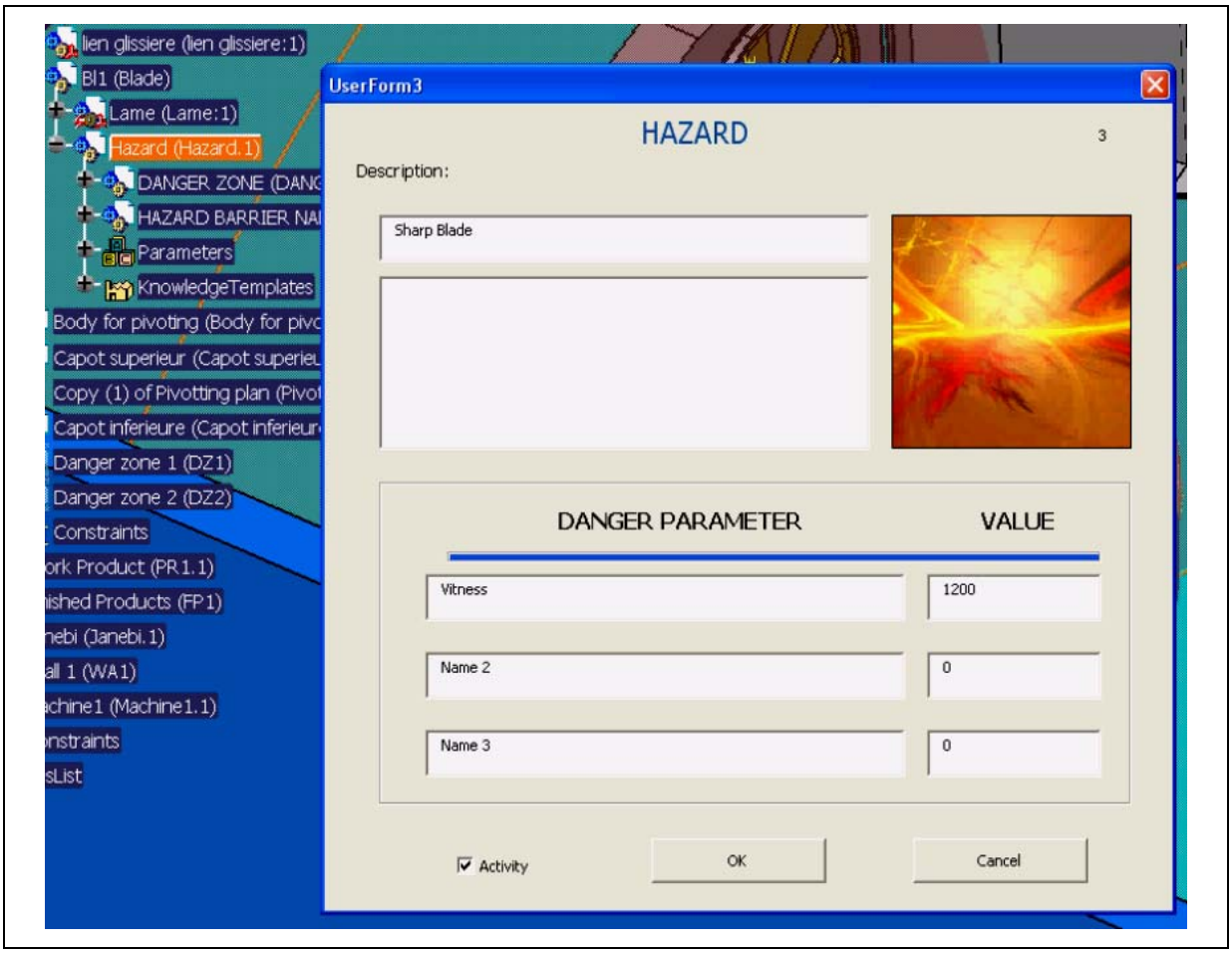


Figure 54. **La boite de dialogue pour introduire/modifier le danger**

D'abord les descriptions générales des risques, qui peuvent être accompagnées avec des estimations pour les probabilités et sévérités.
L'utilisateur peut définir directement une probabilité et une sévérité pour le risque, en choisissant les options 'Manuel' ou demander une analyse de risque pour calculer ces paramètres, en choisissant les options 'Automatic'.
Les estimations seront utilisées dans les premières phases d'analyse, s'il n'y a pas encore une description des processus de l'accident, et les probabilités d'évènements qui peuvent conduire aux accidents ou s'il n'y a pas les informations précises concernant les conséquences des accidents. Dans ces cas, l'utilisateur choisit les options « Manual » pour les probabilités et sévérités et il entre les valeurs sur la base de ses connaissances.
Par contre s'il veut utiliser les résultats des processus d'analyse de l'arbre d'évènements, d'analyse de barrières et la simulation de l'accident, il faut qu'il sélectionne les options «Automatic».
La deuxième partie, pour définir le risque est la définition de la cible.
Cette entité peut être associée à un élément géométrique (un objet ou un mannequin) dans l'environnement 3D qui est utilisé lors de la conception du système. Dans ce cas l'utilisateur appuie sur le bouton « Part number of the target », ensuite la fenêtre de dialogue de définition de risque disparaît pour permettre à l'utilisateur de la sélectionner. S'il veut calculer l'index de risque par simulation d'un cycle de production, le bouton « Target Reference Point » montre le point référence qui doit être utilisé pour déterminer la position de la cible.
Le paramètre « Vulnerability » est utilisé pour expliquer le degré de protection de la cible, avant d'appliquer les barrières de protections (défini entre 0 et 1). Lors du calcul de la sévérité

d'accident, ce paramètre sera modifié en considérant les barrières qui protégent la cible face aux dangers.

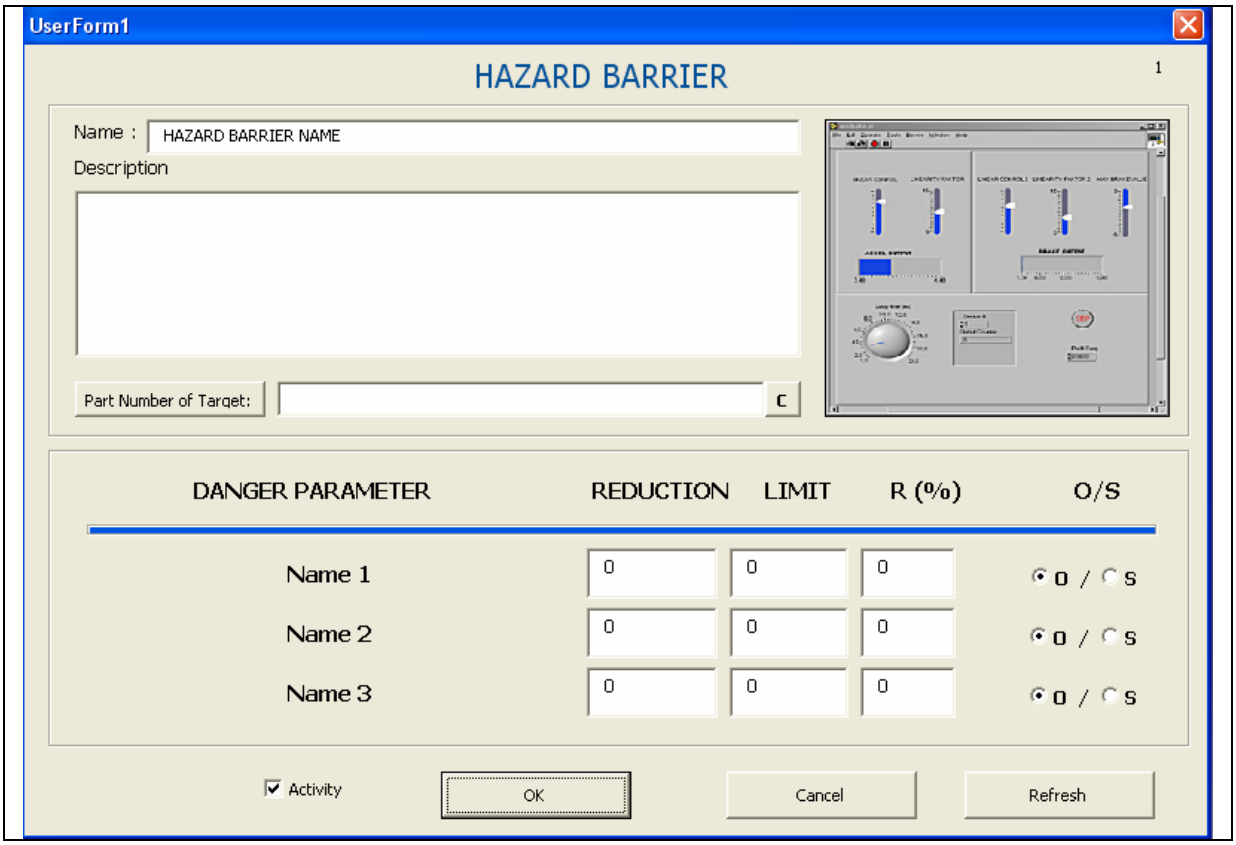


Figure 55. Définition des paramètres de la barrière de danger

La notion « Worth » représente la valeur de la cible définie en unité monétaire.
Dans un troisième temps l'utilisateur définit la dangerosité de l'agent danger, il associe un agent dangereux comme l'inertie, la toxicité, la chaleur, une radiation et d'autres effets physico-chimiques dangereux.
Le facteur de dommage est un chiffre entre 0 et 1 pour normaliser les différentes sortes de dangers dans une échelle uniforme. Il peut être relié aux paramètres qui sont déjà définis pour l'objet dangereux.
Les barrières de probabilité des accidents sont des dispositifs qui donnent l'alarme, juste avant l'accident pour empêcher et limiter les conséquences.
On peut appliquer une ou des barrières dans l'arbre d'évènements, afin de réduire la probabilité d'accident, mais on considère ces barrières a posteriori car, en cas d'utilisation de ces barrières, les évènements dans l'arbre d'évènements sont déjà arrivés, et on est en train de reculer ces évènements pour récupérer la situation sûre.
Les paramètres pour cette entité sont le nom de la barrière et sa description, et la fiabilité de la barrière (Figure 57). On peut produire une situation aléatoire pour dire que la barrière marche ou pas, en sélectionnant l'option « Simulated ».
En plus il y a des barrières de sévérité à postériorité d'accident. Ce sont des ensembles de dispositifs pour limiter et réduire les conséquences d'un accident déjà arrivé. Pour chaque entité de risque, on peut définir plusieurs « ensembles de barrières » qui seront appliqués après l'accident pour réduire la sévérité de l'accident. Le paramètre d'« efficacité », défini pour un ensemble de barrières, détermine l'effet d'une barrière sur la réduction de la sévérité

de l'accident, s'il est fiable et disponible. La figure 58 montre la boite de dialogue, utilisé pour définir les paramètres de l'ensemble de ces barrières.

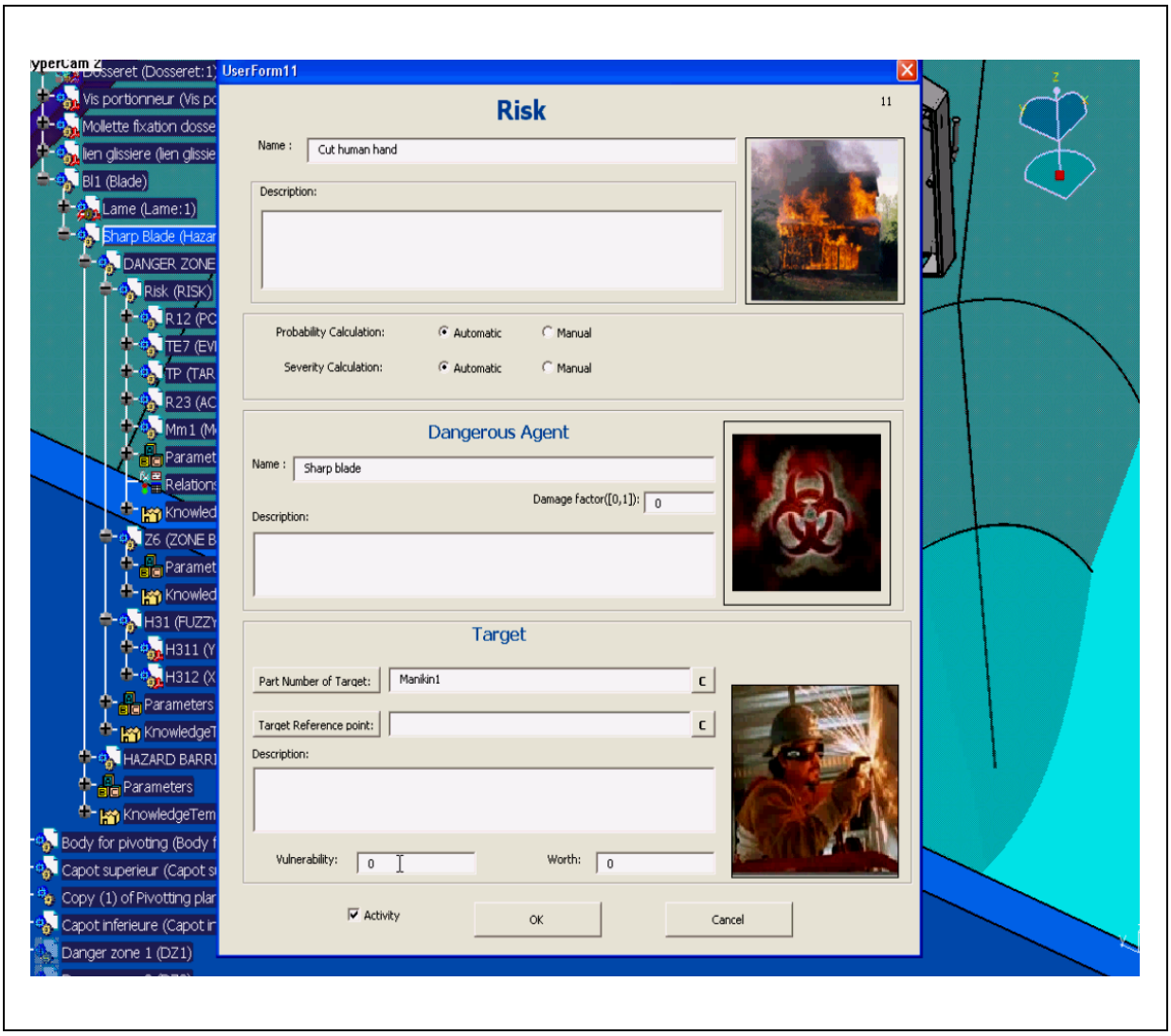


Figure 56. Fenêtre utilisée pour introduire les paramètres de risque

Les paramètres d'un ensemble de barrières sont son nom et sa description, l'objet associé dans l'environnement 3D (s'il existe), son efficacité pour réduire la conséquence de l'accident, et sa fiabilité (la probabilité que ça marche bien).
En choisissant l'option « Simulated », on peut créer une situation pour la fiabilité de barrières (« Vrai » ou « Faux »), en considérant le degré de fiabilité présenté par utilisateur.
La Figure 59 montre la boite de dialogue qui permet de définir les paramètres de ces barrières, leur nom et leur description, et ainsi que leur efficacité.

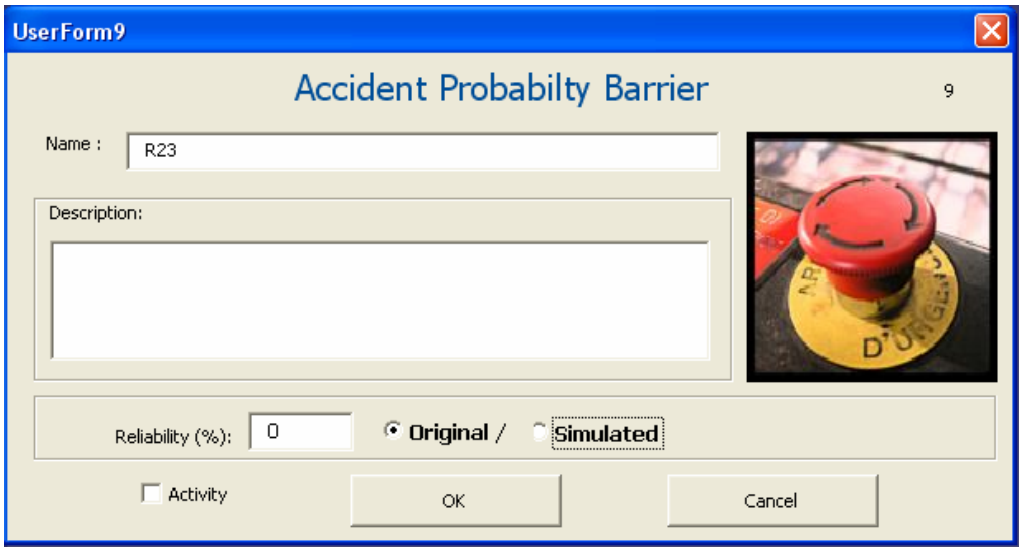


Figure 57. Définition des paramètres des barrières de probabilité d'accident

Ces barrières peuvent être complexes, en regroupant plusieurs barrières sous la forme de barrières en série et en parallèles, sous la forme d'ensembles de barrières « Post-Accident Barrier Set ».

Figure 58. Définition des paramètres d'un ensemble de barrières qui limitent la sévérité d'un accident

Il est possible aussi d'associer une géométrie ou de simuler la fiabilité des barrières, en choisissant les options concernées.

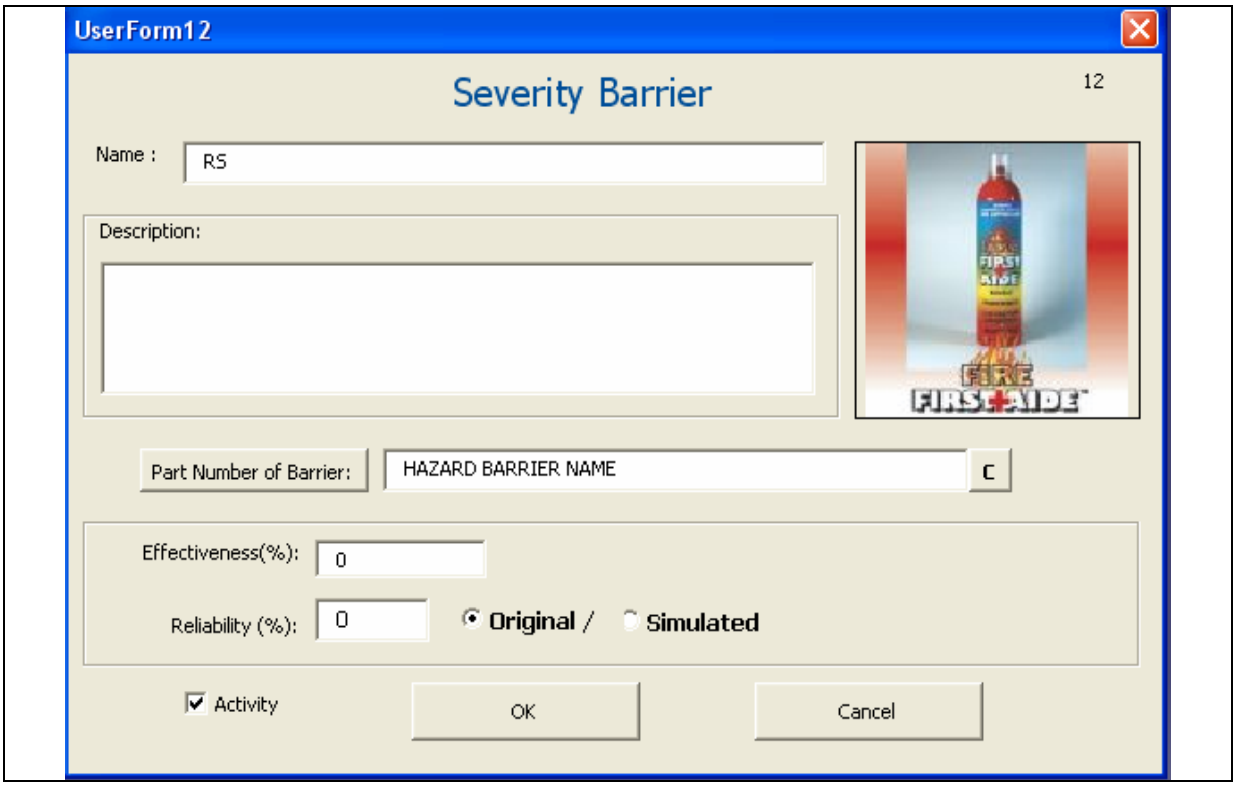


Figure 59. **Définition des paramètres d'une barrière de sévérité qui limite la sévérité d'un accident**

Les barrières de protection de la cible réduisent la vulnérabilité de la cible contre le danger.

Figure 60. **Définition des paramètres des barrières qui protègent une cible**

La figure 60 montre la boite de dialogue qui définit les paramètres de ces barrières.
Les paramètres d'une barrière de protection de la cible sont son nom et sa description, ses effets pour réduire la vulnérabilité de la cible, et la fiabilité de cette barrière. En choisissant l'option « Simulated », l'utilisateur peut créer une situation aléatoire pour la fiabilité de la barrière (« Vrai » ou « Faux »), en considérant la fiabilité proposée par l'opérateur.
Pour définir les processus de l'accident et calculer sa probabilité, on relie chaque risque à un arbre d'évènements. La figure 61 présente la boite de dialogue pour renseigner les paramètres d'un arbre d'évènements. Les paramètres sont le nom et la description de l'arbre, la probabilité (manuel – si on veut utiliser directement notre estimation, sans analyse de l'arbre).
En choisissant l'option « Calculated » on peut demander de faire analyse de l'arbre d'évènements pour calculer la probabilité, et l'option « Simulated » qui conduit à la création d'une situation aléatoire (« Vrai » ou « Faux ») pour le résultat final de l'arbre d'évènements.

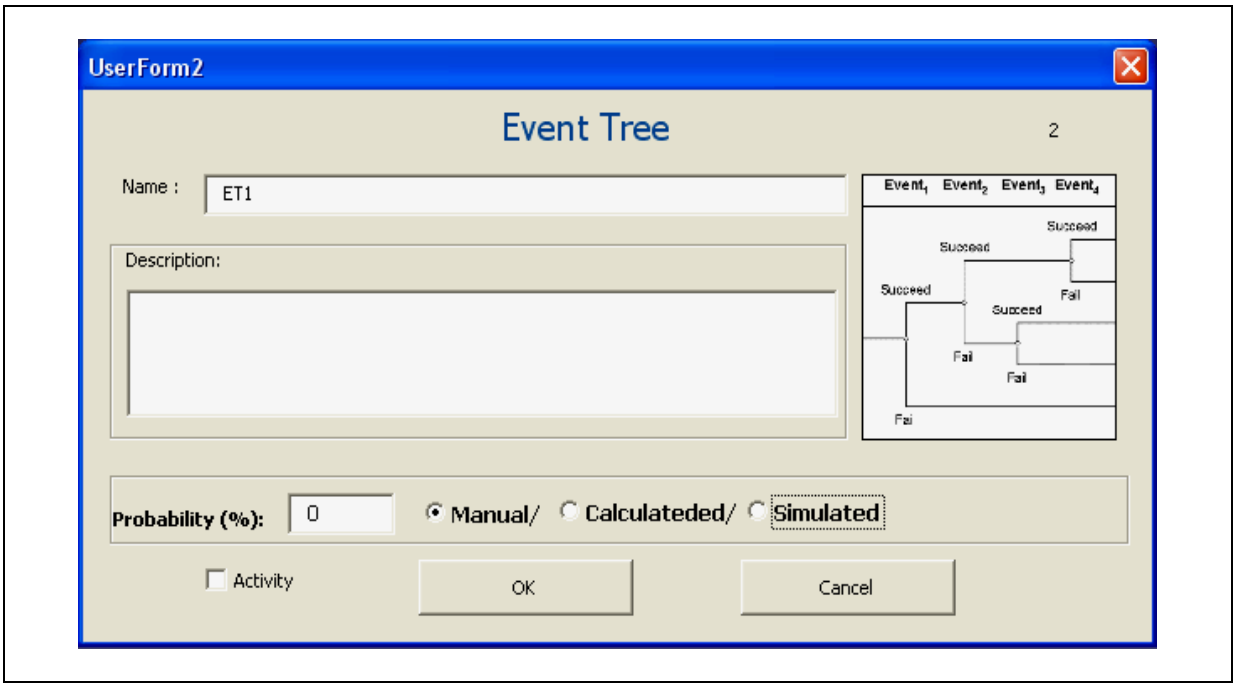


Figure 61. Définition des paramètres d'un arbre d'évènements

Cet arbre est construit par l'utilisateur en ajustant les éléments de l'arbre. Ensuite il définit les caractéristiques de chaque évènement en utilisant la fenêtre illustrée dans la figure 62. L'utilisateur définit le nom de l'évènement et sa description, et il peut choisir d'associer une probabilité à cet évènement. Il peut, aussi, simuler une occurrence aléatoire, considérant sa probabilité, cette option est utile pour développer, automatiquement, les scénarios possibles, mais encore imprévus.
Les effets de barrières sur les probabilités d'évènements, sont affectés dans l'arbre d'évènements. Dans ce cas on regroupe les barrières sous la forme de « Event Barrier Set » pour modéliser l'ensemble des barrières qui sont utilisées pour empêcher l'occurrence de chaque évènement.

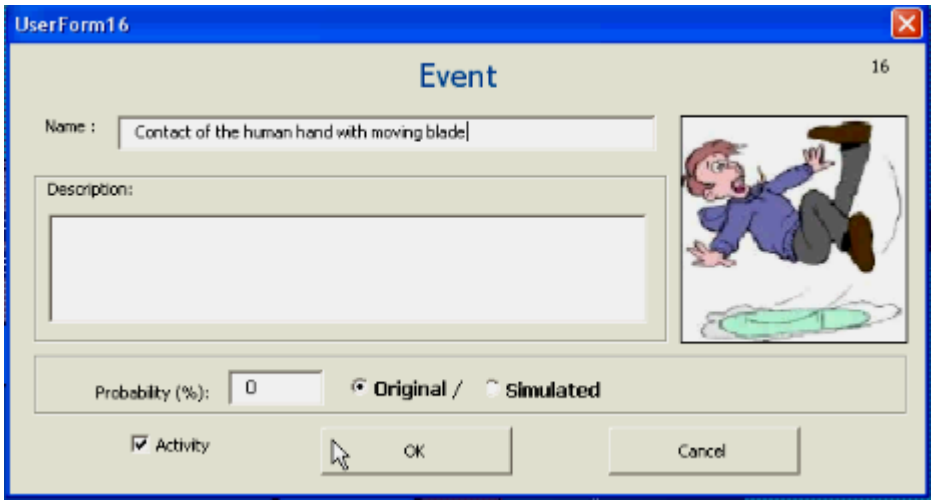


Figure 62. Définition des paramètres des évènements dangereux

Cette structure nous permet de considérer les relations entre les barrières.
Les barrières dans un ensemble, peuvent être complémentaires, sous la forme de barrières en série ou remplaçables, sous la forme de barrières en parallèle, avec des disponibilités définies par l'utilisateur. Cette structure est une forme évoluée du diagramme bloc standard, utilisé pour faire l'analyse de fiabilité.

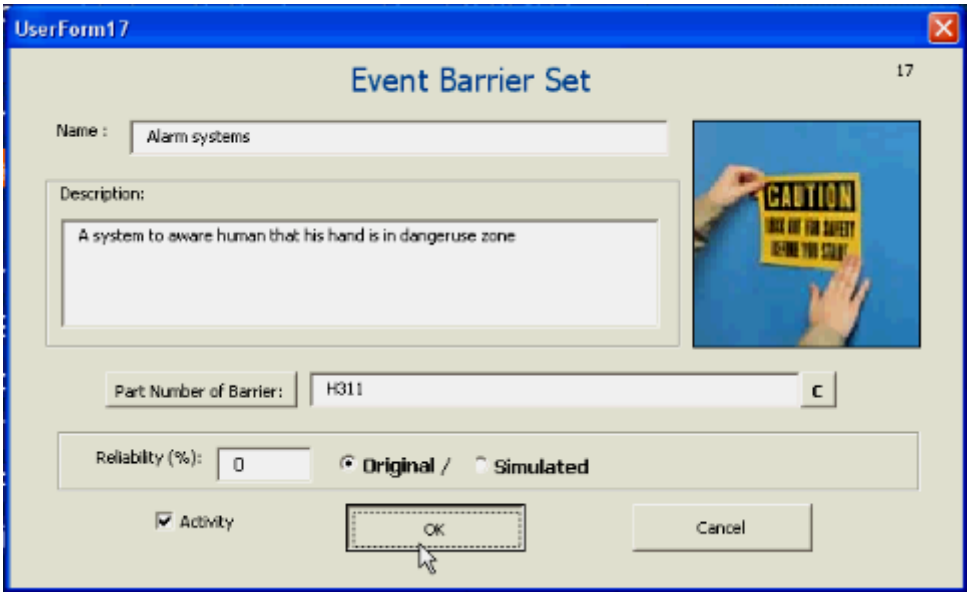


Figure 63. Définition des paramètres de l'ensemble de barrières d'un évènement dangereux

La faisabilité d'un « ensemble de barrières » est calculée en appliquant les règles utilisées pour analyser la fiabilité avec le diagramme bloc pour chaque « ensemble de barrières ».
La Figure 63 montre la fenêtre de dialogue pour définir les caractéristiques des ensembles de barrières.

En plus du nom et de la description pour l'ensemble de barrières, en sélectionnant l'option « Part Number of the Barrier » on peut associer aux barrières un élément géométrique, dans l'environnement 3D.
La notion de « Reliability » pour l'ensemble de barrières, concerne la fiabilité des barrières pour empêcher l'évènement, s'il est disponible. En choisissant l'option de « Simulated » on peut créer des cas aléatoires pour l'ensemble de barrières, en considérant sa disponibilité, proposée par l'utilisateur.
Pour créer les arbres de barrières d'évènements, on utilise le copier/coller que l'on a adapté pour les éléments de l'arbre de spécification.
La fenêtre de dialogue, illustrée dans la figure 64, est utilisée pour définir les paramètres des barrières d'évènements.

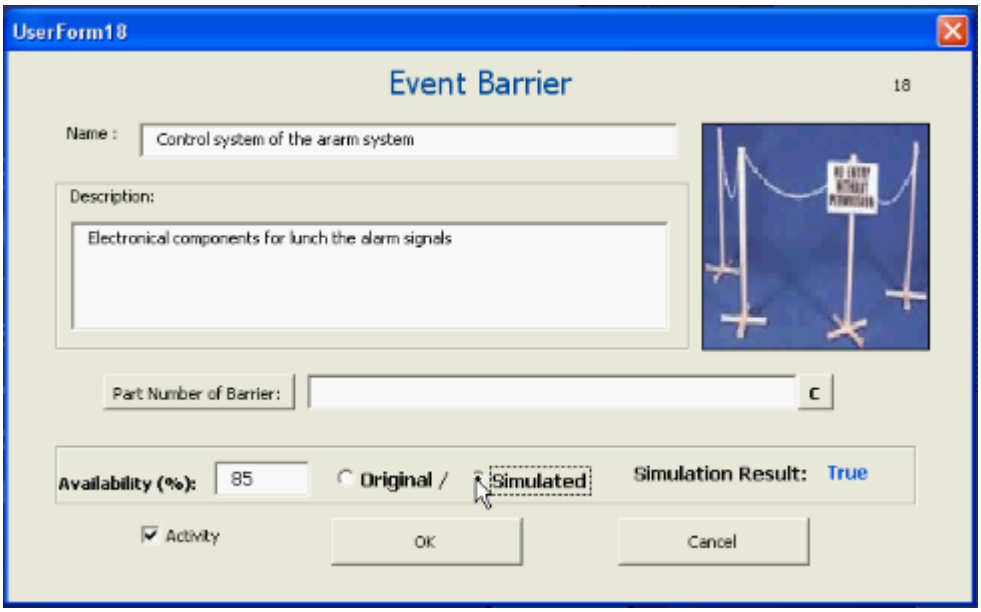


Figure 64. Définition des paramètres d'une barrière d'évènement

L'utilisateur propose le nom et la description de la barrière, et il est possible qu'il associe une géométrie à la barrière.
En utilisant l'option « Simulated », une situation aléatoire est créée, en considérant la disponibilité de la barrière. Cette option, qui peut être vraie ou fausse, indiquant ainsi la disponibilité ou non de la barrière, est utilisable pour développer les scénarios aléatoires.
La figure 65 présente la boite de dialogue qui définit les paramètres d'une zone de danger. Ces paramètres sont seulement son nom et sa description.
Pour définir la géométrie de la zone dangereuse et l'appliquer lors de la simulation, il faut définir la partie de « Fuzzy Spaces », dans l'arborescence de la zone dangereuse.
Ensuite, on définit les barrières de zone, qui sont des barrières qui réduisent la distribution des dangers dans l'environnement. La Figure 66 présente la boite de dialogue pour définir ce type de barrière. Les paramètres de cette barrière sont son nom et sa description, et l'objet associé à la barrière dans l'environnement 3D.

Figure 65. Définition des paramètres d'une zone de danger

L'effet de barrières sur la zone de danger doit être appliqué par l'utilisateur en définissant une géométrie à cet effet et utiliser les fonctions géométriques nécessaires pour appliquer l'effet de la barrière sur la modification de la zone de danger.

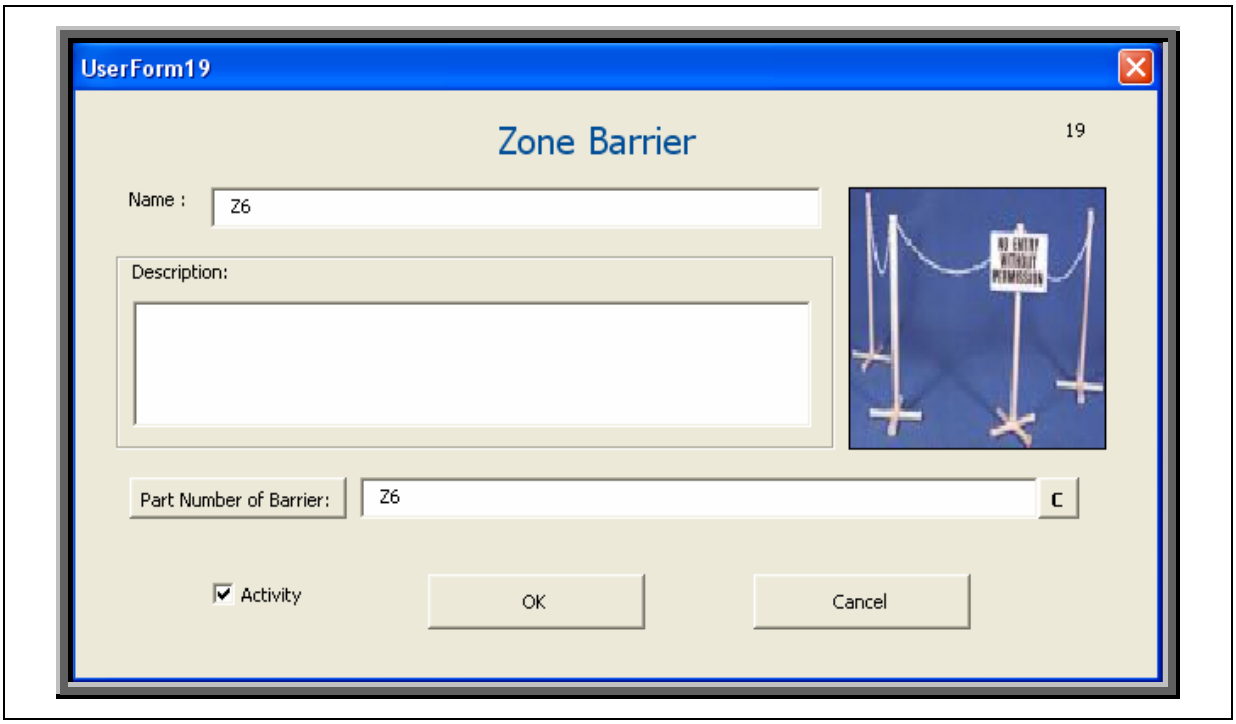


Figure 66. Définition des paramètres d'une barrière de zone de danger

En utilisant ce système, l'utilisateur insère les entités de risques, et définit leurs paramètres. En utilisant Visual Basic, un outil d'analyse est développé pour faire des analyses de risque quantitives. L'analyse quantitative de l'arbre d'évènements et de la fiabilité de barrières est appliquée pour calculer la probabilité de risque.

L'analyse de probabilité se fait d'abord en calculant les effets de l'ensemble des barrières sur les évènements. La Figure 67 montre la fenêtre de dialogue, qui présente les résultats des calculs concernant les ensembles de barrières d'évènements.

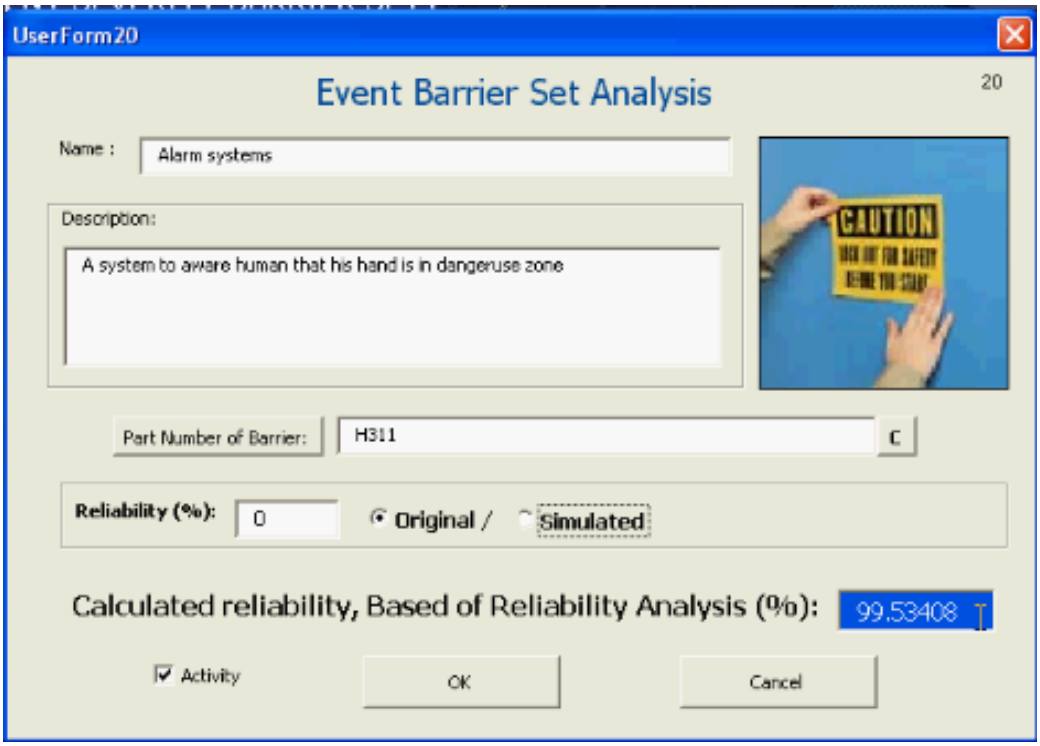


Figure 67. Définition des paramètres des évènements dangereux

Ensuite, l'analyse de l'arbre d'évènements nous permet de calculer la probabilité de chaque risque, séparément.
Cela permet aussi d'analyser le risque en utilisant les numéros aléatoires pour simuler les situations imprévues, mais probables.
Calculer la sévérité peut se faire en considérant, seulement, les caractéristiques des dangers, des cibles et des barrières.
Dans un niveau plus détaillé, cette analyse peut être faite lors de simulations pour considérer les positions et les paramètres dynamiques de danger, des cibles et des barrières, en considérant leurs déplacements et changements de paramètres.
Dans ce mode, le concept d'espace flou est appliqué pour déterminer les zones dangereuses bi et tridimensionnelles, utilisées pour déterminer la sévérité de dangers lors de la simulation de mouvements ou le changement dynamique de système, dans l'environnement 3D.

4. Analyses d'énergie

Dans cette section, les concepts d'énergie et de barrière sont étudiés et une approche est présentée pour prédire les processus d'accidents et identifier les barrières critiques.
Dans ce modèle, présenté dans (Shahrokhi et al., 2006f), un accident est défini comme une série d'événements comprenant l'échec de la commande et celui des barrières protectrices, qui résultent de l'exposition d'une cible à un agent nocif. Une méthode de modélisation de barrière, les « réseaux de barrières », est présentée, qui est applicable pour évaluer la probabilité et la sévérité du risque des accidents en employant la fiabilité et l'efficacité des barrières, comme des paramètres connus.
L'analyse d'énergie est une méthode simple, qui est exécutée par l'évaluation des risques liés aux énergies identifiées et pour proposer des actions correctives. L'avantage de l'analyse d'énergie est qu'elle dépend de l'information à un niveau relativement brut et peut être exécutée à une phase amont du projet (Kjellén et al., 1995).

4.1. Méthodologie

Selon (Hollnagel, 1999), un accident peut être décrit comme un ensemble de barrières qui ont échoué, dont le résultat est un transfert d'énergie à la cible.
Un échec de barrière est l'arrêt de la capacité d'une barrière à exécuter sa fonction exigée (Rausand, 2005b).

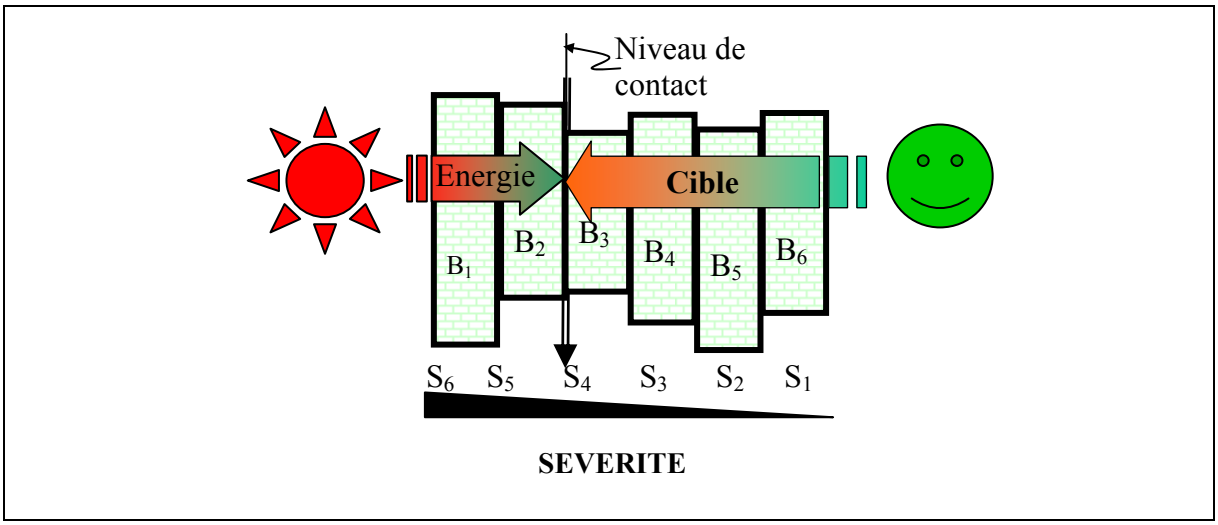


Figure 68. Modèle de processus d'accident comme défaillance de barrières

Vu ces définitions, comme illustrées sur la figure 68, pour qu'un accident se produise, les barrières devraient être cassées par l'énergie et/ou par la cible. Pour la simplicité d'imagination, ce processus peut être modélisé comme une progression d'énergie et de la cible l'une vers l'autre, au milieu des barrières. Dans ce cas, le contact de l'énergie avec la cible se produit à un point intermédiaire. Les effets des barrières selon la vue d'énergie et la vue de cible sont différents. Dans la vue d'énergie, en cassant les barrières, généralement la quantité d'énergie et donc son potentiel pour endommager est réduit, cependant, dans la vue de cible, quand il y a fracture d'une barrière, la cible est moins protégée, et donc la probabilité et la sévérité de dommages potentiels augmentent. Ceci signifie que l'effet de surmonter une barrière, sur le risque, est dépendant de la façon dont, et par quel agent, elle est cassée. Par exemple il y a une différence entre des cas où un opérateur enlève, volontairement, son casque de sécurité, avant l'impact d'un objet dangereux avec sa tête, et le cas où le casque de

sécurité est cassé par l'énergie de l'objet dangereux. Dans les deux cas cette barrière est surmontée, toutefois dans le premier cas, l'opérateur expose sa tête directement à l'énergie dangereuse, donc le risque d'accidents augmente, et dans le deuxième cas, l'énergie effectuée est réduite avant contact avec la tête de l'opérateur, et nous pouvons espérer que les dommages seront limités.
L'approche proposée est basée sur la distinction de regard de l'énergie et de la cible sur les barrières.
Pour chacun de ces deux cas, un réseau de barrières sera développé et les points de contact possibles seront identifiés. Ensuite, en utilisant la simulation numérique, la probabilité et la sévérité de contact seront calculées pour estimer les index de risque.

4.2. Ensemble de barrières d'énergie

Normalement, pour empêcher les accidents, le concepteur met en place plusieurs barrières. Particulièrement dans les systèmes présentant des risques importants, il y a plusieurs dispositifs de sécurité mis en place pour empêcher des accidents de se produire (Harms-Ringdahl, 2003b). En plus, des risques peuvent mériter plusieurs barrières, à plusieurs niveaux ; par exemple, les systèmes d'avertissement sont rarement efficaces sans procédures et formation. (Clemens, 2002). La probabilité qu'un événement accidentel mène aux conséquences non désirées dépendra, donc, de ce que ces barrières fonctionnent ou pas (Rausand, 2005d).
Aucune barrière n'est efficace à 100%. Les barrières, bien que présentes et en place, peuvent encore échouer. Les barrières physiques s'usent et les barrières procédurales peuvent se détériorer par le contrôle faible de changement (Trost et al., 2004), de ce fait il est rarement acceptable d'avoir seulement une barrière. Le nombre de barrières exigées pour chaque écoulement d'énergie dans n'importe quel environnement donné de travail dépend (Trost et al., 2004) :

(a) de la fiabilité de la barrière utilisée, et
(b) du degré de sécurité requis.

Pour accumuler les effets de multiples barrières, il faut définir leurs attributs.
(De Dianous et al., 2006) présente l'attribut du « niveau de confiance » d'une barrière, qui peut être considéré comme synonyme de la fiabilité de barrière. Selon lui, la probabilité de l'échec de chaque barrière est liée au niveau de confiance (De Dianous et al., 2006), et la sécurité totale dépend de deux critères :

(a) le premier, qualitatif (contraintes architecturales),
(b) le second, quantitatif (probabilité d'échec dangereux).

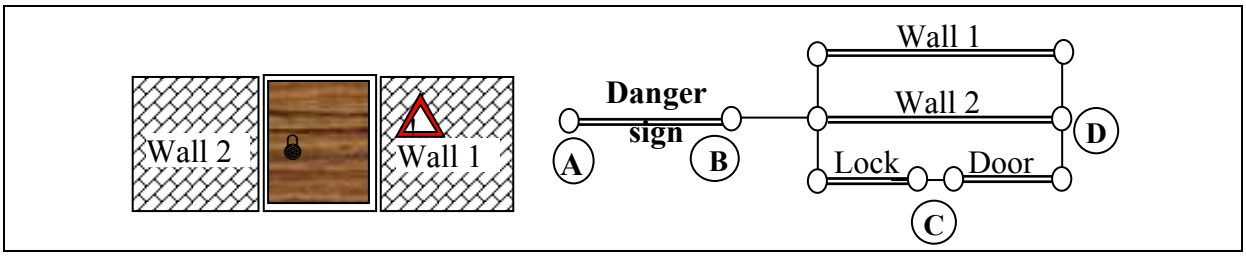


Figure 69. **Un exemple de barrières en série et parallèles**

Il a simplement considéré que le niveau de confiance de la fonction de sécurité est le plus petit niveau de confiance de ses différents sous–ensembles (De Dianous et al., 2006).
Dans le modèle discuté, quand les barrières sont considérées dans une structure série, ceci signifie que les barrières se succèdent les unes aux autres, cependant, pour modéliser des cas

pratiques des structures plus compliquées sont nécessaires. Comme le montre un exemple schématique, dans la figure 69, quatre types de barrières sont illustrés : (1) deux murs, (2) une porte, (3) une serrure, et (4) un signe de danger. Le signe de danger est en série avec toutes les autres barrières, et la serrure est en série avec la porte. Toutefois les murs ne sont pas en série avec la porte et sa serrure, parce qu'on n'est pas obligé de passer les murs avant ou après le passage par la porte.
Les murs sont en parallèle (complément) l'un avec l'autre. Une structure parallèle de barrières se sera cassée si au minimum une de ses barrières s'est cassée.
On suppose que l'efficacité d'une barrière est seulement une fonction de l'agent nocif qui lui est affecté.
La fonction d'insuffisance de la barrière k, f^k, représente l'agent nocif croisé avec la barrière k, basée sur l'énergie affectée à elle.
Généralement, des ensembles de barrières sont employés pour atténuer les effets dangereux ou pour protéger la cible. Des réseaux de barrières, y compris les barrières séries et parallèles, sont présentés pour modéliser l'accumulation des effets de barrières. Dans une structure série, afin d'affecter l'agent nocif à la cible, cet agent devrait croiser toutes les barrières. On considère qu'une barrière peut fonctionner correctement ou échouer ou être non disponible. Dans le premier cas l'efficacité de la barrière est considérée en fonction de l'énergie affectée, et dans le deuxième cas la barrière n'a aucun effet sur le système. Dans ce cas-ci l'agent nocif affecté pour chaque barrière, dans une structure série de barrières, est le reste de l'agent nocif, qui est une sortie de la barrière précédente, séquentiellement, et la réduction successive d'agents nocifs, après application de n barrières séries, est déterminée par un calcul récursif comme :

$$\chi^k = f^k(\chi^{k-1})r^k + (1 - r^k)\chi^{k-1}$$

où χ^0 est l'agent nocif affecté aux premières barrières, et χ^k, pour k=1,..,n, est l'agent nocif résultant après avoir croisé la barrière k. La variable aléatoire de Bernoulli, r^k, traduit le bon fonctionnement de la barrière, avec la distribution de probabilité suivante :

$$P(r^k = 1) = R^k$$

R^k est la probabilité que la barrière k est disponible et marche bien, au moment de l'occurrence du scénario étudié.
Dans un ensemble de barrières parallèles, l'agent nocif peut croiser chacune des barrières, et l'ensemble des barrières échouera en échouant pour chacune des barrières. Les barrières parallèles sont reliées par des portes « OU ». Selon le rôle des barrières, le concepteur détermine le genre de portes « OU » comme fonctions de « somme limitée » ou de « maximum » :

$$\chi^n = \underset{n}{Max}\left\{f^k(\chi^0)r^k + (1 - r^k)\chi^0\right\}$$

$$\chi^n = Min(\sum_n f^k(\chi^0)r^k + (1 - r^k)\chi^0, \chi^0)$$

D'autres types de fonctions peuvent aussi être définis pour accumuler les effets des barrières. Ces fonctions sont employées pour calculer toute l'efficacité de l'ensemble de barrières parallèles, basée sur l'inefficacité de chacune des barrières.
Le facteur de dommages est calculé selon les effets de mitigation / contrôle de barrières. Une mesure d'importance, considérant la fiabilité et l'efficacité des barrières, est développée permettant de mesurer les conséquences d'enlever chacune des barrières de la configuration. La mesure d'importance de la barrière k est calculée comme :

$$I_k = \sum_m (R_l^{+k} - R_l^{-k})$$

Pour calculer cette mesure, les accidents doivent être mutuellement exclusifs, et l'union de tous couvre tous les résultats indésirables possibles.

4.3. Discussion sur l'analyse d'énergie

On suppose que les barrières peuvent échouer indépendamment. L'indépendance implique que l'échec d'un composant n'a aucune influence sur les autres composants (RAU 2005e). Cette supposition est inadmissible là où il y a des causes communes d'échec pour des barrières. Dans ce cas-ci la méthode de calcul liée à la fiabilité des barrières devrait être adaptée selon les règles de probabilité conditionnelles. Pour la simplicité, l'efficacité de barrière est considérée seulement en fonction de l'énergie appliquée, et les effets d'autres paramètres comme les conditions environnementales, la variation de l'efficacité de barrière, et la fiabilité dans le temps, sont négligés Toutefois le modèle demeure valide également en considérant d'autres paramètres. Les effets d'affecter plus d'un agent nocif aux barrières ne sont pas étudiés. Il est possible que dans certains cas, l'amplitude de l'agent nocif augmente après qu'il ait passé une barrière, par exemple en débloquant de nouveaux matériaux dangereux. Dans ces cas, l'effet protecteur de la barrière peut être considéré comme une valeur négative. Le mode du contact n'est pas modélisé.

Si plus d'un paramètre est nécessaire pour caractériser le risque, la définition de la structure des réseaux de barrières et le calcul des quantités efficaces de paramètres devraient être effectués séparément. Les risques, produits par les barrières elles-mêmes, ne sont pas modélisés.

Un événement accidentel peut mener à une large gamme de conséquences, s'étendant du négligeable au catastrophique. Un feu peut, par exemple, être très rapidement éteint et donner des conséquences mineures ou bien mener à un désastre. Dans quelques applications la sévérité d'une conséquence moyenne d'un événement accidentel est évaluée. Dans d'autres applications nous considérons plusieurs conséquences possibles, y compris la plus mauvaise conséquence prévisible de l'événement accidentel (Rausand, 2005i).

Dans la pratique, les différents événements de base peuvent représenter différents modes d'échec ou l'indisponibilité d'un composant simple ; afin de déterminer l'importance d'un tel composant on doit considérer tous les événements de base relatifs en tant que groupe (ZIO, 2004).

Dans ce travail, on a essayé de développer une méthode pour considérer différents scénarios, en les combinant. Elle est basée sur l'identification d'une gamme de conséquences pour des accidents, en considérant les différentes combinaisons pour la disponibilité de barrières.

Pour prouver la validité et l'applicabilité de ce modèle, il devrait être appliqué dans des cas réels pour l'analyse de la SDT.

5. Le modèle de zone de présence et la zone de danger

Cette section explique les bases théoriques d'un modèle d'identification des points faibles de la configuration de lay-out de la SDT. Cette méthode est applicable pour visualiser les éléments de risque et les barrières de protection comme profils géométriques évidents et visibles dans l'environnement tridimensionnel. Elle est basée sur l'analyse d'énergie /barrière, qui considère un accident comme un impact d'un agent nocif sur une cible, que nous effectuons comme une autre application d'utilisation du concept de zone de danger floue.

Des opérations mathématiques sont employées pour modéliser les effets des barrières d'atténuation sur les zones dangereuses. Une technique pour dessiner la carte de risque, dans l'environnement, est présentée. Cette carte illustre les points les plus dangereux dans le lieu de travail, en accumulant les effets des agents nocifs et des barrières protectrices. La

distribution de risque de dangers dans l'environnement est déterminée, en considérant les objets dangereux, les barrières et la présence de l'opérateur. Un index quantitatif de risque est présenté pour évaluer le risque et les effets des barrières, index qui totalise l'efficacité de prévention de risque dans le système. Ce modèle est appliqué pour visualiser les zones dangereuses, et les barrières matérielles et immatérielles, dans la plate–forme de simulation. Il est utilisé pour identifier les points de concentration de risque et pour évaluer leur intensité dans le lieu de travail.

5.1. Introduction

Le risque est une fonction de la probabilité et de la conséquence d'un événement indésirable (Jo et al., 2003). L'index de risque est calculé en multipliant la valeur de probabilité par la valeur de sévérité. Le calcul de l'index de risque implique de considérer un espace limité comme zone dangereuse. Généralement le concept de la zone dangereuse dans l'analyse de risque n'est pas suffisamment noté. En employant des cartes de découpe, (Hendershot, 1999) calcule le risque par superposition des zones d'impact, et pour la population de onze régions différentes.

(Gallego, 2004) a défini le degré d'occupation et le temps d'occupation, comme les variables linguistiques, pour modéliser la quantité de personnes qui peuvent être exposées à un agent nocif (AN). La zone dangereuse est produite par les agents nocifs. On utilise l'analyse d'énergie pour étudier les effets des agents nocifs sur les cibles. C'est une méthode simple, basée sur la définition de l'accident comme impact d'énergie (agent nocif) à une cible (HAS, 2003). La cible peut être une seule entité ou un groupe d'entités comprenant l'humain, l'équipement, le bâtiment, les matériels. L'analyse d'énergie est basée par l'analyse de barrière, qui décrit la barrière comme protecteur de la cible contre des agents nocifs ((Guldenmund et al., 2005) et (Livingston et al., 2001)). Les barrières sont employées pour ramener le risque de résultats indésirables à un niveau acceptable (NASA, 2003).

Considérer beaucoup de paramètres reliés aux cibles et barrières fait qu'il est très difficile de faire l'analyse de risque dans un processus complexe (Ru et al., 1996). Les systèmes flous montrent leur potentiel substantiel en adressant les limitations d'analyse de risque des approches conventionnelles (Ru et al., 1996). Ils sont employés de différentes manières dans le domaine de l'analyse de risque. L'emploi de la logique floue pourrait être utile, pour des procédés très complexes, quand il n'y a aucun modèle mathématique simple, pour des processus fortement non–linéaires ou si le traitement de la connaissance experte doit être exécuté (Hellmann, 2001).

(Guimaraes et al., 2004) et (Guimaraes et al., 2004) utilisent les systèmes d'inférence floue pour estimer le nombre prioritaire de risques en agrégeant les avis d'experts dans la méthode de l'étude des modes de défaillance et de l'analyse de leurs effets (FMEA). (Gallego, 2004) a appliqué le système de logique floue pour l'analyse d'acceptabilité de risques.

Une approche d'ensemble flou est développée par (Huang et al., 2001) pour intégrer des résultats d'évaluation d'erreur humaine dans le cas de l'analyse d'arbres d'évènements.

En même temps il y a de plus en plus d'attention pour appliquer l'analyse de risque dans les applications de conception.

5.2. Méthodologie

Une méthode pour calculer le risque en considérant les intersections de la zone de danger et de la zone de présence de l'opérateur, montre la proportion de risque en chaque point de la SDT. Cette méthode doit être accompagnée d'une analyse de l'arbre d'évènements, qui regroupe les évènements menant à la situation simulée. Pour s'accorder avec des régularités d'ensembles flous, on suppose que la zone dangereuse et les barrières reliées sont normalisées pour être dans l'intervalle [0,1]. D'une manière générale, la position de la cible (Target

Position, TP) est illustrée par une courbe. La TP peut être définie différemment pour les différentes sortes de cibles. Pour une cible ayant la position indiquée, la TP est définie comme (figure 70) :

$$TP(x)=\begin{cases} 1 & \text{pour } x=tp \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

Pour un groupe de cibles similaires, la TP représente la distribution de la population de cibles, dans la SDT. Finalement, pour une cible ayant des mouvements ou une présence aléatoire, la TP représente la distribution de probabilité de la présence de la cible dans les différents points. Lors de la simulation, la position de la cible et la position et l'amplitude de l'agent nocif peuvent être changées. Ces paramètres sont calculés pour chacune des séquences de simulation, séparément. Les poids des séquences sont définis par leurs durées. Comme l'illustrent les figures 70 et 71, l'impact de l'agent nocif est mesuré comme :

$$SS(x) = ZD(x)\ TP(x)$$

où x est la position de la cible, TP est la courbe de la présence de la cible et ZD est la courbe de zone dangereuse floue.

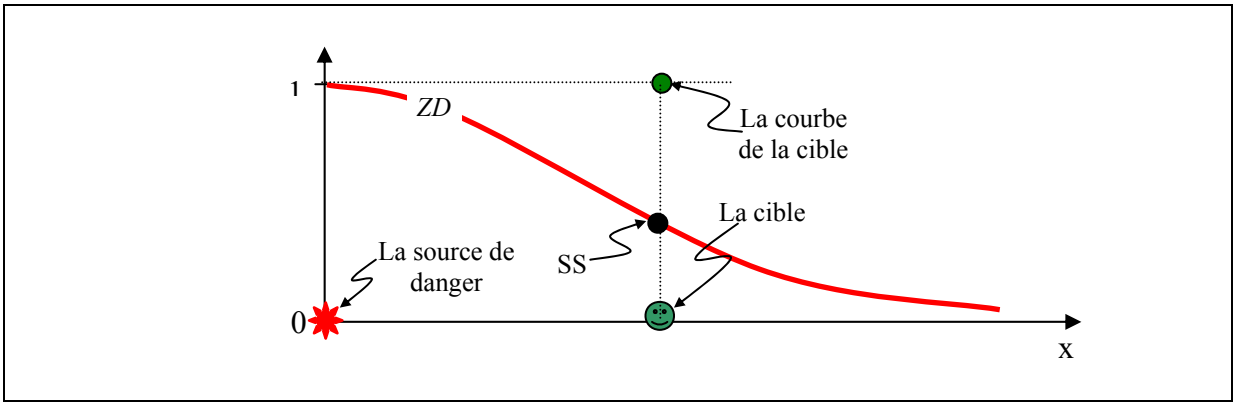


Figure 70. La présentation schématique de ZD, TP et SS à une dimension, pour une séquence de simulation spécifiée

Des dommages finaux pour chaque séquence sont mesurés en utilisant une fonction de dommages, qui est un système d'inférence floue, qui calcule les dommages de cible, selon l'agent nocif, la vulnérabilité de cible, le temps de séquence et la valeur de la cible.
Pour modéliser plusieurs dangers avec les mêmes effets dangereux, la zone dangereuse cumulée peut être calculée en utilisant l'union floue :

$$ZD=\bigcup_{i=1}^{n} ZD_i$$

La flexibilité dans le choix de l'union floue en tant qu'union standard (max(a, b)) ou d'autres formules, permet au concepteur d'adapter la méthode pour calculer l'accumulation des effets dangereux. Si les effets dangereux ne sont pas semblables, la sévérité devrait être calculée séparément pour les différents risques.

Dans ce modèle, on classifie les barrières dans les catégories suivantes :

1. Les barrières protectrices qui modifient la vulnérabilité de la cible ;

2. Les barrières de zone dangereuse (DB) qui empêchent la création ou la libération d'un agent nocif ou réduisent son danger. Elles modifient la zone dangereuse floue ;
3. Les barrières de cible (TB) qui empêchent l'intervention de la cible dans la zone dangereuse ou séparent l'agent nocif de la cible dans le temps. Elles sont modélisées en tant que modification de l'espace flou de position de cible ou sont impliquées dans l'arbre d'évènements qui montre l'évènement qui mène à des conditions simulées. Les barrières qui sont considérées dans l'arbre modifient la probabilité des accidents, et donc ne sont pas discutées ici.

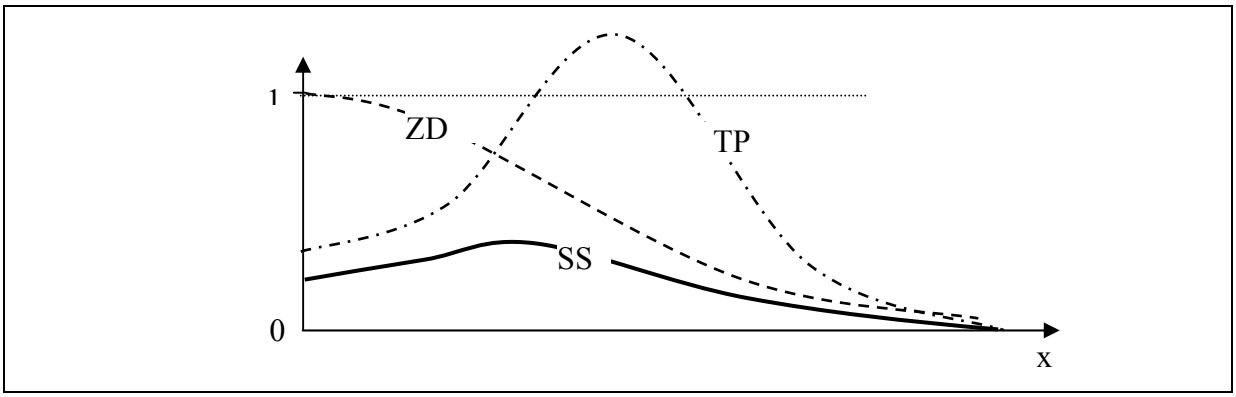


Figure 71. Une présentation schématique de zone dangereuse (ZD), de zone de présence (TP), et de risque (SS) dans un espace mono–dimensionnel

Les rôles des barrières qui jouent plusieurs rôles en même temps, doivent être modélisés séparément. Les effets des barrières de la première catégorie, seront considérés dans la formule de calcul de conséquence de l'impact. Les barrières des deux autres catégories, réduisent l'amplitude du ZD ou du TP en tout ou partie de la zone dangereuse. Ces effets de barrières peuvent être modélisés par les espaces flous.

Les figures 72.a, 72.b, et 72.c sont des barrières de danger (ZB) qui modélisent les cas suivants :

(a) Une barrière de protection, qui réduit 60% de la nocivité de danger ou la conséquence de l'accident produit par ce danger

(b) Un mur, qui protège une part de la zone avec le niveau d'efficacité de 80%

(c) Un système qui neutralise les effets dangereux dans une zone limitée avec une efficacité localisée.

Les barrières de cible (TB) sont illustrées dans les figures 72.d, 72.e, et 72.f :

(d) Un détecteur qui identifie (et empêche) la présence de la cible dans une zone limitée avec le niveau de fiabilité de 80% ;

(e) Le mur protecteur qui empêche la présence de la cible dans quelques parties de la zone ;

(f) Une barrière qui réduit 0,30 de la probabilité de l'accident.

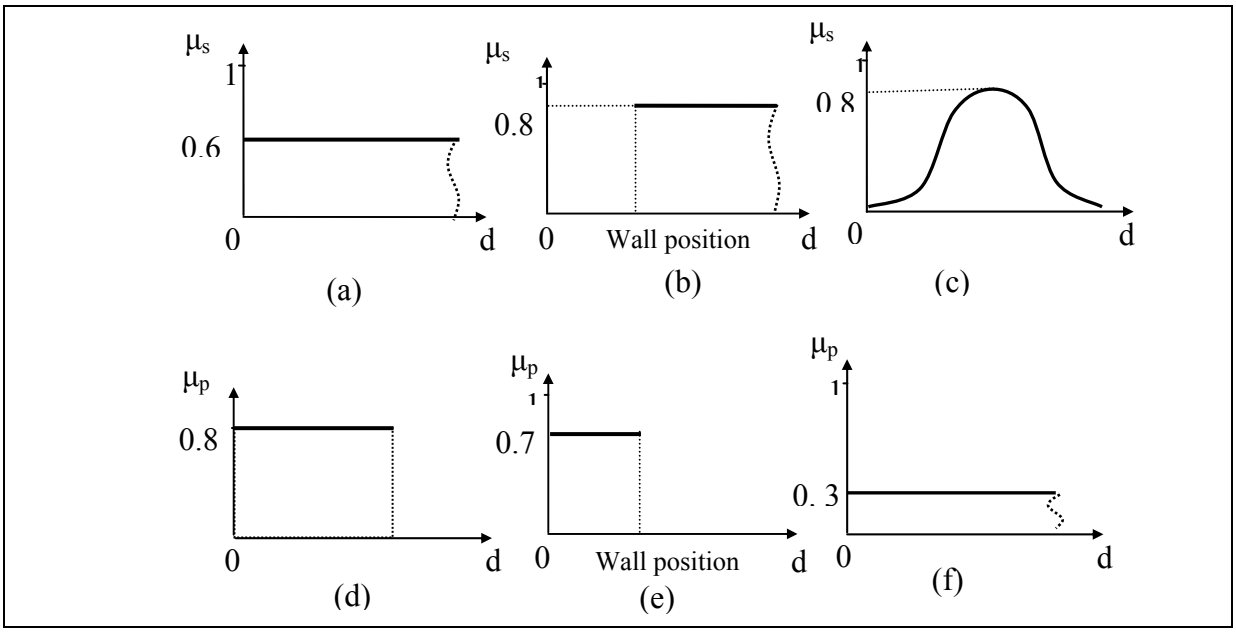


Figure 72. Quelques illustrations schématiques de barrières de danger (a, b, c) et de barrières de cibles (d, e, f)

Quelques barrières peuvent avoir des effets sur la ZD et la TP simultanément, par exemple, comme montré sur les figures 72.b et 72.e, les barrières peuvent modéliser des effets du même mur de protection sur le ZD et le TP respectivement.

Des opérateurs de logique floue, tels que la conjonction, la disjonction et la négation (complément), peuvent être employés pour combiner les propositions (Babuska, 2002).

Les effets de barrière sont additionnés, en utilisant l'union floue :

$$EZB = \bigcup_{i=1}^{n} ZB_i$$

$$ETB = \bigcup_{j=1}^{m} TB_j$$

EZB et ETB sont respectivement la barrière efficace de zone dangereuse et la barrière efficace de cible. La définition pour l'union floue est changée en accord avec la coexistence des barrières. L'union standard (max(a, b)), et la somme limitée (min(1, a+b)) conviennent à plusieurs des cas. L'union de somme limitée est appropriée si les effets des barrières sont cumulatifs, et la méthode standard d'union peut être employée si ces effets ne sont pas cumulatifs. La zone dangereuse et la zone de présence efficace sont calculées respectivement comme :

$$EZD = ZD \cap \neg EZB$$

$$ETP = TP \cap \neg ETB$$

L'opérateur ¬ signifie l'opération de complément flou (PAS flou). Le complément flou standard (¬a=1-a) est l'une des méthodes de complémentation floue les plus appropriées, toutefois l'autre méthode floue de complément peut être choisie en accord avec les effets de protection des barrières.

En utilisant EZD et ETP, la sévérité de séquence RF est calculée comme :

$$RF(x) = EZD(x) \cap ETP(x)$$

Comme exemple en mono–dimension pour une séquence indiquée, nous considérons la zone dangereuse et la zone de présence, illustrées sur la figure 73.

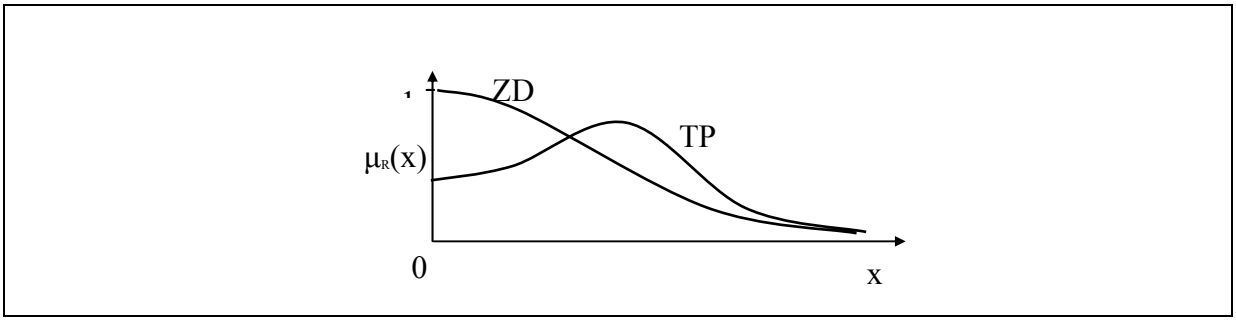


Figure 73. ZD et TP de l'exemple 1

Les barrières représentées sur la figure 74.a sont sur la zone dangereuse et les barrières représentées dans la figure 76.a sont appliquées sur la zone de présence. La méthode d'union de somme limitée est employée pour déterminer EZB et EPB, et la méthode d'intersection de produit est employée pour déterminer l'espace flou de risque. Les figures 74 à 78 présentent le processus de calcul de risque.

En utilisant cette méthode, une zone de risque dans le lieu de travail est déterminée comme association des degrés d'appartenance des points du lieu de travail dans la zone de risque. En comparant le système avec et sans chacune des barrières, son effet sur la zone de risque floue peut être évalué. Un index de risque peut être défini comme :

$$RI = \int_0^{\infty} RF dx$$

Pour calculer le risque du système, il faut appliquer les facteurs de mise en échelle.

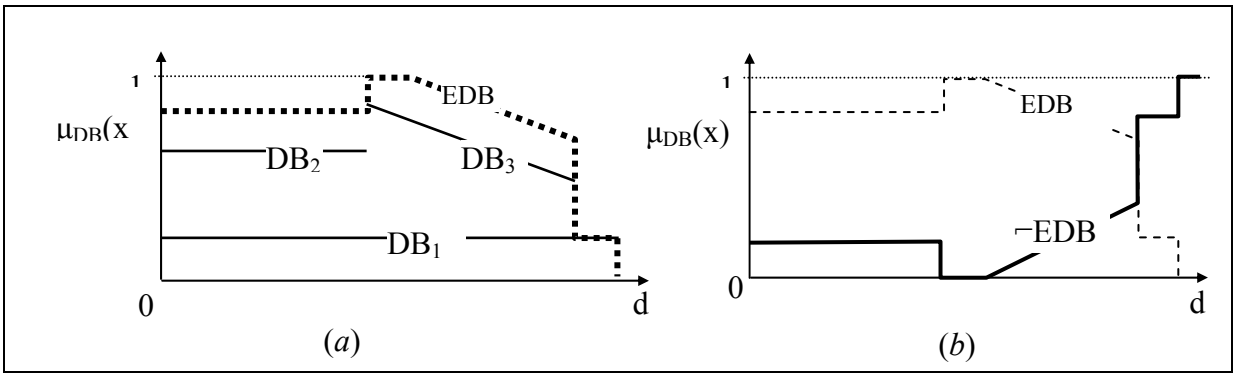


Figure 74. (a) Barrières de zones dangereuses (DBi), et barrière de zone dangereuse effective (EDB), (b) complément de zone dangereuse effective (¬EDB) de l'exemple 1

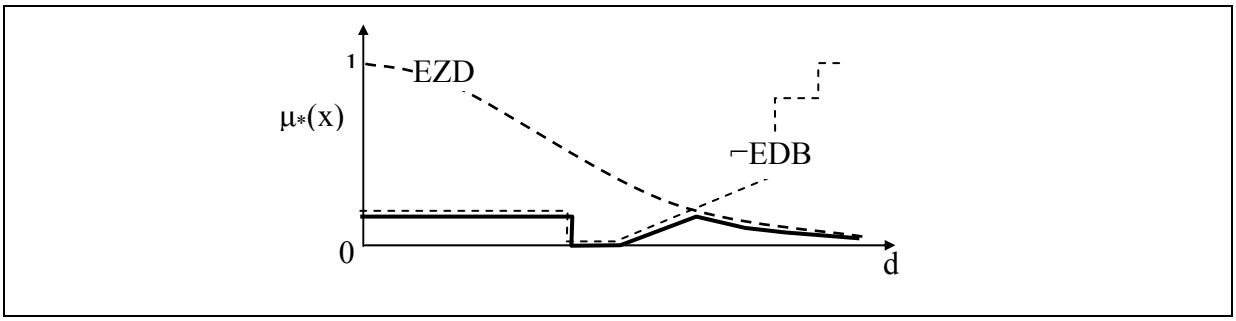


Figure 75. **Espace flou EZD calculé à base de min (ZD, EDB)**

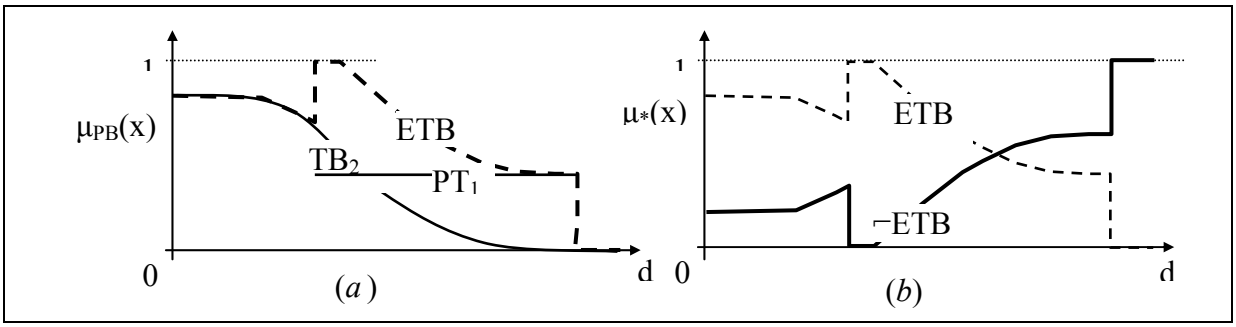


Figure 76. **(a) Barrière de présence (TB*) et barrière effective de présence (ETB), (b) complément de barrière effective de présence (¬ETB) dans l'exemple 1**

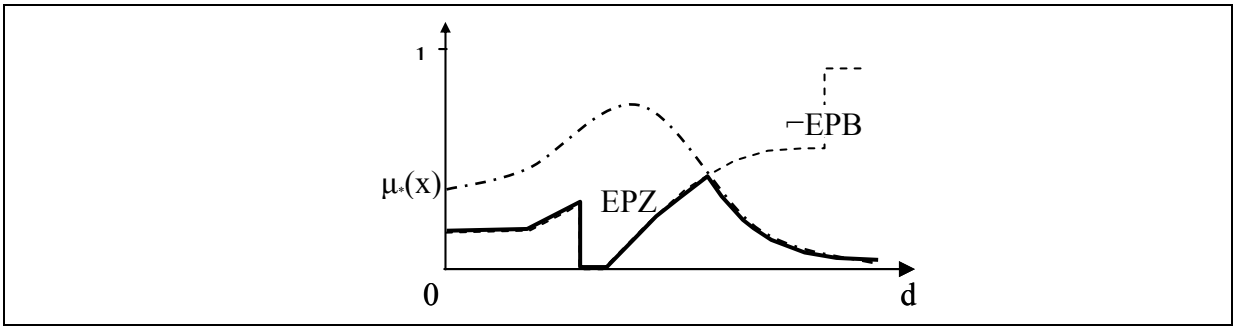


Figure 77. **Espace flou EPZ (ligne pleine)**

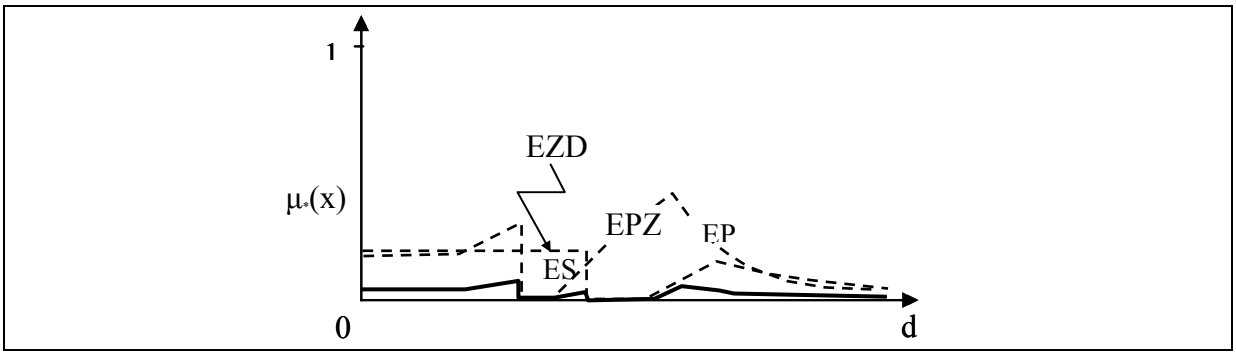


Figure 78. **Fonction de risque (RF) calculée à base de EZD∩EPZ**

5.3. Discussion sur la zone de présence et la zone de danger

Cette approche est une méthode graphique pour représenter les entités d'analyse de risque. Elle essaye de simplifier la complexité des méthodes traditionnelles d'analyse de risque en prenant les avantages des systèmes flous. L'adaptabilité des opérations floues fournit une grande flexibilité pour utiliser le modèle par rapport aux situations typiques. La méthode peut être développée pour analyser un ensemble de risques pour un groupe de cibles, en appliquant les opérations floues. Les barrières matérielles et immatérielles peuvent être modélisées par la même approche graphique. Le modèle est un outil de communication et d'analyse, parce qu'il peut être employé directement dans les plates–formes tridimensionnelles de conception.
Cependant, les prétentions liées au mode d'impact, y compris la direction d'impact, dans ce modèle, ne sont pas robustes et suffisantes. Beaucoup d'autres modèles d'analyse de risque comme l'analyse d'énergie /barrière, ont la même faiblesse.
On peut affecter la durée de la présence de la cible, dans la courbe de la zone de présence, implicitement. Dans ce cas, la relation linéaire entre les dommages et le temps d'impact est présumée. Cependant en définissant la zone de présence comme densité de population, la modélisation de temps d'impact pour chaque cible est ignorée. Comme beaucoup d'autres méthodes d'analyse de risque, il n'y a aucune prétention au sujet d'autres attributs de mode d'impact.
La validité du modèle concerné, pour modéliser le mode d'impact, dépend des caractéristiques spécifiques du système. La zone dangereuse est présentée comme la région nocive. Si la nocivité ou la position de la source de danger n'est pas stable, une zone dangereuse mobile et dynamique sera créée. Dans ce cas-ci les principes fondamentaux des théories sont valables, seulement pour des temps séparés de séquences de simulations. Le domaine de temps semblable et synchronisé devrait être considéré pour définir la zone dangereuse et la zone de présence.
Ce modèle peut être employé pour calculer les index cumulatifs de risque pour un groupe de cibles et de risques. En utilisant cette méthode une zone de risque flou dans le lieu de travail est déterminée, et une fonction de présence stochastique représente la distribution de la probabilité de la présence de la cible dans les divers endroits.

6. Analyse de point d'accumulation de risque

Dans un processus de conception de SDT, les concepteurs optimisent des aspects technico–économiques du modèle, en respectant les instructions et des standards de sécurité. Malgré l'importance de l'analyse de risque, elle est, généralement, mal placée dans le processus de conception parce que l'analyse de risque prend beaucoup de temps et a besoin de beaucoup d'information (figure 79).
Nous avons développé une technique, présentée dans (Shahrokhi et al., 2004c), pour aider à identifier les facteurs affectant le plus la sécurité du système, pour attirer l'attention sur la sécurité et les actions à mener afin de concevoir un système plus sûr.

6.1. Analyse de risque lors de la conception

Lors de la conception, respecter les standards de sûreté peut être une manière efficace de réduire le risque d'accidents, mais ce n'est pas une garantie pour avoir « un risque aussi bas que raisonnablement praticable (ALARP) ». ALRAP peut être adoptée, d'une manière défensive, seulement par l'analyse quantitative de risque (Rasche, 2001). Cela veut dire qu'il s'agit de faire comprendre les processus des accidents et d'estimer les probabilités et les conséquences des accidents.
On dit souvent qu'il serait idéal que la prévention d'accidents soit intégrée dans la conception du système de production, contrairement à la modification et à la réparation du système

existant et de l'addition des nouvelles barrières (Khan et al., 1998). Un problème pour appliquer les mesures de sécurité lors de la conception est le manque d'information concernant les points les plus critiques du système, car dans la phase de conception la sécurité n'est pas définie d'une manière explicite, distincte, et sans ambiguïté.
Pour résoudre ce problème, de nouvelles méthodes d'analyse de risque doivent être spécialement développées afin qu'elles soient assez raffinées pour qu'elles ne soient pas insignifiantes, mais assez simples pour s'appuyer seulement sur les caractéristiques essentielles du vrai système (Harms-Ringdahl, 2003a).

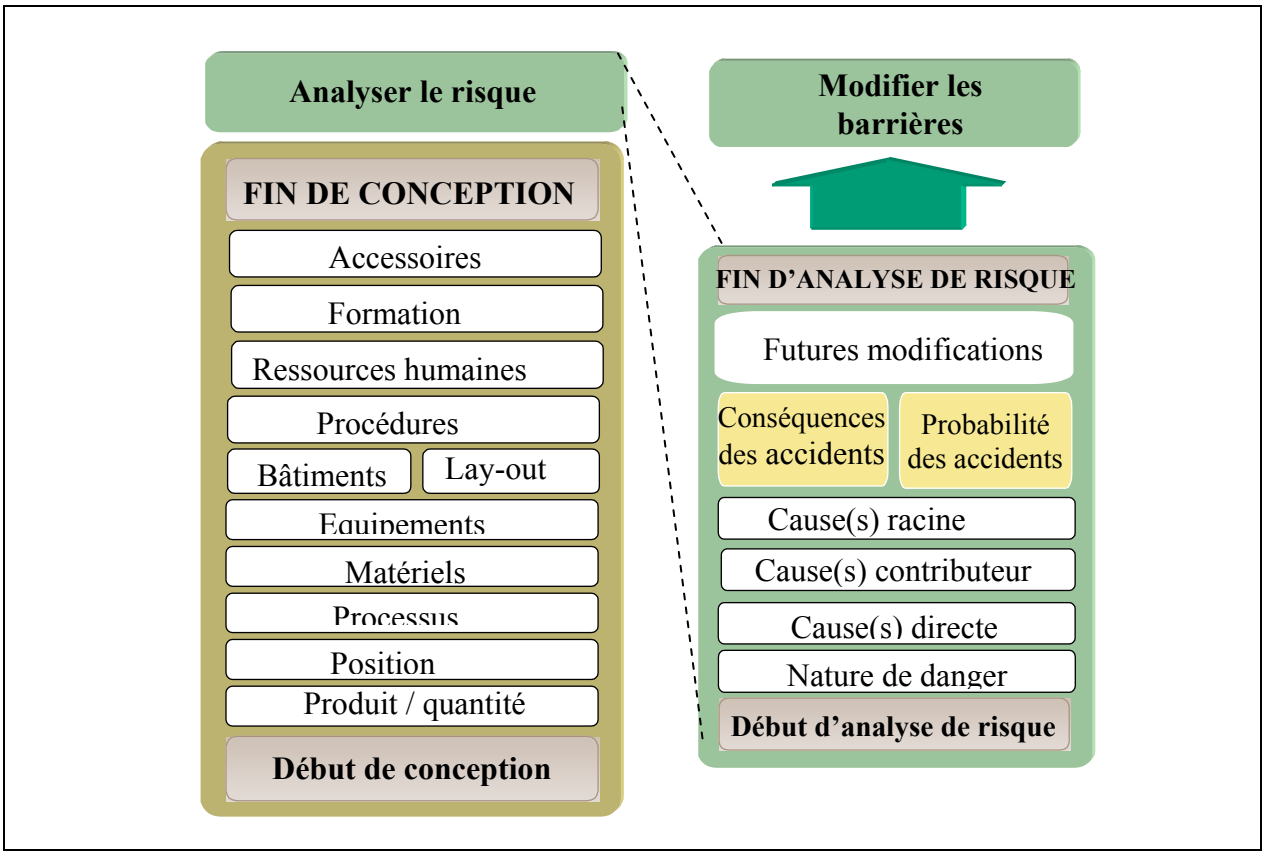


Figure 79. Le déroulement de la conception et de l'analyse de risque

Pour un groupe de cibles semblables, la TP représente la distribution de la population de cibles dans le lieu de travail.
Un autre problème principal est le manque de connaissance et de motivation des concepteurs et des planificateurs du fait d'un coût et d'un temps d'analyse de risque élevés (Gupta, 2002).
(Khan et al., 1998) s'appuie sur la proposition de Berge en 1993, d'utiliser le modèle «basé sur un scénario» lors de la conception, mais une telle méthode peut avoir besoin de manière excessive de temps, de coût, et d'experts.

6.2. L'espérance de risque

Le risque est défini comme une fonction de la probabilité d'un événement supérieur indésirable (accident) et de ses conséquences dans la limite des dommages possibles à la propriété, à l'environnement, et aux gens ((Jo et al., 2003) et (Labodova, 2003)).
Un événement peut être classifié comme accident s'il est inattendu, inévitable et fortuit (Khan et al., 1999). La majeure partie des modèles considèrent les accidents comme le résultat d'une chaîne ou d'une séquence d'opérations. L'analyse de risque implique la simulation du futur, et

est un procédé systématique pour identifier et évaluer des risques et des caractéristiques de sécurité (Harms-Ringdahl, 2003a).
Généralement l'évaluation des risques comprend deux étapes : évaluation de la sévérité et évaluation de la probabilité.
Cependant le calcul de probabilité est une étape qui a besoin de considérer les combinaisons des évènements intermédiaires qui peuvent résulter des accidents. Notre étude est reliée au concept d'effet de barrières sur les probabilités des événements et les risques totaux du système.
Un des concepts importants pour présenter la méthodologie proposée est « le risque conditionnel ». Selon notre définition, si nous employons la probabilité des évènements en sachant certaines informations, comme les probabilités des évènements ou les effets des barrières sur eux, alors, le risque estimé sera conditionné par ces informations. Par exemple s'il y a une fuite dans le réservoir d'air comprimé, nous estimons que nous aurons soit un accident avec la probabilité de 0.01 et un coût de 2000€ ou un autre accident avec la probabilité de 0.03 et un coût de 4000€. Cependant nous ne mettons pas en jeu la probabilité de la fuite dans le réservoir, en supposant que nous savons que la fuite est arrivée. Le risque prévu exact de la fuite sera calculé comme :

$$E\left[R(A)\middle|F\right]=\sum_{Ai} Cost\,(Ai)P(Ai|F)$$

Dans cette équation, les Ai représentent des accidents, F est l'événement pré–assumé (la fuite de l'air), et E[R(A)|F] est la valeur espérée du risque des accidents, en sachant que l'évènement pré–assumé est arrivé. Les accidents sont supposés mutuellement exclusifs.
Selon cette définition, si on considère une série d'évènements mutuellement exclusifs, Fi, alors le risque total du système peut être calculé, en considérant différents scénarios, par :

$$E\left[R(A)\right]=\sum_{Fi}\left\{\sum_{Ai} Cost(Ai)P(Ai|Fi)\right\}*P(Fi)$$

Dans notre exemple :

$$E\left[(R(A)\right]=\{(2000*.01+4000*.03\}p(F)$$

$$E\left[R(A)\right]=140*P(F)$$

Dans ce cas, on a une image du risque final, relié à la probabilité de l'évènement F, et comme un cas spécial, si on sait que l'évènement F est arrivé, alors :

$$E\left[R(A|F)\right]=E[R(A)]=140$$

Ceci signifie que si nous savons qu'il y a une fuite dans le réservoir, la valeur prévue du risque est 140€, mais nous ne connaissons pas encore la probabilité de la fuite.
Ces sortes d'informations ne sont pas très utiles pour appliquer les méthodes d'analyse de risque conventionnelles, car ces méthodes recherchent les probabilités des événements et leurs conséquences. Par contre, elles peuvent être de grande importance pour le concepteur pour le guider à identifier les évènements les plus critiques.
En effet, lors de la conception, le concepteur modifie le risque avec le choix du matériel et du processus de fabrication et d'autres paramètres du système.
Il faut noter que pour les évènements mutuellement exclusifs, lors d'une modification de conception reliée juste à un évènement particulier, le risque conditionnel reste indépendant de la conception. Par exemple le concepteur peut choisir de meilleurs matériaux pour réduire la probabilité de la fuite, mais dans tous les cas, si une fuite apparaît, dans le réservoir, le risque conditionnel prévu est toujours140€. Cette stabilité de risque conditionnel est très importante pour réduire la période et le coût d'analyse de risque.
Dans des procédés de conception industrielle, dans les majeures parties de temps nous savons si une série de causes est arrivée, quels accidents peuvent se produire, et nous avons de bonnes estimations de la sévérité de ces accidents. En plus, nous pouvons avoir la bonne prévision « de la probabilité conditionnelle » des accidents.

La majeure partie du temps, l'information rapportée reliée à des accidents en industrie, présente des risques conditionnels.
Par exemple les statistiques annuelles, classifiées par "l'Organisation Internationale du Travail (l'OIT)", démontrent les accidents, classifiés par lieu, l'agent matériel, le processus de travail, les industries et ainsi de suite, ce qui veut dire qu'en utilisant ces informations, on applique des conditions aux accidents, bien que ces conditions sont très préliminaires. En plus, la majeure partie des analyses d'accidents est concentrée sur la recherche des causes et des conditions des accidents. Ces résultats peuvent être utilisés pour connaître les conséquences des accidents dans les situations et des conditions similaires.

6.3. Méthodologie

Pour optimiser le risque, lors de la conception, en plus de respecter les règles et les standards, les critères d'ALRAP doivent être appliqués, mais dans la conception de nouveaux équipements, il n'y a aucun niveau préexistant de risque de base (Tam et al., 1996), donc les méthodes complémentaires sont nécessaires, pour guider le concepteur à appliquer ses ressources pour réduire efficacement le risque total du système.
On a proposé la méthode de point d'accumulation de risque avec l'objectif pour identifier les risques les plus importants d'accidents, et les paramètres qui les influencent, et de guider vers des études plus précises si elles sont nécessaires.
D'autres objectifs peuvent être :

- formaliser l'évaluation des experts et regrouper les informations concernant les risques, très tôt dans la phase de conception ;
- capitaliser les expertises ;
- améliorer les communications de risque entre les analyseurs de risque et les concepteurs et les autres personnes impliquées dans le système de production pendant la durée de son cycle de vie.

L'arbre d'évènements est un outil pour représenter l'ensemble des évènements et des conditions qui peuvent mener aux accidents, sous la forme d'un arbre. Dans cet arbre, les accidents sont représentés dans les derniers niveaux des branches, et le chemin à suivre pour chaque accident, jusqu'à l'évènement « racine », représente les situations et les conditions nécessaires pour mener à chacun des accidents.
On essaye d'avoir un regard systémique, en supposant que chaque évènement ou condition du système est le résultat forcé de paramètres. Cette définition ne nous empêche pas de considérer la probabilité des évènements, car nous savons toujours qu'il y aura des informations sur les mécanismes des évènements qui restent inconnues, et cela donne des degrés de liberté à l'évènement. En résumé, on essaye de créer des modèles paramétriques du système pour expliquer les suites d'évènements à partir de sa situation actuelle.
De cette façon nous définissons plusieurs concepts qui sont « le point d'accumulation de risque », les « paramètres » et « positions », et nous développons le graphe des maillons critiques en tant qu'outil pour identifier des points d'accumulation de risque.

6.3.1. Graphe de maillons critiques

Dans le processus de conception de SDT, pour améliorer la sécurité, nous devons chercher les événements ou les conditions critiques, ayant les plus grandes influences sur la sûreté du futur système. Nous les avons appelés « les points d'accumulation de risque » et nous les définissons comme : « les événements ou les conditions qui, s'ils existent, feront qu'un risque d'un ou de certains des accidents sera haut et si nous les supprimons, la sécurité du système sera fortement améliorée ». Nous avons développé la technique d'analyse de point d'accumulation de risque pour identifier ces points.

Après avoir identifié les points d'accumulation de risque, le concepteur pourrait essayer de les empêcher, et s'ils ne sont pas évitables, choisir les barrières pour limiter leurs effets indésirables. Nous supposons que le risque d'accidents dépend de situations et de conditions du système, celles que nous avons appelées brièvement des « paramètres ». Les paramètres du système influencent la sévérité et/ou la probabilité et donc le risque des accidents. Ce peut être la description du système de gestion, des ressources humaines, des solutions techniques, des matériaux et des énergies, des conditions et de l'environnement de travail. On peut même ajouter les effets et les influences du monde extérieur et les événements naturels. Nous notons les paramètres par P^i_j, (j=1,2,..,m) ,(i=1,2... n).
Les différentes situations du système peuvent être illustrées par changement des valeurs ou des descriptions des paramètres, dans les domaines définis pour les « positions » des paramètres, et P^i_j représente la position j pour le paramètre i.
Par exemple "moins de 0°", "[0°, 20°]", et "plus de 20°" peuvent correspondre à diverses positions du paramètre de température, ça veut dire les valeurs qu'il peut prendre.
L'autre concept important est « l'ensemble de coupe minimum », qui est n'importe quelle combinaison possible des positions, qui, quand elles se produisent simultanément, peuvent mener à l'accident (un événement supérieur) (Jo et al., 2003). De son coté, un accident est une situation spécifique, expliquée par des paramètres du système, une suite d'occurrences d'un ensemble de coupe minimum d'évènements appelés « les évènements dangereux ».
Le graphe de maillons critiques (GMC) montre la combinaison variée des situations, qui peuvent causer l'accident(s), sous la forme d'une série de valeurs pour les paramètres nommés « positions ».
Nous l'avons appelé le graphe de maillons critiques parce qu'il est composé de plusieurs pièces, reliées, qui forment une série. En plus, comme les maillons, les points d'accumulation de risque doivent être renforcés. En utilisant ceci, nous pouvons montrer diverses positions, et les accidents portés par elles. Ce graphe est produit en utilisant des arbres d'évènements.
Nous pouvons prendre les mêmes informations, directement, en utilisant l'arbre d'évènements, mais, développer un GMC est utile pour éviter des erreurs logiques sur l'indépendance statistique des événements, et pour regrouper les informations dispersées dans un format plus compact.
La figure 80 montre un arbre d'événements et la figure 81 présente le GMC, extrait de l'arbre.

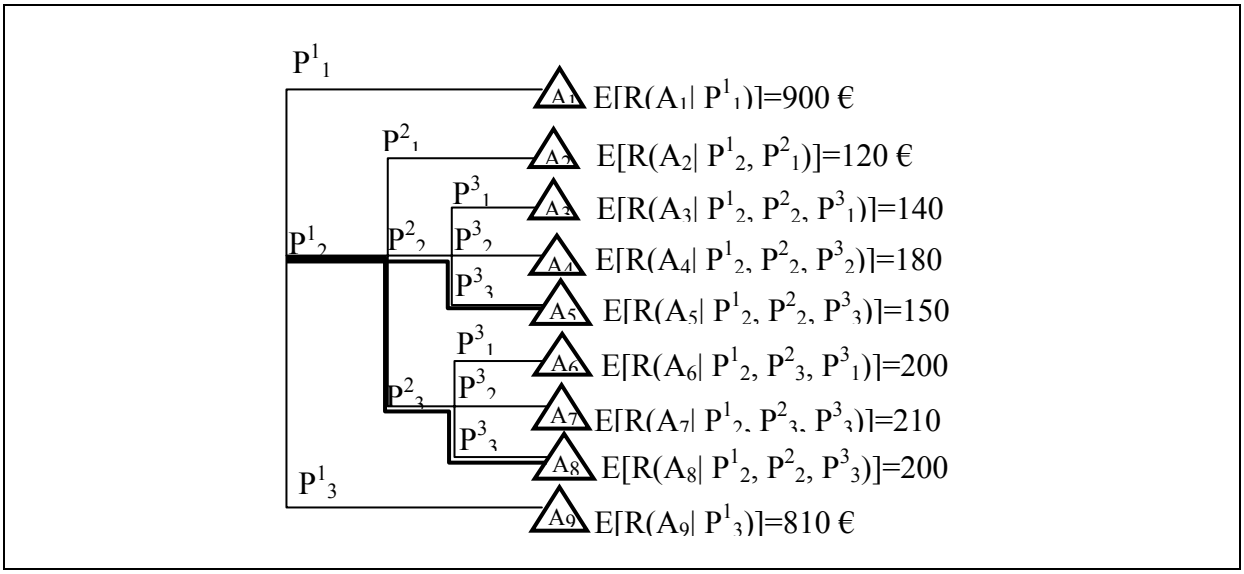


Figure 80. Un exemple d'arbre d'événements

Dans la GMC, on calcule tous les risques conditionnels, qui peuvent arriver, pour chaque position de paramètres, séparément.

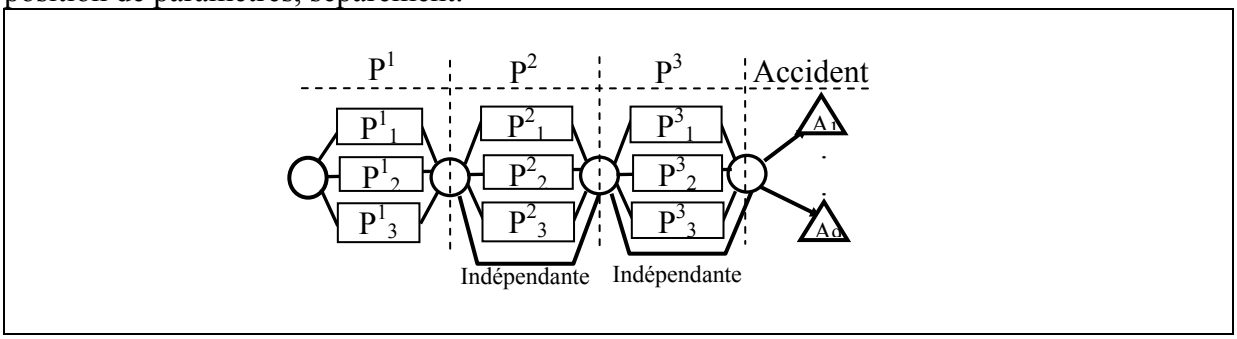


Figure 81. Un exemple de GMC

En fait, un GMC peut être un résultat extrait de quelques arbres d'événements, mais il ne montre pas les relations logiques entre les causes, c'est un outil pour analyser plusieurs accidents, en même temps. Il a une nature cumulative, donc nous pouvons construire un résultat total d'une certaine analyse d'arbre d'événements dans un GMC. Dans ce graphe, pour chaque paramètre, nous considérons une colonne et les positions possibles pour ce paramètre, sont présentées comme rectangulaires, dans ces colonnes. Des triangles sont employés pour montrer des accidents, résultant de ces situations. L'ordre des paramètres dans ce graphique n'est pas important. En plus, les positions « indépendantes » sont employées quand la position des paramètres n'a aucun effet sur la sévérité ou la probabilité d'accidents.
Ce graphe est construit en utilisant l'arbre d'événements. Par exemple, dans l'arbre d'évènements de la figure 80, il est évident qu'il y a plus d'accidents qui passent par la position P^1_2 que par la position P^1_1.
En effet, la valeur totale de risques conditionnels, amenée par P^1_2 est 1200€ contre 900 € pour P^1_1. Donc si on empêche P^1_2, on a réduit 1200€ de la valeur espérée de risque total, contre 900€ de réduction de risque si on empêche la position P^1_1. On va mettre ces valeurs dans la GMC pour toutes les positions (figure 82). L'application de GMC, sera évidente comme on accumule les valeurs de réduction pour les évènements dans différentes parties de l'arbre d'évènements ou quand on accumule plusieurs arbres d'évènements dans une seule GMC. Par exemple pour P^3_3 on devrait calculer la somme de 150 € et 200 € pour des accidents A5 et A8.

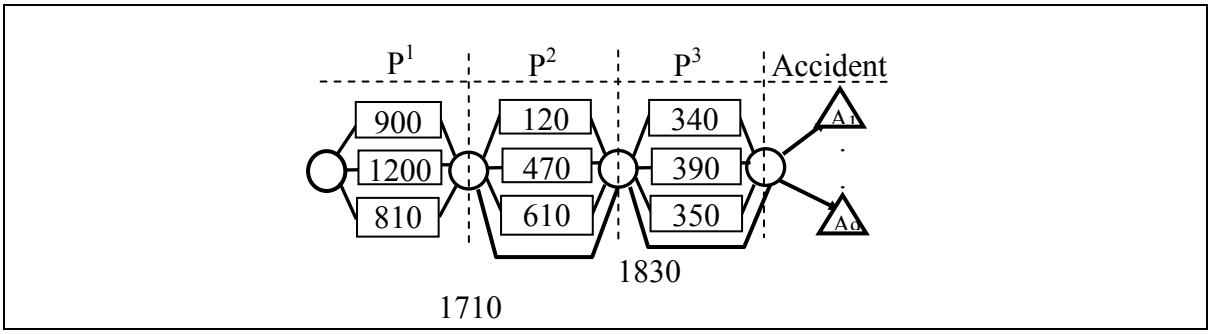


Figure 82. L'exemple de GMC instancié

Le choix des positions pour les empêcher, ne dépend pas seulement des valeurs calculées pour le risque conditionnel, elles dépendent aussi de la faisabilité pratique d'appliquer les mesures de sécurité. Il est important que le graphe GMC ait un ensemble complet de paramètres qui influence les risques des accidents, mais aussi ils doivent comprendre tous les accidents influencés par un ou plusieurs des paramètres mentionnés dans le graphe.

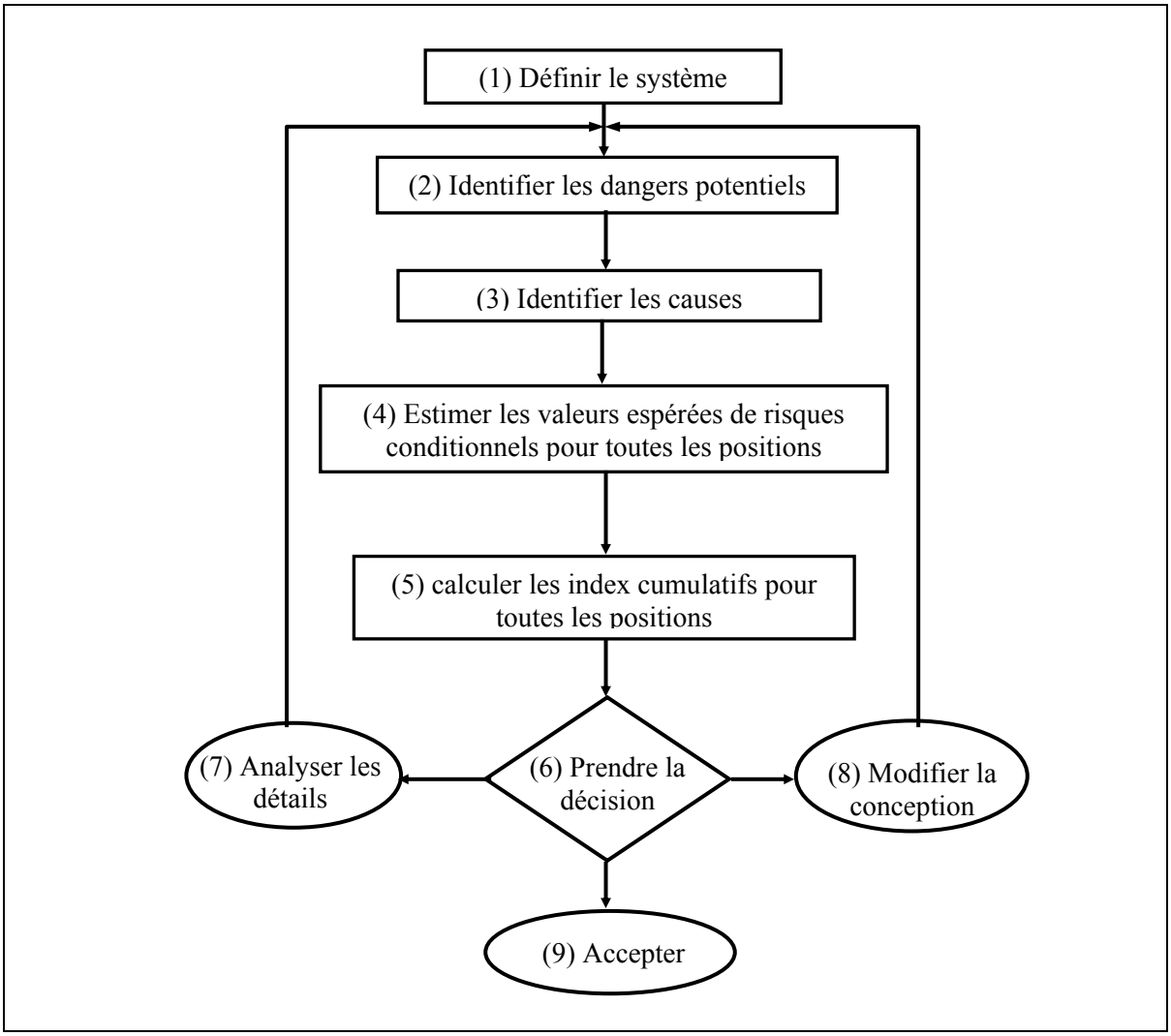


Figure 83. Déroulement du processus d'analyse de points d'accumulation de risque

6.3.2. Algorithme d'amélioration

Dans la méthode de point d'accumulation de risque en utilisant la technique d'analyse d'arbre d'événements, nous calculons le risque conditionnel final d'accidents conditionnés par diverses positions. Le but d'employer l'arbre d'événements est de trouver les ensembles de coupe minimum. Alors, par le GMC, nous pouvons identifier des points d'accumulation de risque. Mais chaque fois qu'on applique une mesure de sécurité, la valeur espérée d'un ou de plusieurs risques se modifie, alors pour identifier les nouveaux maillons critiques, il faut mettre à jour les arbres d'évènements et modifier le GMC correspondant. La figure 83 illustre le déroulement du processus de la méthode d'analyse de points d'accumulation de risque.

7. Optimisation de trajectoire

Le problème de conception de disposition (lay–out) est défini comme une méthode par laquelle des positions des points de cible sont indiquées dans l'environnement entourant un humain (Kim, 2004). Dans ce problème, généralement sont données les dimensions et les gammes de mouvement d'une personne, on l'exige pour localiser un certain nombre d'objets dans l'environnement tels qu'une fonction de coût indiquée est optimisée (Iowa, 2005).

Le problème d'optimisation de trajectoires consiste, de manière générale, à rechercher dans un environnement encombré, le chemin le plus court entre le point initial et la cible parmi les obstacles.
Cette section présente un effort pour déterminer la trajectoire optimale de mouvement d'opérateur (chemin) dans un environnement dangereux. Comme cela est expliqué dans (Shahrokhi et al., 2006c), en utilisant la méthode de programmation dynamique, une approche est présentée pour trouver la trajectoire optimale pour un opérateur qui marche dans le lieu de travail en réduisant au minimum à la fois le risque et la longueur cumulée de son trajet.
Ce modèle est un exemple de considération simultanée des aspects d'analyse de performance et de risque, pour l'utiliser dans le système intégré de modélisation de comportement de l'homme.
Les zones dangereuses sont considérées comme ensembles flous, et le risque au long de la trajectoire est évalué en considérant le degré d'appartenance des organes du corps de l'opérateur dans la zone de danger, pour toutes les séquences de mouvements. Cette méthode peut être employée pour déterminer les chemins optimaux par les concepteurs des situations de travail.
La forme de base des problèmes d'optimisation de trajectoire est la recherche du chemin le plus court, d'un point initial à un point cible, dans un environnement encombré. L'objectif est de trouver la longueur et le risque minimaux du transport ou du mouvement, en considérant les obstacles. Une variété de techniques d'optimisation basées sur les techniques de modélisation multi–agents, la programmation dynamique, le « soft computing » et la méthode analytique d'optimisation sont développées (Ranta, 2004). Trouver la trajectoire est un problème complexe (par exemple des solutions possibles infinies, le temps de résolution inacceptable), essentiellement intéressant pour trouver la trajectoire d'un avion dans les espaces à trois et quatre dimensions (Ranta, 2004) (Hagelauer et al., 2004). Des algorithmes génétiques sont employés pour la planification optimale de mouvement dans l'espace pour un robot, où quelques inter–nœuds ont été choisis et leurs paramètres et le temps de déplacement de chaque segment de trajectoire ont été codés et optimisés (Iowa, 2005).
Pour examiner une collision possible entre un manipulateur et des obstacles, (Solteiro Pires et al, 2004), on a discrétisé la structure de bras à l'aide de plusieurs points et ces points sont analysés afin de vérifier s'ils sont à l'intérieur de n'importe quel obstacle ou pas (Solteiro Pires et al, 2004).
Dans le contexte industriel, la planification de trajectoire de robot a été largement étudiée. Cependant, pour des humains, la planification de trajectoire est complexe et exige une analyse et une attention particulières. Tandis que des barrières dans la zone de travail accessible entourant un humain ont été tracées, le franchissement de ces barrières dans diverses conditions n'a pas été adressé (Iowa, 2005).
Basé sur la technique multi–agents, (Chedmail, 2003) présente une approche pour projeter la trajectoire de déplacement pour un mannequin dans la SDT virtuelle pour optimiser l'accès et la visibilité, en tenant compte des contraintes ergonomiques. En employant le réseau de neurones, (Bendahan, 2004) a développé un modèle adaptatif pour déterminer les mouvements du bras d'un opérateur pour atteindre et saisir l'objet prototype, évitant l'obstacle. Comme modèle de prévision de mouvement pour l'action d'éviter d'obstacle, (Gopinath et al., 2004) a développé un modèle géodésique pour définir la courbe minimum de distance entre deux points, sur une surface encombrée avec des obstacles.
Les majeures parties d'études d'optimisation de trajectoire de mouvements d'humains sont faites pour l'analyse de détail des mouvements et des postures humaines (Iowa, 2005), en considérant les paramètres ergonomiques, cinématiques et biomécaniques. Dans ce domaine, il y a eu beaucoup d'efforts de fait pour appliquer différentes techniques intelligentes telles

que le système (expert) basé sur la connaissance, des réseaux de neurones et la logique floue (Zha et al., 2003).
Par contre, dans nos recherches bibliographiques, aucune étude n'a été trouvée, concernant la recherche de la trajectoire de marche de l'opérateur dans un lieu de travail dangereux.

7.1. Les modèles d'optimisation

Trouver une trajectoire optimale dans un environnement encombré est un problème qui peut mener aux optimums locaux où la fonction objectif peut être non convexe (Ranta, 2004). Une méthode pour simplifier le problème est de considérer la trajectoire comme un polygone constitué par plusieurs points appelés « Shots », et si la trajectoire doit être très lisse, des interpolations de courbe lissée (par des modèles de types B–spline par exemple) peuvent être employées (Wang et al., 2004).
Pour simplifier le problème, dans ce modèle, la fonction de coût est une combinaison du risque et de la productivité.
On suppose que le risque total peut être défini comme le risque cumulé le long de la trajectoire du mouvement, et la productivité est évaluée en considérant la longueur de trajectoire. Le lieu de travail est modélisé comme plan cartésien bidimensionnel. L'axe horizontal (X) est défini en reliant les points de début et de fin de la trajectoire. En employant les lignes parallèles des axes, le lieu de travail est divisé en plusieurs colonnes et lignes, dont les intersections créent des cellules rectangulaires (figure 84). Pour repérer les cellules, un nombre unique est assigné à chacune d'elles.

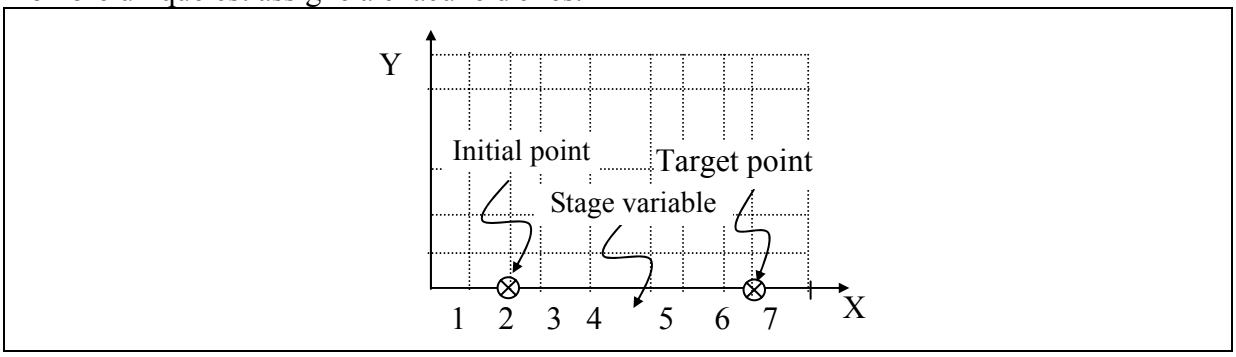


Figure 84. Définition des cellules rectangulaires

La trajectoire de mouvement de l'opérateur est construite par des polygones reliant les centres des cellules. Des zones dangereuses floues sont définies, autour des objets dangereux.

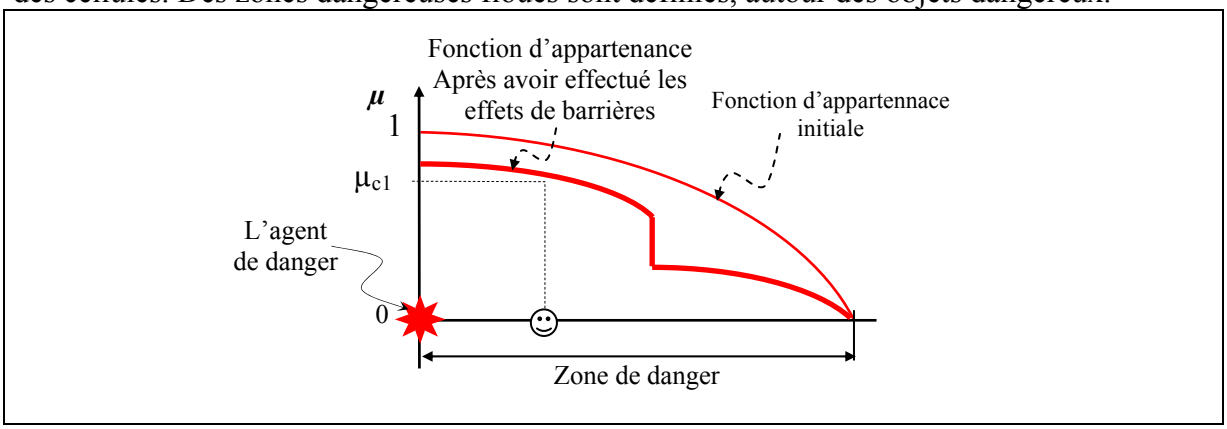


Figure 85. La fonction d'appartenance d'une zone dangereuse floue avant et après avoir appliqué les effets de barrières

La trajectoire est représentée entre le point initial et la cible, par un ordre des cellules.
Les méthodes analytiques ne sont pas appropriées pour optimiser les trajectoires avec les zones dangereuses floues non linéaires, non convexes et non continues qui peuvent être construites par l'accumulation de plusieurs sources de danger et des barrières.
En plus, la présence d'obstacles irréguliers augmente le niveau de complexité du problème (figure 86).

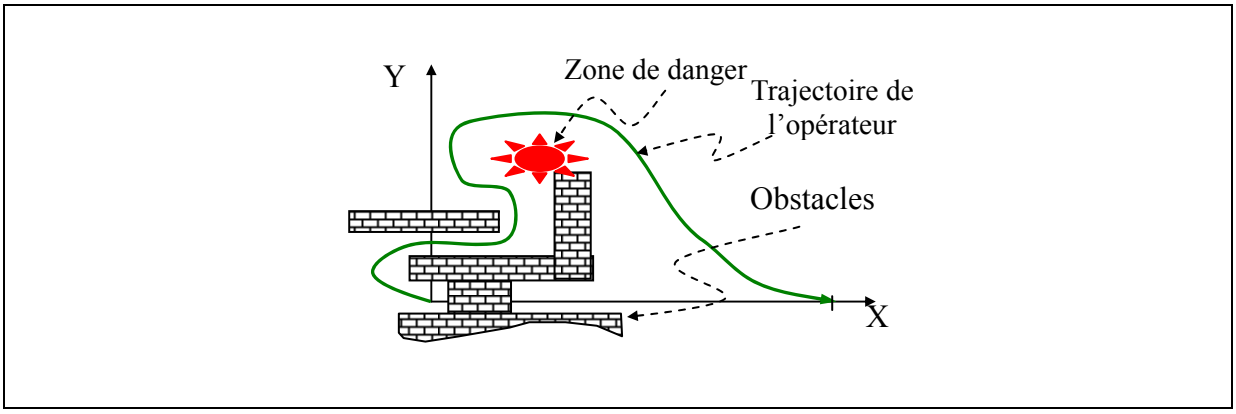


Figure 86. Une trajectoire complexe d'un opérateur

La sévérité de risque est calculée en considérant le degré d'appartenance de la présence de l'opérateur dans les zones dangereuses (μ). Ces zones sont construites en considérant les amplitudes de risques et les effets des barrières d'atténuation (figure 85). Pour appliquer la technique de programmation dynamique, les cellules sont définies comme des étapes de programmation. La variable de contrôle, qui est la valeur qui doit être choisie à chaque étape, est la prochaine destination exprimée comme un numéro de cellule. La trajectoire, traduite du centre de la cellule i, au centre de la cellule j, est définie par la ligne c, formulée par :

$$y=\frac{y_j-y_i}{x_j-x_i}(x-x_i)+y_i$$

(x_i, y_i) et (x_j, y_j) sont les coordonnées des centres respectivement des cellules i et j.
L'index de coût total est calculé en tant qu'intégrale du μ sur la ligne c, auquel est ajouté le coût de mouvement, Cij (par exemple énergie, carburant, coût de temps) :

$$Z_{ij}=\int_c \mu(x,y)dxdy+C_{ij}$$

Comme cela est illustré dans la figure 87, dans l'environnement 3D, ce calcul peut être fait en utilisant les outils géométriques des applications de CAO. La variable d'état du système est définie comme le numéro de la cellule actuelle, qui correspond à la position de l'opérateur.
Le meilleur coût pour la cellule j, dans la colonne k, est calculé pour toutes les cellules dans l'espace S, qui est l'ensemble des cellules placées dans les colonnes {k-1,k,k+1}, en utilisant l'équation récursive suivante :

$$Z_J^*=\inf_{i\in S}\left\{ Z_J^*, Z_i^*+Z_{iJ}^* \right\} \qquad (1)$$

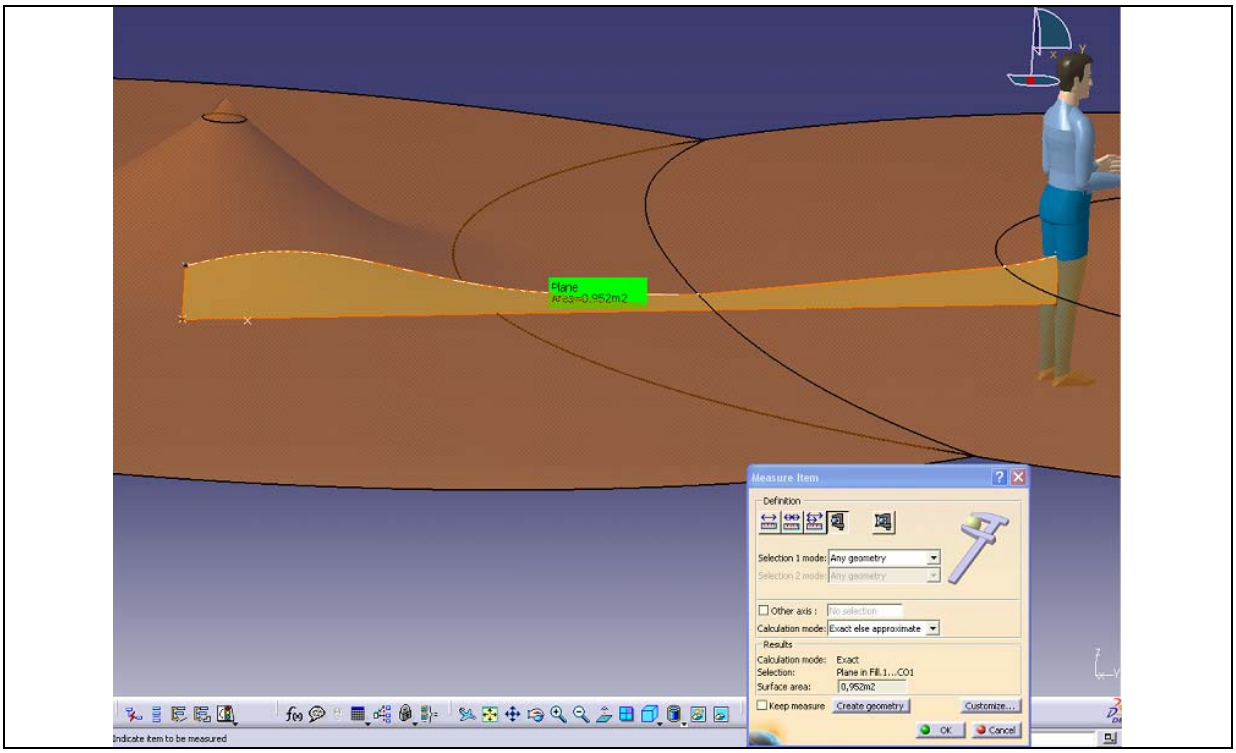


Figure 87. Calcul de risque pour une sous-trajectoire, en utilisant les outils géométriques, dans l'environnement DELMIA

Un des objectifs de ce travail est de développer un algorithme de recherche pour tenir compte de la trajectoire complexe. Pour le faire, un contrôle arrière est prévu, qui recalcule le coût pour toutes les cellules, à l'étape précédente, qui se trouvent dans l'espace S, et ont les coûts supérieurs au coût de la cellule actuelle.
Si la valeur d'une de ces cellules est améliorable, elle sera améliorée, et l'amélioration sera propagée à d'autres cas possibles, en réutilisant la formule 1.
Un test de possibilité est effectué, par l'exécution de l'algorithme, en rejetant la sous–trajectoire impossible.
La figure 88 montre un exemple pour ce problème et la figure 89 montre le résultat trouvé par l'application de l'algorithme proposé.

7.2. Discussion sur l'optimisation de trajectoire

On suppose que le risque total peut être défini comme le risque accumulé de la trajectoire, Cette hypothèse n'est pas toujours valide. En plus, la contrainte d'acceptabilité du risque n'est pas applicable.
Les examens du modèle dans les lieux de travail supposés, y compris les obstacles et les zones dangereuses, ont prouvé sa convergence pour trouver le résultat optimal global avec un coût de calcul acceptable.
Les points de contrôle, en fait les points de passage obligatoire, ne sont pas discutés. Si les points de contrôle existent, le problème doit simplement être divisé en plusieurs sous–problèmes d'optimisation. Modéliser les points de contrôle non ordonnés sera plus compliqué, car cela nécessite une comparaison entre les solutions optimales pour différents ordres possibles de sous–trajectoires. L'approximation du mouvement de l'opérateur, comme union des petits polygones, semble acceptable, parce que le mouvement normal d'un opérateur a une tolérance qui lui est inhérente.

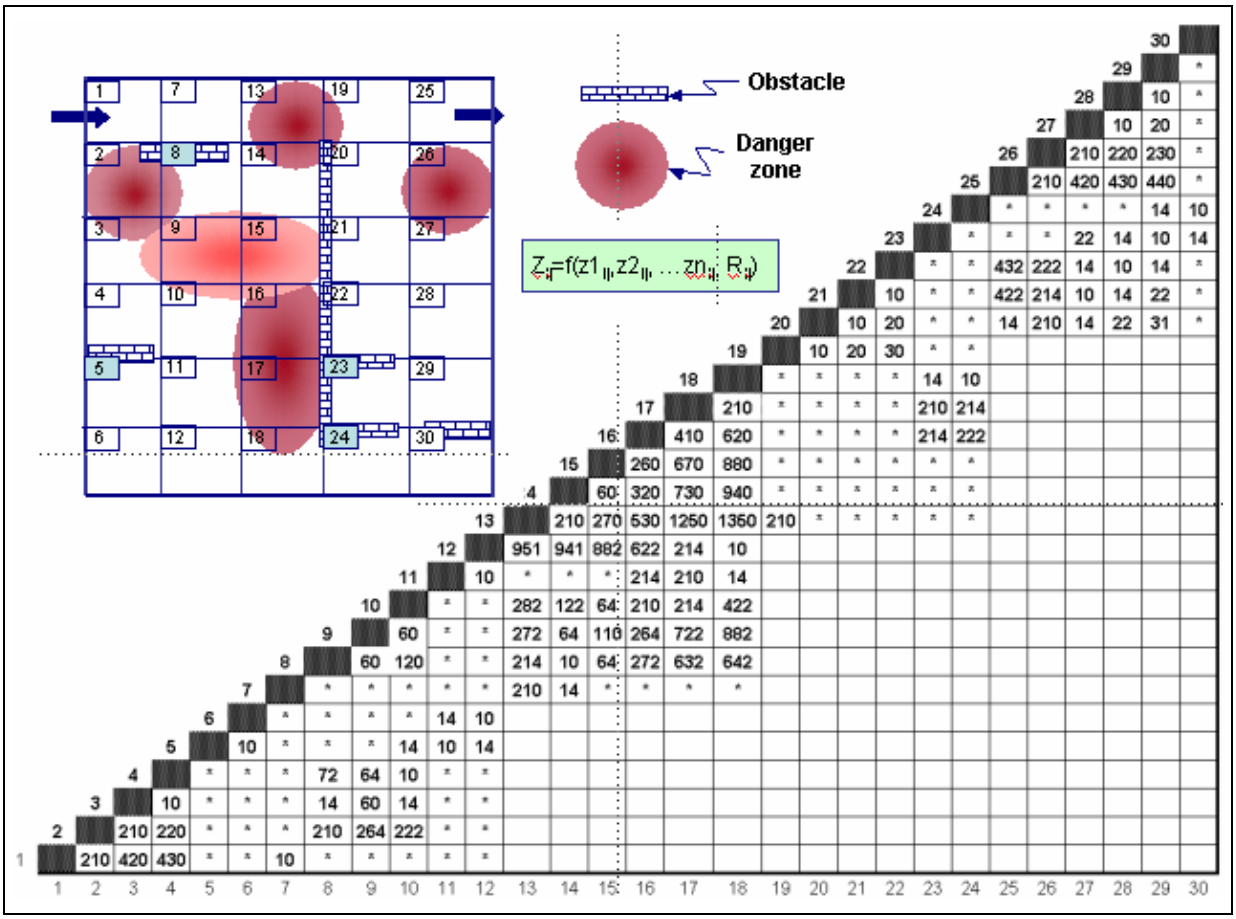


Figure 88. Un exemple pour le problème d'optimisation de la trajectoire, en présentant les Zij

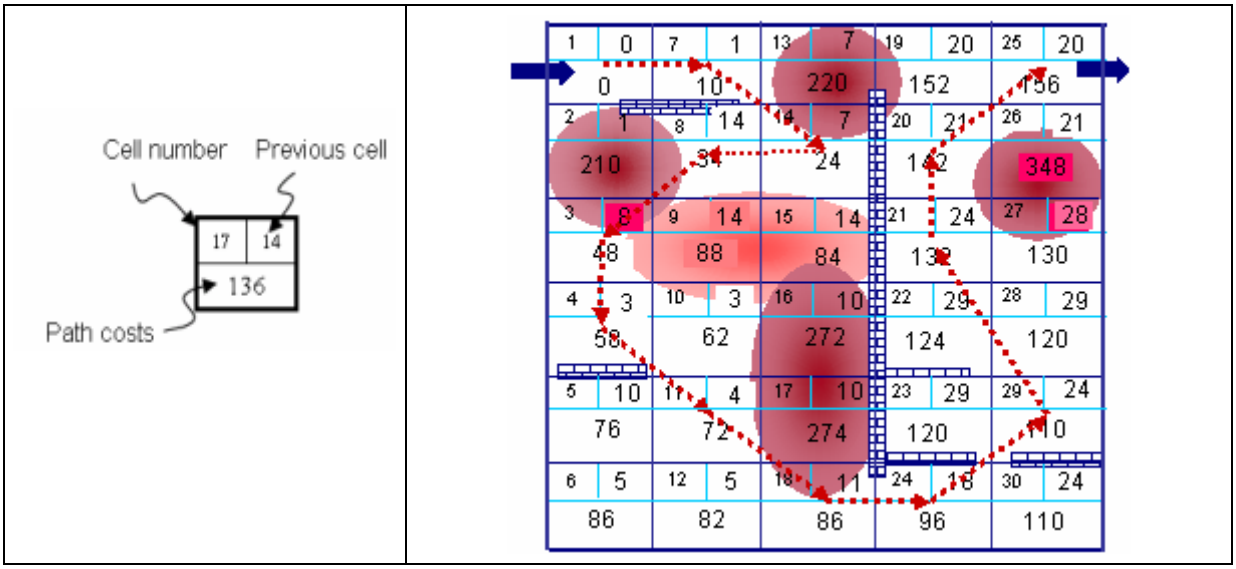


Figure 89. La solution trouvée

Si le lieu de travail n'est pas sur une surface plane, les effets des déclivités et des étapes peuvent être traduits comme coûts de mouvement entre les cellules, dans ce cas, le coût du mouvement dépendra de la direction de mouvement.
Il n'est pas nécessaire que les tailles ou les formes des cellules soient égales, toutefois leurs tailles devraient être définies en considérant un niveau d'erreur acceptable.
Pour simuler les processus de recherche de la trajectoire de l'homme, ce modèle, sans considérer la psychologie et la capacité de l'adaptation humaine, n'est certes pas suffisant.
Toutefois, cette méthode a quatre caractéristiques principales pour être appliquée pour l'optimisation en temps réel dans le projet (Iowa, 2004b):

1. Efficace et rapide,
2. Robuste,
3. Bonnes formulations,
4. Possibilité de résoudre des problèmes à grande échelle.

Cependant, l'utilisation de ce modèle pour la SDT tridimensionnelle est limitée dans sa version actuelle et il n'est pas applicable dans un environnement qui change dynamiquement.

Synthèse du chapitre II

Dans ce chapitre, une série de techniques ont été développées pour représenter et évaluer le risque. On insiste, d'abord, sur l'importance de faire l'analyse des risques lors de la conception de systèmes.
Ensuite en utilisant le concept d'ensemble flou, une nouvelle définition pour la zone dangereuse est présentée, et cette définition est extrapolée pour les lieux de travail en deux et trois dimensions. Les compositions d'union et d'intersection de ces zones dangereuses, sont proposées pour traiter plusieurs dangers et barrières dans les lieux de travail complexes.
La définition de la zone dangereuse en tant qu'espace flou donne la possibilité d'intégrer la perception du concepteur du risque, dans la situation de travail développée. Cette perception peut être le résultat du calcul de la distribution de l'agent dangereux dans la SDT.
Il faut noter que cette définition est plus un changement de mode de présentation d'un concept, car elle permet d'utiliser une vaste quantité de fonctions mathématiques, essentiellement développées pour simuler la capacité de raisonnement humain par des méthodes simples et efficaces. Les avantages sont nombreux : superposer les risques, appliquer les effets de barrières, et la dynamique de la position / amplitude de danger, visualiser le risque, calculer le risque lors de la simulation de mouvements, et augmenter la précision des résultats, sont parmi ces avantages. On ne peut pas avoir les mêmes résultats avec les modèles classiques.
Dans la deuxième section, un modèle est proposé pour appliquer un système d'information des entités de risques dans le système de base de données de conception. L'idée première de ce travail est issue du travail de Raïd HASAN, lors de sa thèse présentée dans (Hasan, 2002). Dans son modèle il a défini les relations des phénomènes dangereux dans les zones dangereuses, qui forment le processus accidentel. Une maquette informatique pour définir les éléments du risque et les assigner aux éléments du système a été développée. Mais ce modèle n'a pas présenté de technique pour calculer la sévérité et la probabilité des risques, ce qui peut être critique lors de la conception. En conséquence, le modèle présenté par (Hasan, 2002), est dans la limite d'un système de documentation, organisé de concepts liés au risque, lors de la conception, mais n'est pas une méthode d'analyse de risque. De plus, il n'a pas utilisé les avantages de l'environnement 3D, pour faire l'analyse de risque.
Ainsi, en ajoutant le concept de zone dangereuse floue, et en introduisant l'approche d'impact, on a essayé de définir ces bases pour calculer la sévérité des risques dans l'environnement 3D.
D'un autre coté, en changeant le format de l'arbre d'évènements et en l'intégrant dans la structure de données du système, nous pouvons calculer la probabilité de risque dans la même plate-forme.
Le résultat final est un système d'analyse de risque dans l'environnement 3D, adapté pour partager les informations de conception et utiliser les outils CAO.

Ce modèle nous permet surtout de modéliser les différents effets de barrières, qui généralement, sont difficiles à être modélisés. Dans ce modèle, les formes géométriques peuvent être associées aux entités de risque, comme la zone dangereuse, et les barrières, dans un environnement 3D.
Ce modèle fournit une analyse quantitative des risques, en calculant les index de risques pour les organes du corps humain ou le corps entier, lors de la simulation de l'opération de production.
Cette méthode est aussi applicable pour calculer le risque d'autres sortes de dangers dans le lieu de travail.

Dans le modèle d'analyse d'énergie, les effets de barrières sur l'énergie dangereuse et la cible sont distingués. En développant des réseaux de barrières, les probabilités des différentes positions de contact entre l'énergie et la cible sont calculées. D'autre part, en définissant la fonction d'insuffisance, la réduction d'énergie après passage de chaque barrière est utilisée pour calculer l'énergie qui est impacté sur la cible lors d'un contact et, finalement, pour calculer la sévérité de l'accident.
Le développement présenté pour l'analyse d'énergie est le résultat d'une réflexion sur la différence du rôle des barrières, et ses effets différents sur l'énergie et la cible. C'est une idée générale, sur les natures du danger, la cible et le processus accidentel. Même les concepts mathématiques proposés fournissent les bases conceptuelles, car déterminer les fonctions insuffisantes, et la fiabilité et la disponibilité de barrières, n'est pas toujours évident dans l'environnement de conception, quand on souffre de manques d'informations. Mais il est accompagné de l'idée de considérer des structures en série et en parallèle pour les barrières, qui modélisent la position des barrières dans le système. De toute façon pour définir une approche analytique pour analyser la structure des barrières, on a besoin de quantifier les effets de barrières sur l'amplitude des énergies et la vulnérabilité des cibles.
Grâce au modèle d'analyse de point d'accumulation de risque, nous identifions les évènements et les conditions les plus critiques qui influencent fortement la sécurité du système. Identifier ces points aide le concepteur pour trouver la meilleure façon d'employer les ressources pour améliorer la sécurité du système, en train d'être conçu. Cette méthode est basée sur la technique de l'arbre d'évènements et calcule le risque espéré, conditionné par chacun des paramètres du système. Le graphe GMC est présenté pour représenter les résumés des effets des paramètres du système sur la sécurité totale, après chaque modification du système.
L'analyse de point d'accumulation se concentre sur l'estimation des effets de chaque évènement ou la condition sur le risque global du système. Bien que cela nécessite d'avoir une grande quantité d'informations concernant la probabilité de chaque évènement et les conséquences des accidents, on peut commencer en remplaçant les informations inconnues avec de mauvaises estimations. La raison est que cette méthode n'est pas une méthode d'analyse de risque, alors on n'utilise pas ses résultats pour garantir ou expliquer la sécurité. Elle est juste une technique pour identifier les points plus critiques pour attirer l'attention du concepteur pour les renforcer. Alors, même, si nous n'avons pas les informations précises, le degré de confiance de cette identification diminue, mais quand même elle propose la meilleure action, dans ses limites.
Dans le modèle de la zone de présence et de la zone d'énergie, les intersections de ces deux zones sont utilisées pour estimer les zones les plus propices pour les accidents. Cette approche est présentée pour affecter les effets des barrières d'énergie et des barrières de présence de la cible en même temps. Cela présente un cas d'intégration des concepts flous avec les concepts probabilistes, pour modéliser une situation complexe.
Ce modèle est une autre façon d'agir avec la sévérité et la probabilité. En effet, il ne s'agit pas seulement de détailler le risque par rapport à chaque point de la SDT, en calculant l'amplitude de l'agent dangereux et la probabilité de contact en ce point.
Mais d'autre part en utilisant les opérations floues (l'union, l'intersection et le complément) une autre image se présente, car appliquer cette méthode simple fournit une façon pour traiter les situations très compliquées dans la situation de travail.
La dernière section concerne le développement d'une technique à base de programmation dynamique en utilisant le concept de l'espace flou pour optimiser la trajectoire d'un humain dans un lieu de travail encombré et dangereux.
Dans la dernière section, le concept d'espace flou est utilisé pour présenter les effets dangereux et l'effet de barrières dans l'environnement du travail. On s'est attaqué à un

problème concernant la recherche du meilleur chemin pour aller d'un point de départ à un point cible, sans points de contrôle et avec des dangers et des obstacles statiques.
L'approximation de la trajectoire est faite par une série de sous-trajectoires linéaires. Le danger de chacune des sous–trajectoires est calculable, facilement, en utilisant les outils de calcul de la surface.
Cette approche est un exemple d'intégration des objectifs d'analyse de performance et d'analyse de risque et elle est développée pour montrer l'application des méthodes de modélisation déjà présentées pour résoudre un problème, lors de la conception.
L'optimisation de trajectoire est une approche qui n'est pas spécifique à l'humain. Mais si on définit les zones dangereuses selon la perception de l'utilisateur pour définir les zones de dangers, ça veut dire dans une approche participative, alors cet outil sera un outil pour simuler le comportement de l'opérateur lors de la prise de décision pour choisir sa trajectoire. En changeant les facteurs dans la fonction objectif de la méthode d'optimisation, on peut simuler le comportement des différentes personnes, pour les personnes qui acceptent les risques et les personnes qui évitent les risques. Dans ce cas, alors, l'hypothèse de considérer une configuration fixe pour la situation de travail, n'est pas nécessaire. Car on ne cherche pas l'optimum global, mais on simule les processus d'optimisation de trajectoire faits par l'opérateur, ce qui n'est pas toujours un optimal global.
Donc ce peut être un outil pour simuler la perception et le comportement d'un opérateur, qui recherche localement performance et sécurité.
Les techniques développées sont présentées dans le cadre d'un agent d'analyse de risque. Mais une structure pour utiliser ces méthodes n'est pas développée. En réalité, parfois, ces méthodes sont les résultats d'apparition d'idées qui nous ont semblé intéressantes, et poursuivies pour améliorer des aspects de l'analyse de risque.
La réflexion sur la structure de l'agent, reste un sujet à poursuivre dans les futures recherches.

PARTIE IV : CONCLUSION

1. Conclusion

Dans ce travail on propose une approche pour la modélisation de SDT.
Selon cette approche, le modèle est défini à trois niveaux, appelés échelles, et pour chaque échelle, le système de modélisation est composé d'une série d'agents de modélisation et d'agents d'analyse.
Dans la plus grande échelle, on voit le système de la SDT, lui-même, comme un système socio–technique, composé des sous–systèmes : solutions techniques, équipes de travail, matériels, environnement et conditions de travail.
Dans ce niveau le processus de conception du système peut être modélisé par un système multi–agents, comprenant des agents d'analyse de productivité, sécurité, facteur humain, économique, et faisabilité.
Dans le deuxième niveau, ce sont les sous–systèmes, qui sont concernés. Pour notre étude, nous avons choisi le sous–système « de l'équipe de travail ».
Dans cette démarche, on a essayé de classer toutes les techniques de modélisation de l'homme dans une classification sur la base de la littérature scientifique utilisée.
Ensuite, les futurs systèmes de la SDT sont envisagés et l'environnement ainsi que les objectifs de travail de l'homme dans cet environnement sont expliqués.
Ces prédictions nous aident à comprendre les nouveaux aspects d'utilisation de modèles de l'homme lors de la conception de situations de travail, et la nécessité d'avoir des analyses de haut niveau sur les aspects liés aux facteurs humains, analyse de risque, analyse de performance et économique.
Ces aspects peuvent être accomplis par la définition d'un système multi–agents d'analyse. Simultanément, ces agents vont profiter des informations produites par les agents de modélisation dont le rôle est de modéliser les aspects anatomiques, physiologiques, psychologiques et cinématiques.
Ces agents de modélisation et d'analyse sont organisés pour coopérer grâce à un centre de contrôle, qui est responsable d'intégrer et contrôler les échanges des informations qui viennent de la part de l'utilisateur et le modèle général de la SDT et ses autres sous–systèmes.
Dans cette architecture, l'utilisateur doit être capable d'appliquer les modèles à différentes échelles, et d'avoir des résultats cohérents (extrapolables et interpolables).
On a distingué les échelles suivantes : le groupe de travail, le corps entier d'un humain, un organe du corps, et les tissus cellulaires.
Dans la deuxième partie de cette démarche, on s'est concentré sur l'aspect de la sécurité de l'homme dans la SDT, qui est bien un des agents déjà présentés dans le système de modélisation de l'homme.
On a insisté sur le fait qu'actuellement le processus de conception manque d'une définition précise et sans ambiguïté du risque, et souvent, l'analyse de risque ne se fait pas lors de la conception. Dans ce cas, le risque d'accident augmente, et assurer la sécurité devient un objectif plus cher et plus difficile à remplir.
Les concepts essentiels et plusieurs approches d'analyse de risque ont été proposés.
Ensuite, sur la base de ces approches, on a proposé des techniques qui peuvent être intégrées dans le processus de conception.
Le premier concept développé, est une définition pour la zone dangereuse en utilisant le concept de l'ensemble flou. Selon cette définition, la zone dangereuse peut être définie par la fonction d'appartenance. Cette définition nous permet de définir plus précisément le danger dans les différents points de l'espace, d'appliquer les dynamiques de dangers et les effets de barrières, et de combiner les effets de plusieurs dangers. En plus, utiliser la zone dangereuse floue donne la possibilité d'illustrer la distribution de dangers dans l'environnement 3D et en réalité virtuelle.

Cette définition est utilisée pour calculer des index de risque pour les opérateurs qui travaillent dans l'environnement de travail. Ces index sont calculés en mesurant le degré d'appartenance de chaque partie du corps humain dans les zones dangereuses, pour chaque séquence de la simulation, et la durée de ces séquences. Lors de la simulation, la dynamique de la position du danger et de l'opérateur, et le changement de l'amplitude de danger et la protection de la cible peuvent être effectués.
En utilisant Matlab, un logiciel a été développé pour déterminer la zone dangereuse floue et calculer le danger en considérant la position de la cible (un piéton), devant une voiture. Ce logiciel ne peut être utilisé qu'après calibrage, mais il démontre la démarche qui consiste à utiliser le système d'inférence floue dans ce nouveau domaine d'analyse.
Ensuite on s'intéresse au concept de barrière, car modifier/ajouter les barrières est la façon la plus courante d'agir sur le risque, par les concepteurs.
Les barrières sont classifiées et une structure d'entités de risque est développée pour faciliter la modélisation de barrières. Cette classification est basée sur la définition de l'accident comme un impact de l'effet d'un agent dangereux sur une cible. Cette approche est basée sur la technique d'analyse d'énergie, qui est étudiée et améliorée plus précisément, dans une section spécifique.
Selon ce modèle, une barrière peut appliquer ses effets sur la source de dangers, la cible, la zone dangereuse, et la probabilité ou la durée de l'impact.
A la base de cette structure, un système d'information hiérarchique des entités de risque est développé, et est appliqué dans le système de la conception, qui, traditionnellement, comprend les processus, les produits et les ressources.
Ce système nous permet d'associer le danger aux éléments du système, et d'utiliser l'environnement 3D, pour introduire les zones dangereuses et les barrières et leurs effets.
En plus, une modification sur la structure des arbres d'évènements, et le diagramme bloc pour les barrières, nous permet de les appliquer dans la structure de l'arbre de spécification du système de conception, pour avoir un système complètement intégré des entités de conception/risque.
On a utilisé les bases de l'ingénierie de la fiabilité pour calculer la fiabilité de barrières, et à partir de ces résultats, on a utilisé l'analyse de barrière et l'analyse de l'arbre d'évènements pour déterminer l'index de risque pour une configuration du système.
Pour valoriser cette approche, et examiner son applicabilité dans les cas réels, un logiciel a été développé pour aider l'utilisateur à définir les attributs des entités de risques et pour faire tous les calculs nécessaires pour évaluer le risque pour le système, en train d'être conçu. Ce logiciel utilise la plate–forme de DELMIA, pour faire les relations entre les entités de risques et l'environnement 3D, calculer les index de risques lors de la simulation du cycle de la production, et insérer le système d'information hiérarchique de risque dans l'arbre de spécification de processus, produit, et ressources de DELMIA.
Dans un autre regard, on a essayé de dessiner un plan de dangers dans la SDT, en intégrant les concepts de zones dangereuses et les zones de présence de l'opérateur. Cette approche n'est pas examinée et appliquée pour les cas et exemples réels, mais elle présente, quand même, une manière d'intégrer les concepts des ensembles flous et les fonctions de distribution de probabilité, sur le plan géographique pour montrer la distribution géographique de l'indice de dangers.

2. Futures recherches

Dans les travaux futurs, on va s'intéresser à examiner les bases théoriques qui sont développées dans les situations de travail. Ça nous aidera à avoir une perception des limites et des capacités de ces théories, dans l'environnement réel.

La première phase de cet examen consiste à comparer les résultats des modèles et outils développés avec les résultats de modèles similaires, qui sont déjà appliqués dans les systèmes opérationnels. Cette phase est importante pour identifier les occasions d'amélioration, pour calibrer les paramètres et trouver d'éventuels problèmes pratiques. Cette phase nous aidera aussi à compléter une bibliothèque de solutions techniques et les dangers associés pour enrichir la base de données du système.

Dans la deuxième phase, on va s'attaquer à l'application du modèle lors de la conception d'une nouvelle SDT. Cette phase nous permettra de mesurer les ressources nécessaires, et de vérifier la faisabilité d'utiliser le système par les bureaux d'études, les experts d'analyse et les utilisateurs. Cet examen sera surtout utile pour mesurer la capacité du système à augmenter le degré de participation des différentes parties intégrées dans le processus de conception et d'analyse, y compris les utilisateurs.

Sur le plan scientifique, le concept d'optimisation de risque, en considérant les aspects économiques, faisabilité et efficacité doit être plus développé. Pour faire ce développement, il faut intégrer les autres agents d'analyse comme le système d'évaluation économique, des facteurs humains et de mesure de performance.

On va essayer de compléter le modèle pour mieux représenter les cas spéciaux. Surtout, la modélisation de toutes les sortes de barrières, en considérant leurs formes et leurs effets variés doivent être encore plus clarifiée. Paramétrer les dangers et la façon de définir la zone dangereuse floue, ceci est resté principalement conceptuel. Ces concepts ont besoin d'être mieux représentés.

Un modèle pour faire la simulation numérique, pour créer les situations aléatoires sera développé. Ce modèle utilisera des informations des arbres d'évènements et la fiabilité des barrières pour créer les situations aléatoires, peut–être imprévues, qui peuvent être arrivées au cours du cycle de la vie des situations de travail. Cet outil peut être considéré comme un système de création automatique de scénarios.

On va élargir le domaine de ce travail, de la phase de conception à la toute la durée de la vie de la SDT, pour regrouper un système intégré d'analyse applicable lors de la conception, de l'usage, de la maintenance et du démantèlement ou du renouvellement du système.

Ce système informatique doit être capable de développer les bases de données dynamiques pour mettre à jour et vérifier les paramètres enregistrés pour des entités de risques, comme les probabilités et les sévérités des évènements, en appliquant les théories statistiques sur des données des accidents et des échecs. Pour développer ce système, il faut insérer plus de relations entre le système développé et les systèmes d'information d'usage, de maintenance et financier.

Le rôle des informations concernant le coût, la performance et les facteurs humains pour optimiser la conception du système de sécurité et l'estimation des conséquences des accidents ne sont pas négligeables, pourtant les relations entre le système d'analyse de risque et les autres systèmes d'analyse ne sont pas clarifiés.

La définition de ces relations, dans la plate–forme numérique, se place en cohérence dans le cadre des objectifs de l'équipe IVGI.

BIBLIOGRAPHIE

(Abdel-Malek et al., 2004a)
K. Abdel-Malek, J. Arora, S. Beck, M. Bhatti, J. Carroll (Clarkson University), T. Cook, S. Dasgupta, N. Grosland, R. Han, H. Kim, J. Lu, C. Swan, A. Williams, J. Yang, K. Farrell, R. Vignes, T. Sinokrot, A. Mathai, T. Marler, J. Muhs, Q. Wang, X. Zhou, J. Lee, J. Kim, X. Man, S. Rahmatala, S. Dandach, R. Fetter, E. Horn, A. Patrick, Z. Mi, "Real time simulation environments", Center for Computer-Aided Design - College of Engineering, The University of Iowa, USA 2004 http://www.digital-humans.org/Report2004/

(Abdel-Malek et al., 2004b)
K. Abdel-Malek, J. Arora, S. Beck, M. Bhatti, J. Carroll (Clarkson University), T. Cook, S. Dasgupta, N. Grosland, R. Han, H. Kim, J. Lu, C. Swan, A. Williams, J. Yang, K. Farrell, R. Vignes, T. Sinokrot, A. Mathai, T. Marler, J. Muhs, Q. Wang, X. Zhou, J. Lee, J. Kim, X. Man, S. Rahmatala, S. Dandach, R. Fetter, E. Horn, A. Patrick, Z. Mi, "Motion capture research", Center for Computer-Aided Design College of Engineering, The University of Iowa, USA 2004 http://www.digital-humans.org/Report2004/

(ANT, 1998)
"Anthropometric Data Set", http://cseriac.flight.wpafb.af.mil/products/cada/cada.htm

(Aphalo, 2003)
P. J. Aphalo, "Systems analysis and simulation modelling", University of Jyväskylä, Finland http://www.cc.jyu.fi/~aphalo/YMP460/pdf/foilsYMP460_A.pdf

(Arbor, 1998) A. Arbor, "Enginrres create lab to study and simulate human motion", The university of Michigan, USA, 1998
http://www.umich.edu/~newsinfo/Releases/1998/May98/r050698a.html

(Babuska, 2002)
R. Babuska, "Fuzzy Systems, Modeling and Identification", Delft University of Technology, Department of Electrical Engineering Control Laboratory, Delft, The Netherlands, http://lcewww.et.tudelft.nl/~babuska/transp/fuzzmod.pdf

(Baksa, 2001)
S. Baksa , M. Skoko et I. Baksa, "Virtual peaple in a computer world", 3rd CARNet Users Conference - CUC 2001 Joining Efforts From Communication to Collaboration over the Internet, Zagreb, Croatia, September 24-26, 2001
http://www.carnet.hr/cuc/cuc2001/papers/a2.pdf

(Barthélemy, 2002)
J.P. Barthélemy, R. Bisdorff, et G. Coppin., "Human centered processes and decision support systems", European Journal of Operational Research Vol. 136 (2002) p. 233-252

(Bendahan, 2004)
P. Bendahan et P. Gorcean, "A neural network architecture to learn the arm reach motion planning in a static cluttered environment", International Conference on Systems, Man and Cybernetics October 10-13 2004 The Hague, The Notherlands

(Bellemare, 2001)
M. Bellemare S. Montreuil, M. Marier, J. Prévost, et D. Allardl, « L'amélioration des situations de travail par l'ergonomie participative et la formation »
http://www.erudit.org/revue/ri/2001/v56/n3/000079ar.pdf

(Benedyket, 1998)
R. Benedyket et S. Minister al., "Applying the BeSafe method to product safety evaluation", Applied Ergonomics Vol 29, No. 1, ppS13, 1998

(Bernard, 2002)
A. Bernard et R. Hasan, "Working situation model for safety integration during design phase", Annals of the CIRP Vol. 51/1/2002

(Bernier, 2003)
S. Bernier , I. Decornois , A.M. Freyria , C. Lucase , J.P. Lomberget , et M.B. Sanglerat, "Les cahiers de prévention - La prévention des risques liés aux manutentions manuelles et

mécaniques 1ère édition Août 2003", Centre National de la Recherche Scientifique - Inspection générale d'hygiène et de sécurité, France 2003
http://www.sg.cnrs.fr/ighs/documentation/Manutention/documents/cahier%20prevention%20manutention.pdf

(Bindiganavale, 2000)
R. Bindiganavale, W. Schuler, J. M. Allbeck, N. I. Badler, A. K. Joshi, et M. Palmer, "Dynamically Altering Agent Behaviors Using Natural Language Instructions", University of Pennsylvania, ISBN:1-58113-230-1 http://www.seas.upenn.edu/~allbeck/agents.pdf

(Binford, 2005)
M. W. Binford, "Overview of seminar: ReGEO 5159 GIS Applications in Environmental Systems ", Uuniversity of Florida, USA 2005
http://www.clas.ufl.edu/users/mbinford/geo5159/lectures_online

(Bruccoleri, 2002)
M. Bruccoleri, L. Fratini1 et G. Perrone, « Virtual Factory: Integration of system and process manufacturing levels", Dipartimento di Tecnologia Meccanica, Produzione e Ingegneria Gestionale, University of Palermo – ITALY 2002

(Buchanan, 1989)
B. G. Buchanan, et R. G. Smith, "Fundamentals of expert systems"
http://media.wiley.com/product_data/excerpt/18/04712933/0471293318.pdf

(Cacciabue, 2004)
P.C. Cacciabue et M. Martinetto, "Driving support and user centred design approach: the case of the EUCLIDE anti-collision system", International Conference on Systems, Man and Cybernetics October 10-13 2004 The Hague, The Notherlands

(Campbell, 2002)
G E. Campbell et J A. Cannon-Bowers, "Human Performance Model Support for a Human-Centric Design Process", Naval Air Warfare Center Training Systems Division, USA 2002
http://www.manningaffordability.com/S&tweb/PUBS/HPM-HumanCentricDesign/HPM-HumanCentricDesign.pdf

(Carter-Powell, 2002)
G. Carter-Powell, "Information on Neuro Linguistic Programming Step Change Development"
http://www.stepchange.org.uk/Information_on_NLP_doc.pdf

(Castellano, 2000)
G. Castellano et A. M. Fanelli, "Fuzzy inference and rule extraction using a neural network", Università degli Studi di Bari, Dipartimento di Informatica Via E. Orabona, 4 - 70126 Bari – ITALY 2000 http://www.di.uniba.it/~castella/papers/NNW2000.pdf

(CEC, 2003)
"Amended proposal for a: directive of the European parliament and of the council commission of the European communities", 2003

(Chaffin, 1998)
D. B. Chaffin, "Prediction of Population Strengths ", Human Motion Simulation at the Center for Ergonomics University of Michigan, College of Engineering, 1205 Beal Avenue, Ann Arbor, MI 48109-2771, USA 1998

(Chaffin et al., 2002)
D. B. Chaffin, C. Woolley, C. Dickerson, et M. B. Parkinson, "Modeling of Object Movement Capability in the Spinal Cord Injured Population", University of Michigan, USA 2002
http://www.engin.umich.edu/dept/ioe/HUMOSIM/publications.html#analysisshould

(Chaffin, 2003)
D. Chaffin, "Proving digital human modelling for proactive ergonomics in design", University of Michigan, USA 2003, http://iea2003.org/s_program/abstract.html

(Chapman, 2001)
R. J. Chapman, "The controlling influences on effective risk identification and assessment for construction design management", International Journal of Project Management, Vol. 19 (2001) p.147-160

(Charlwood, 2003)

M. Charlwood, “Relating Machine Risk to Risk Exposure of Persons through Involvement Time, 3rd Int. Conf. SIAS 2003- Nancy, France. 13-15 Oct. 2003

(Chedmail, 2003)
P. Chedmail, D. Chablat, et Ch. Le Roy, “A distributed Approach for Access and Visibility Task with a Manikin and a Robot in a Virtual Reality Environment”, IEEE Transactions on industrial electronics, VOL. 50, NO, 4, August 2003

(Chen, 2003)
D. Chen, “Systems Approach and Models”, Göteborg University, Sweden 2003 http://www.gvc.gu.se/ngeo/deliang/lec-2.pdf

(Chung, 2003)
M. K. Chung, “Quantitative postural load assessment for whole body manual tasks based on perceived discomfort”, Pohang University of Science and Technology, 2003 http://iea2003.org/s_program/abstract.html

(Clayton, 2003)
A. Clayton, “Regulating occupational health and safety: the need for a new paradigm”, http://www.general.monash.edu.au/muarc/IPSO/vol7/3-1.pdf 2003 Safety Science Monitor, Issu. 1 vol. 7, Article III-1 2003

(Clemens, 2002)
P. L. Clemens, "System safety scrapbook”, Sverdrup Technology, Inc. 2002, http://www.sverdrup.com/safety/scrapbook.pdf

(COMBIMAN, 2004)
“COMBIMAN (Computerized Biomechanical Man-model)” http://cseriac.flight.wpafb.af.mil/products/combiman.html

(Cunha, 2001)
P.F. Cunha, “The use of virtual environments to support the manufacturing planning and control”, Conferência Internacional ASM 2001, “Applied Simulation & Modeling

(CVU, 2006)
« Introduction to economics », Canadian virtual university, Faculté des écoles professionnelles de l’Université Laurentienne, Canada 2003 http://209.91.162.35/FeedStream/Content/Lecture%201-introduction%20to%20ergonomics.pdf

(Dalle et al., 2000) O. Dalle, P. Mussi,C. Rigal, et V. Sutter, “ASIMUT: an Environment for the Simulation of Multi-Media Satellite Telecommunications Networks “, France 2000 www.sop.inria.fr/mascotte/Olivier.Dalle/Postscript/ESA-SESP2000.ps.gz

(De Dianous et al., 2006)
V. de Dianous et C. Fiévez, “ARAMIS project: A more explicit demonstration of risk control through the use of bow–tie diagrams and the evaluation of safety barrier performance”, Journal of Hazardous Materials (Article in Press) 2006

(DEPTH, 1998)
“DEPTH (Design Evaluation for Personnel, Training, and Human Factors)”, 1998 http://www.brooks.af.mil/HSC/products/doc42.html

(De Winter, 2004)
J.C.F. de Winter, M. Mulder, M. Mulder, M.M. van Paassen, T. Yamamura, “Weighted Two-Dimensional Longitudinal Impedance for Driving Support System", International Conference on Systems, Man and Cybernetics October 10-13 2004 The Hague, The Notherlands

(Dickerson et al., 2001)
C. Dickerson et D. B. Chaffin, “Exertion-driven strength modeling of the shoulder”, 2001 http://www.engin.umich.edu/dept/ioe/HUMOSIM/publications.html#analysisshould

(Dickerson et al., 2002)
C. Dickerson et D. B. Chaffin, “An analysis of shoulder loading differences for simulated industrial task performance between injured and non-injured subject populations”, 2002, http://www.engin.umich.edu/dept/ioe/HUMOSIM/publications.html#analysisshould

(DOD, 2006)
“DoD training with simulations handbook”, USA 1931 http://www.strategypage.com/prowg/simulationshandbook/chp_1.doc

(Donald, 1998)

D. L. Donald, ”A tutorial on ergonomic and process modeling using QUEST and IGRIP” Deneb Robotics, Inc., 1998, http://www.informs-cs.org/wsc98papers/040.PDF

(Drogoul et al., 2001)
A. Drogoul et D. Servat , « Intelligence diffuse : Vers un monde fait d’agents ? », Université Paris 6, Boîte 169, 4 Place Jussieu 75232 Paris Cedex 05e", France 2001
http://www-poleia.lip6.fr/~drogoul/papers/Drogoul.JFIAD02.pdf

(Duan, 1999)
Y. Duan, “Fuzzy role based expert system for human thermoregulation model”, University of california at Berkeley, USA 1999
http://www.cs.berkeley.edu/~duan/prjs/me290m/me290final.pdf

(EN, 1997a)
Norme européenne NF EN 1050, « Sécurité des machines, principes pour l’appréciation du risque », l’Association Française de Normalisation (AFNOR), Tour Europe 92049 Paris la Défense Cedex , Janvier 1997

(EN, 1997b)
Norme européenne NF EN 953, “Sécurité des machines, protecteurs, prescriptions générales pour la conception et la construction des protecteurs fixes et mobiles », l’Association Française de Normalisation (AFNOR), Tour Europe 92049 Paris la Défense Cedex , Décembre 1997

(EN, 2003)
Norme européenne NF EN 12268, “Machines pour les produits alimentaires, scies à ruban, prescriptions relatives à la sécurité et à l’hygiène », l’Association Française de Normalisation (AFNOR), Tour Europe 92049 Paris la Défense Cedex , Août 2003

(EOR, 2003)
“What is operational research?”, EURO - The Association of European Operational Research Societies, 2003, http://www.euro-online.org/display.php?page=what_or

(ERG, 2003)
“About ergonomics”, Technical University of Munich, Germany 2003
http://www.ergonomie.tum.de/lehrstuhl/ergonomie-e.htm

(Fadier, 2003)
E. Fadier, “Risk prevention through integration of human factors in work system design”, 3rd Int. Conf. SIAS 2003- Nancy, France. 13-15 Oct. 2003

(Farrell, 2004)
K. Farrell, “Upper body motion prediction”, The University of Iowa, USA 2004
http://www.digital-humans.org/Report2004/Documents/04-MotionPrediction.htm

(Fuller, 1999)
R. Fuller, “Fuzzy logic and neural nets in intelligent systems", C. Carlsson ed., Information Systems Day, TUCS General Publications, Vol. 17, Turku Centre for Computer Science, [ISBN 951-29-1604-5], 1999 74-94
http://www.abo.fi/~rfuller/is97.pdf

(Gallego, 2004)
L. E. Gallego, “ Lightning risk assessment using fuzzy logic”, Journal of Electrostatics Vol. 60 (2004) p. 233–239

(George et al., 1999)
G. R. George P. E. et F. Cardullo, “Application of neuro-fuzzy systems to behavioral representation in computer generated forcesa,
http://www.link.com/pdfs/neuro-fuzzy.pdf

(Giannini et al., 2003)
F. Giannini, M. Monti, S. Ansaldi, et P. Bragatto, “PLM to Support Hazard Identification in Chemical Plant Design”, Istituto di Matematica Applicata e Tecnologie Informatiche – CNR, 2003

(Goodeve, 2001)
C. Goodeve, “About OR”, United kingdom 2001,
http://www.orsoc.org.uk/about/topic/news/orclub.htm

(Gopinath et al., 2004)

A. Gopinath, et J. J. Carroll, "Gesture-based man-machine interface", College of Engineering - The University of Iowa, USA 2004
http://www.digital-humans.org/Report2004/

(Greene, 2005)
A. Greene, "A process approach to project risk management", Department of Civil and Building Engineering, Loughborough University, United kindom 2005
http://www.arcom.ac.uk/workshops/01-Loughborough/05-Greene.pdf

(Grosjean et al., 2000)
J.C. Grosjean et M. Neboit, « Ergonomie et prévention en conception des situations de travail », Département homme au travail, INRS, Centre de Lorraine, France 2000
http://www.inrs.fr/htm/ergonomie_prevention_en_conception_situations.html

(Guimaraes et al., 2004a)
A. C. Ferreira Guimaraes et C. M. Franklin Lapa, "Fuzzy FMEA applied to PWR chemical and volume control system", Progress in Nuclear Energy, Vol. 44, No. 3, pp. 191-213, 2004

(Guimaraes et al., 2004b)
A. C.F. Guimaraes et C. M. Franklin Lapa, "Technical note: Effects analysis fuzzy inference system in nuclear problems using approximate reasoning", Annals of Nuclear Energy, Vol. 31 (2004) p.107-115

(Guldenmund et al., 2005)
F. Guldenmund, A. Hale, L. Goossens, J. Betten et N. Jan Duijm, "The development of an audit technique to assess the quality of safety barrier managemente", Journal of Hazardous Materials (Article in presse) 2005

(Gulliksen et al., 1998)
J. Gulliksen, A. Lantz et I. Boivie, "User Centered Design – Problems and Possibilities", 1998
http://www.acm.org/sigchi/bulletin/1999.2/gulliksen.pdf

(Gupta, 2002)
J.P. Gupta, "The Bhopal gas tragedy: could it have happened in a developed country?", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 15 (2002) p. 1–4

(Hagelauer et al., 2004)
P. Hagelauer et Felix Mora-Camino, "A soft dynamic programming approach for on-line aircraft 4D-trajectory optimization", European Journal of Operational Research, Vol. 107 (1998) p. 87-95

(Halliday, 2002)
D. Halliday, "Neural modelling and neural computing", University of York, United kingdom 2002, http://www-users.york.ac.uk/~dh20/model1.html

(Harms-Ringdahl, 2003a)
L. Harms-Ringdahl, "Assessing safety functions—results from a case study at an industrial workplace", Safety Science Vol. 41 (2003) p. 701–720

(Harms-Ringdahl, 2003b)
L. Harms-Ringdahl, "Investigation of barriers and safety functions related to accidents", Preprint version of article in proceedings of ESREL 2003, European Safety and Reliability Conference 2003, Maastricht, The Netherlands, http://www.irisk.se/engpubl/lhresr03.pdf

(Harms-Ringdahlen, 2004)
L. Harms-Ringdahlen, "Relationships between accident investigations, risk analysis, and safety management", Journal of Hazardous Materials, Vol. 111, pp.13-19, 2004
http://www.irisk.se/engpubl/relationships.pdf

(Harrissona et al., 2003)
D. Harrissona et Camille Legendre, " Technological innovations, organizational change and workplace accident prevention", Safety Science, Vol. 41 (2003) p. 319-338

(Hasan, 2002)
R. Hasan, "Contribution à l'amélioration des performances des systèmes complexes par la prise en compte des aspects socio-techniques dès la conception : proposition d'un modèle original de situation de travail pour une nouvelle approche de conception ", PhD Thesis- L'université Henri Poincare Nancy 1, France 2002

(Hatze, 2002)

H. Hatze, “Human body models including tissue analogs”, University of Vienna 2002
http://isb.ri.ccf.org/biomch-l/archives/biomch-l-2002-01/00124.html

(Hellmann, 2001)
M. Hellmann, “ Fuzzy Logic Introduction”, Germany 2001
http://www.fpk.tu-berlin.de/~anderl/epsilon/fuzzyintro4.pdf

(Hendershot, 1999)
D. C. Hendershot,” A simple problem to explain and clarify the principles of risk calculation”, Rohm et Haas Company Engineering Division, PO Box 584 Bristol, PA 19007, http://home.att.net/~d.c.hendershot/papers/pdfs/riskland.pdf

(Henriques, 2001)
E. Henriques, “Integrated model for the design and planning of a cellular manufacturing sytem”, IST Mecanical Engineering department 2001

(Holejko et al., 2004)
K. Holejko, R. Nowak et M. Dzwiarek, “Augmented Reality – a new kind of hazardous situation indicator”, 3rd Int. Conf. SIAS 2003- Nancy, France. 13-15 Oct. 2003

(Hollnagel, 1999)
E. Hollnagel, “IFE (N) accident analysis and barrier functions”, Version 1.0, February IER functions, Sweden I999
http://www.it.uu.se/research/project/train/papers/AccidentAnalysis.pdf

(Howard et al., 2004) A. Howard, E. Tunstel, D. Edwards et A. Carlson, “Enhancing fuzzy robot navigation systems by mimicking human visual perception of natural terrain traversability”, Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, Vancouver, B.C., Canada, July 2001, pp. 7-12
http://robotics.jpl.nasa.gov/people/tunstel/papers/ifsa_nafips01.pdf

(Huang et al., 2001)
D. Huang, T. Chen, et M.J. J. Wang, “A fuzzy set approach for event tree analysis", Fuzzy Sets and Systems Vol. 118 (2001) p. 153-165

(IAEA, 2004)
“IAEA safety standards series - Categorization of Radioactive Sources”, International atomic energy agency Vienna 2004
http://www-ns.iaea.org/downloads/standards/drafts/ds343.pdf

(Iowa, 2004a)
“Virtual reality for Santos”, Virtual Soldier Research Program, Center for Computer-Aided Design - College of Engineering, The University of Iowa, USA 2004 http://www.digital-humans.org/Report2004/

(Iowa, 2004b)
“Optimization Software Benchmark”, Virtual Soldier Research Program, Center for Computer-Aided Design - College of Engineering, The University of Iowa, USA 2004
http://www.digital-humans.org/Report2004/

(Iowa, 2005)
“Virtual Soldier Research Program (chapter 1) “,Virtual Soldier Research Program, Center for Computer-Aided Design - College of Engineering, The University of Iowa, USA 2005
www.digital-humans.org/chapt1.pdf

(Jack, 2004)
“Transom Jack”, http://www.transom.com/Public/transomjack.html

(Jager, 1995)
R. Jager, “Fuzzy logic in control”, Technische Universiteit Delft. ISBN 90-9008318-9, Notherlands 1995,
http://users.pandora.be/jati/renej/phd/rjphd.pdf

(Jensen, 2002)
P. L. Jensen, “Human factors and ergonomics in the planning of production”, International journal of industrial ergonomics, Vol. 29 (2002) p. 121–131

(JLr-einen, 1996)
J. JLr-einen, “Safety design by using three-dimensional simulation models”, International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 17 (1996) p. 343-350

(Jo et al., 2003)
Y. D. Jo et K. S. Parkd, "Dynamic management of human error to reduce total risk", Journal of loss prevention in the process industries Vol. 16 (2003) p. 313-321
(Juchmes et al., 2005)
R. Juchmes, P. Leclercq et S. Azar, "A freehand-sketch environment for architectural design supported by a multi-agent system", Computers & Graphics 29 (2005) 905–915e
(Kanade, 2003)
T. Kanade, "Message from Director", Digital human research center 2003
http://www.dh.aist.go.jp/message-e.htm
(Keates et al., 2005)
S. Keates et P. J. Clarkson, "Combining utility, usability and accessibility methods for universal access", University of Cambridge, United kingdom 2001
http://www.ics.forth.gr/proj/at-hci/chi2001/files/keates.pdf
(Kennedy, 1998)
R. Kennedy, "Development of a hazard and operability-based method for identifying safety management vulnerabilities in high risk systems", Safety Science, Vol. 30 (1998) p. 249-274
(Khan et al., 1998)
F. I. Khan et S. A. Abbasi, "Inherently safer design based on rapid risk analysis", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 11 (1998) p. 361–372
(Khan et al., 1999)
F. I. Khan et S. A. Abbasi, "Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 12 (1999) p. 361–378
(Khan et al., 2000)
F. I. Khan et al., "Analytical simulation and PROFAT II: a new methodology and a computer automated tool for fault tree analysis in chemical process industries", Journal of Hazardous Materials A75 2000 1–27
(Kieras, 1998)
D. E. Kieras, "EPIC (Executive Process-Interactive Control)", 1998
http://ai.eecs.umich.edu/people/kieras/epic.html
(Kim, 2004)
J. H. Kim, "Human performance measures", The University of Iowa, USA 2004 http://www.digital-humans.org/Report2004/
(Kjellén et al., 1995)
U. Kjellén et S. Sklet, "Integrating analyses of the risk of occupational accidents into the design process Part I: A review of types of acceptance criteria and risk analysis methods", Safety Science Vol. 18 (1995) p. 2 15-227
(Labodova, 2003)
A. Labodova, "Implementing integrated management systems using a risk analysis based approach", Journal of Cleaner Production Vol. 12 (2004) p. 571–580
(Laurenceau, 2001)
T. Laurenceau, "Benchmarking digital human modeling tools for industrial designers", 2001 IDSA Design Education Conference Papers
http://www.idsa.org/whatsnew/01ed_proceed/laurenceau.pdf
(Lee, 2003)
K. S. Lee, "Ergonomics in TQM: How can we sell ergonomics to management?", Hongik University, 2003 http://iea2003.org/s_program/abstract.html
(Leino et al., 2004)
S.P. Leino, J. Viitaniemi, S. A. et K. Helin, "Dynamics simulation and comfort analysis of human-vehicle systems ", VTT Industrial Systems 2002 ISSN 1459-1804
(Leveson, 2004)
N. Leveson, "A new accident model for engineering safer systems", Safety Science Vol. 42 (2004) p. 237–270
(Li et al., 2005)

J.P. Li et G Thompson, “Modelling of Mechanical Failures in a Virtual Reality Design Environment”, The Advanced Virtual Prototyping Research Centre , Office of Science and Technology (OST) UK 2003 http://www.avprc.ac.uk/RMS2003-040.pdf

(Licht et al., 2005)
D. M. Licht et D. J. Polzella, “Human factors, ergonomics, and human factors engineering: an analysis of Definitions”, Harry G. Armstrong Aerospace Medical Research Laboratory U.S.A. 2005
http://iac.dtic.mil/hsiac/docs/Human_Factors_Definitions.pdf

(Linner et al., 2000)
S. Linner, U. Rossgoderer et A. Wunsch, “Human modeling in the context of the digital factory”, Tecnomatix Technologies, Munich, Germany
http://home.arcor.de/a.wunsch/papers/IEA2000.pdf

(Livingston et al., 2001)
A. D. Livingston, G. Jackson et K. Priestley, “Root causes analysis: Literature review”, HSE Health & Safety Executive, United kingdom 2001
http://www.hse.gov.uk/research/crr_pdf/2001/crr01325.pdf

(Määttä, 2003)
T. Määttä, “Virtual environments in machinery safety analysis”, VTT publications 516 ISBN 951-38-6261-5 (soft back ed.) 2003

(Marler, 2004)
R. Timothy Marler, “Development of real-time multi-objective optimization-based posture prediction”, Center for Computer-Aided Design College of Engineering The University of Iowa, USA 2004 http://www.digital-humans.org/Report2004/Documents/02-PosturePrediction.htm

(Martin et al., 2002)
P. Martin et A. D’Acunto, “Design of a Production System: an Application of Integration Product-Process», Seminar on Digital Enterprise Technology © 2002 School of Engineering, University of Durham 2002 http://www.dur.ac.uk/det2002/proceedings/part3.pdf

(Mathai et al., 2004)
A. Mathai, N. Rabadi et N. Grosland, “Physiological Systems, Thermal Comfort, Cumulative Trauma Disorder, NIOSH Lifting equation”, The University of Iowa, USA 2004
http://www.digital-humans.org/Report2004/

(Maxant et al., 2005)
O. Maxant et G. Piat, “Thinking, elaborating and evaluating future offers in user-oriented design process: to produce perceptive innovations from conceptual ideas”, CREATEAM® Research & Development EDF (Electricité de France)
http://www.grenoble-soc.com/proceedings03/Pdf/26-MAXANT.pdf

(MED, 1999)
“Medical Dictionary 1999”, The MedicineNet.com
http://www.medterms.com/script/main/Art.asp?ArticleKey=9257

(Mellouli et al., 2002)
S. Mellouli, G. W. Mineau et D. Pascot, “Multi-Agent System Design", Laval University, Computer Science Department, G1V 7P4, Quebec, Canada
http://www.ift.ulaval.ca/~mellouli/papers/ESAW02_Mellouli.pdf

(Merino et al., 2005)
E. Merino, L. Contijo, R. Pinto de Luz, O. Rosa, A. Martins, A, et R. Barica, “Working postures analysis using virtual reality - a tool to support ergonomic analysis of the work place”, Proceedings of the 5th Pan-Pacific Conference on Occupational Ergonomics 1998

(Naddeo, 2001)
A. Naddeo, ”Application of Fuzzy logic in design phase of car-platform for an electrical rear-wheel drive vehicle”, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, University of Salerno, Italy 2001
http://adm.ingfo.unibo.it/Papers/A5/3-ADM01-A5-117.pdf

(NASA, 2002)
“Tools of reliability analysis -- itroduction and FMEAs”, NASA Lewis Research Center, http://www.nepss.org/presentations/dfr9.pdf

(NASA, 2003)

"Root Cause Analysis Overview", NASA- Office of Safety & Mission Assurance Chief Engineers Office 2003 http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/rca/rootcauseppt.pdf

(Nefti et al., 2004)
S. Nefti et M. Oussalah, "A Neural Network approach for Railway Safety Prediction ", International Conference on Systems, Man and Cybernetics October 10-13 2004 The Hague, The Notherlands

(Nigay, 2002)
L. Nigay, "Interaction Homme-Machine Conception, Interaction Homme-Machine Conception, Réalisation", Université de Grenoble 1, France 2002
http://iihm.imag.fr/nigay/ESSI/SupportCours.pdf

(Obergefell, 1998)
L. A. Obergefell, "DYNAMAN" 1998

(O'Hara, 1995)
P. O'Hara, J. Carter, L. Wisser, I. Delinger, et J. Lloyd, "Design for Environment, Safety, and Health (DFESH) Implementation Strategy for the Semiconductor Industry", SEMATECH Technology Transfer 1995
http://www.sematech.org/docubase/document/3006aeng.pdf

(Oklahama, 2002)
"Hazard communication", Oklahama stste university 2002
http://www.pp.okstate.edu/ehs/statestuff/hazcom.pdf

(ONL, 2006)
"Online Answer.com dictionary", http://www.answers.com/

(ONR, 1998a)
"Human engineering processe", SC-21 S&T Manning Affordability Initiative 1998
http://www.manningaffordability.com/s&tweb/HEResource/Other/HEProcess.pdf

(ONR, 1998b)
"Human Performance Models & Modeling Tools Enabling Technology", SC21/ONR S&T Manning Affordability 1998
http://www.manningaffordability.com/S&tweb/t1hpm/sld001.htm

(ONR, 1998c)
"PATS (Psychophysiological Assessment Test System)", SC-21/ONR S&T Manning Affordability Initiative, http://cseriac.flight.wpafb.af.mil/products/pats.htm

(ONR, 1998d)
"ORCA (Operational Requirements-Based Casualty Assessment System) and ComputerMan", SC-21/ONR S&T Manning Affordability Initiative
http://www.manningaffordability.com/S&tweb/HEResource/Tool/Detdesc/Det_ORCA.htm

(ONR, 1998e)
"WC FIELDE (Workload Consultant for Field Evaluations) ", SC-21/ONR S&T Manning Affordability Initiative http://cseriac.flight.wpafb.af.mil/products/WCFIELDE.htm

(ONR, 2000)
"Human-centered systems engineering process guidance", SC-21/ONR S&T Manning Affordability Initiative
http://www.hf.faa.gov/docs/508/docs/Human_System_Engineering_(NSWC).pdf

(ONS, 1992)
"Root cause analysis guidance document", U.S. Department of Energy, Office of Nuclear Safety Policy and Standards 333 1992
http://tis.eh.doe.gov/techstds/standard/nst1004/nst1004.pdf

(OTT, 2003)
"Thermal Comfort Manikin", Office of Transportation Technologies (OTT) 2003
http://www.ott.doe.gov/coolcar/manikin.html

(Paques, 2003)
J. J. Paques, D. Kiang, et L. De Silva, "Functional Safety in Canada: can Europe explain?", 3rd Int. Conf. SIAS 2003- Nancy, France. 13-15 Oct. 2003

(Parkinson et al., 2003)

M. Parkinson et D. B. Chaffin, “Measuring and Modeling Operator Maximum Reach Capability and Submaximal Reach Difficulty - Phase 2: Population Models”, University of Michigan, USA 2003 http://arc.engin.umich.edu/arc/research/thrust2/T2MeasuringAndModeling.htm

(Pinna et al., 2005)
T. Pinna, S. Raboin, J. Uzan-Elbez, N. Taylor, L. Semeraro, “EISS Team Methodology for reference accidents definition for ITER”, Fusion Engineering and Design 75-79 (2005) 1103 - 1107

(Polet, 2002)
P. Polet, « Modélisation des franchissements de barrières pour l’analyse des risques des systèmes homme-machine », Laboratoire d’Automatique de Mécanique et d’Informatique Industrielles et Humaines, l’Université de Valenciennes, France 2002

(Polet et al., 2003)
P. Polet, F. Vanderhaegen et R. Amalberti, “ Modelling border-line tolerated conditions of use (BTCU) and associated risks”, Safety Science 41 (2003) 111–136

(PSA, 2005)
”Excerpt from the SINTEF-report : Investigation methodology: Man technology organization”, The Petroleum Safety Authority Norway 2005
http://www.ptil.no/NR/rdonlyres/97CAF402-1D94-4F0C-B5D2-BFF226838AEC/0/MTO_engl.pdf

(Ranta, 2004)
J. Ranta, “Optimal control and flight trajectory optimization applied to evasion analysis”, Systems analysis laboratory department of engineering physics and mathematics Helsinki University of technology, Finland 2004,
www.sal.hut.fi/Publications/pdf-files/tran04.pdf

(Rasche, 2001)
T. Rasche, ”Risk Analysis Methods a Brief Review”, University Of Queensland 2001
http://www.mishc.uq.edu.au/publications/Risk_Analysis_Methods_a_Brief_Review.pdf

(Rausand, 2005a)
M. Rausand, “Chapter 3, System Analysis Failures and Failure Classification” Norwegian University of Science and Technology 2005 http://www.ntnu.no/ross/srt/slides/failure.pdf

(Rausand, 2005b)
M. Rausand, “Chapter 3 System Analysis Event Tree Analysis“, Norwegian University of Science and Technology 2005 http://www.ntnu.no/ross/srt/slides/eta.pdf

(Rausand, 2005c)
M. Rausand, “Chapter 1 Introductionsn“, Norwegian University of Science and Technology 2005 http://www.ntnu.no/ross/srt/slides/chapt01.pdf

(Rausand, 2005d)
M. Rausand, “Chapter 2 Failure Models Part 1: Introduction", Norwegian University of Science and Technology 2005 http://www.ntnu.no/ross/srt/slides/chapt2-1.pdf

(Rausand, 2005e)
M. Rausand, “Chapter 4 Systems of Independent Componentss“, Norwegian University of Science and Technology 2005 http://www.ntnu.no/ross/srt/slides/chapt4-1.pdf

(Rausand, 2005f)
M. Rausand, “Chapter 9 Reliability of Maintained Systems Part 3: Maintenance Planning and Optimization“, Norwegian University of Science and Technology 2005 http://www.ntnu.no/ross/srt/slides/chapt9-3.pdf

(Rausand, 2005g)
M. Rausand, “Chapter 3 System Analysis Fault Tree Analysis“, Norwegian University of Science and Technology 2005 http://www.ntnu.no/ross/srt/slides/fta.pdf

(Rausand, 2005h)
M. Rausand, “HAZOP Hazard and Operability Study”, Norwegian University of Science and Technology 2005 http://www.ntnu.no/ross/srt/slides/hazop.pdf

(Rausand, 2005i)
M. Rausand, “Preliminary Hazard Analysis“,Norwegian University of Science and Technology 2005 http://www.ntnu.no/ross/srt/slides/pha.pdf

(Reed et al., 2003)
M. P. Reed, M. B. Parkinson, et Don B. Chaffin, “A New Approach to Modeling Driver Reach”, 2003
(Rix et al., 1998)
J. Rix et A. Stork, “Combining ergonomic and field-of-view analysis using virtual humans”, Fraunhofer Institute for Computer Graphics, Darmstadt, Germany 1998
http://www.igd.fhg.de/igd-a2/publications/virgoAfact99.pdf
(Ru et al., 1996)
W. G. de Ru et J. H. P. Eloff, “Risk analysis modelling with the use of fuzzy logic”, Computers G Security, Vol. 15, No. 3. pp. 239-248, 1996
(SAFEWORK, 2003)
« SAFEWORK® Pro “, SAFEWORK® Pro™ human modeling technology
http://www.safework.com/safework_pro/features.html
(Saito et al., 2003)
T. Saito et H. Ikeda, “ Stratified Safety Control System of Cooperative Working Robot with Human Worker”,3rd Int. Conf. SIAS 2003- Nancy, France. 13-15 Oct. 2003
(Savic, 2001)
S. Savic, “Integration of management systems in terms of optimization of workplace human performance”, Faculty of Occupational Safety, University of Nis, Series : Working and Living Environmental Protection Vol. 2, N° 1, 2001 PP, 27-38
(Sawacha et al., 1999)
E. Sawacha, S. Naoum et D. Fong, "Factors afecting safety performance on construction sites", International Journal of Project Management Vol. 17, No. 5, pp. 309-315, 1999
(Seitz et al., 1999)
T. Seitz et H. Bubb, “ Measuring of Human Anthropometry”, Posture and Motion SAE International (Society of Automotive Engineers, Inc.) 1999
http://www.ergonomie.tum.de/~seitz/veroeffentlichungen.html&prev
(Shahrokhi et al., 2004a)
M. Shahrokhi et A. Bernard, “Human Modeling In Industrial Design”, “Advances in Design” Springer Series in Advanced Manufacturing, ElMaraghy, Hoda A.; 2006, XXII, 576 p. 264 illus., Hardcover, ISBN: 1-84628-004-4
(Shahrokhi et al., 2004b)
M. Shahrokhi et A. Bernard, “A fuzzy approach for definition of dangerous zone in industrial systems”, IEEE SMC 2004 International Conference on Systems, Man and Cybernetics, aux pays bas. ISBN: 0-7803-8567-5
(Shahrokhi et al., 2004c)
M. Shahrokhi et A. Bernard, “Risk assessment/prevention in industrial design process”, IEEE SMC 2004 International Conference on Systems, Man and Cybernetics, aux Pays Bas. ISBN: 0-7803-8567-5
(Shahrokhi et al., 2005a)
M. Shahrokhi et A. Bernard, « Overview of human modelling techniques in industrial applications » , 17ème Congrès Mondial International Association for Mathematics and Computers in Simulation (IMACS), Paris, France, 11 - 15 Juillet 2005 ISBN: 2-915913-02-1
(Shahrokhi et al., 2005b)
M. Shahrokhi et A. Bernard, « Modelling of the occupational hazards entities in a general model of products, processes and resources », Integrated Design and Production, CPI’2005, 09, 10 & 11 November 2005 Casablanca, Marocco ISBN: 951-38-6261-5
(Shahrokhi et al., 2006a)
M. Shahrokhi et A. Bernard, « Analyses de barrières lors de la conception de systèmes industriels », 6ème conférence francophone de modélisation et simulation modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes : Défis et Opportunités, MOSIM 06, 3-5 avril 2006, Rabat, Marocco
(Shahrokhi et al., 2006b)

M. Shahrokhi et A. Bernard, “Barrier analysis through the industrial design processes”, 9th IFAC Symposium on Automated Systems Based on Human Skill And Knowledge, Nancy, France, 22-24 May 2006

(Shahrokhi et al., 2006c)
M. Shahrokhi et A. Bernard, “A Dynamic Programming based approach to optimise the Operator Trajectory in the Threat Workplace “,7th International Conference devoted to Multi-Objective Programming and Goal Programming, Tours, France June 2006,

(Shahrokhi et al., 2006d)
M. Shahrokhi et A. Bernard, “Barrier analysis through the industrial design processes”, Ergo’IA 2006, Biarritz, 11-12-13 October 2006

(Shahrokhi et al., 2006e)
M. Shahrokhi et A. Bernard, “Applications of human modelling techniques in industrial design context, a multi-agent/multi-scale approach”, Ergo’IA 2006, Biarritz, 11-12-13 October 2006

(Shahrokhi et al., 2006f)
M. Shahrokhi et A. Bernard, “Energy flow /barrier analysis, a novel view”, European Annual Conference on Human Decision-Making and Manual Control, September 27-29, 2006 Valenciennes – France

(Shahrokhi et al., 2006g)
M. Shahrokhi et A. Bernard, “A modelling approach for analysing the barrier effects through the event trees analysis”, European Annual Conference on Human Decision-Making and Manual Control, September 27-29, 2006 Valenciennes – France

(Sharbaugh, 1998)
C. Sharbaugh, ”STRES (AGARD Standardized Tests for Research with Environmental Stressors) Battery”, SC-21/ONR S&T Manning Affordability Initiative
http://www.manningaffordability.com/S&tweb/HEResource/Tool/Shrtdesc/Sh_STRES.htm

(Shimizu et al., 2003)
S. Shimizu et S. Umezaki, “Development of the Safety Design Methodology for the purpose of the Optimum Design of Man-machine Systems”, 3rd Int. Conf. SIAS 2003- Nancy, France. 13-15 Oct. 2003

(Smith, 2003)
D. Smith, “Safety by Design”, 3rd Int. Conf. SIAS - Nancy, France. 13-15 Oct. 2003

(Solteiro Pires et al, 2004)
E. J. Solteiro Pires et J. A. Tenreiro Machado, “An Evolutionary Approach to Robot Structure and Trajectory Optimization”, Univ. Trás-os-Montes e Alto Douro"
http://ave.dee.isep.ipp.pt/~gris/_private/EPires_ICAR01.pdf

(Stewart, 2002)
C. Stewart, ”Introduction to engineering ASU Risk Management”, 2002
http://www.asu.edu/caed/SOD/design/courses/dsc344/Documents/Presentations/guess_speacker_12_04.pdf

(Szpytko et al., 2005)
J. Szpytko et Z. Drzymala et E. Michlowicz, “Operator – specialist crane system model”, International Carpathian Control Conference ICCC’ 2002 Malenovice, Czech republic 2002
http://www.icc-conf.cz/Conference/ICCC2002/Proceedings/papers/161.pdf

(Takagi, 1997)
H. Takagi, “Introduction to Fuzzy Systems, Neural Networks, and Genetic Algorithms”, Kyushu Institute of Design 1997
http://www.kyushu-id.ac.jp/~takagi/TAKAGI/otherPaper/RuanBookA4size.pdf

(Tam et al., 1996)
V. Tam, T. Mores, S. Webb, J. Allinson, R. Lee et E. Bi1imoria, “Application of ALARP to the design of the BP Andrew platform against smoke and gas ingress and gas explosion”, J. Loss Pro. Process Ind. Vol. 9. No. 5. 317-322, 1996

(Tecnomatix, 2003)
Tecnomatix (catalogue) Tecnomatix http://www.tecnomatix.com/showpage.asp?page=555

(Ten Haaf et al., 2002) W. Ten Haaf, H. Bikker, D.J. Adriaanse, “Fundamentals of Business Engineering and Management - A systems approach to people and organisations” 2002

http://130.161.129.68/hlf/b001/H03.pdf
(Ternov et al., 2004)
S. Ternov et et R. Akselsson, "A method, DEB analysis, for proactive risk analysis applied to air traffic control", Safety Science 42 (2004) 657-673
(Tiusanen et al., 2002)
R. Tiusanen et M. Hietikko et J. Alanen, "Procedure and Analysis Methods for Risk Assessment of Automated Working Machinery ", VTT Industrial Systems- Industrial Systems review 2002, ISSN 1459-1804, http://www.vtt.fi/tuo/results/isr2002.pdf
(Tiusanen et al., 2003)
R. Tiusanen et J. Karjalainen, "System level approach for safety risk management of teleoperated working machinery applications", 3rd Int. Conf. SIAS 2003- Nancy, France. 13-15 Oct. 2003
(Tong et al., 2002)
J. Tong, C. A. van Luttervelt et H. Bikker, "A Hybrid Reference Model for Design of Factories", University of Technology, Mekelweg 2, 2628 CD Delft, The Netherlands
(Trencseni, 2004)
M. Trencseni, "Fuzzy Neural SystemsNET"
http://marosoft.hypermart.net/fuzzy_neural_systems/fuzzy_neural_systems.pdf
(Trost et al., 2004)
W.A. Trost et R.J. Nertney, "Barrier Analysis", Technical Research and Analysis Center SCIENTECH, Inc., 1995 http://tis-hq.eh.doe.gov/analysis/trac/29/trac29.pdf
(TUC, 2006)
"Glossary: Usability Engineering Lifecycle Terms"
http://www.thehfe.com/glossary.htm#UseModel/ucd_flow.htm
(Turner et al., 2003)
S. Turner et N. Worsell, " A methodology for assignment of safety integrity levels in IEC 62061", 3rd Int. Conf. SIAS 2003- Nancy, France. 13-15 Oct. 2003
(Twomey et al., 1993)
J. M. Twomey, A. E. Smith, M. S. Redfern, "A Predictive Model for Slip Resistance Using Artificial Neural Networks", University of Pittsburgh 1993
http://www.pitt.edu/~aesmith/postscript/dcofiie.pdf
(Tyler, 2004)
S. Tyler, "MIDAS (Man-Machine Integration Design and Analysis Systems)", http://ccf.arc.nasa.gov/af/aff/midas/www/Core_Midas.html
(UOF, 2002)
"Radiation Safety Fundamentals Workbook", University of California, Santa Cruz Environmental Health & Safetyr, USA 2002
http://ehs.ucsc.edu/Lab_Research_Safety/Pubs/Ram/Rsfw58.pdf
(Vanderhaegen, 1999)
F. Vanderhaegen, "APRECIH: a human unreliability analysis method - application to railway system", Control Engineering Practice 7 (1999) 1395-1403
(Van der Schaaf, 1995)
T. W. van der Schaaf, "Near miss reporting in the chemical process industry: an overview", Microelectron. Reliab., Vol. 35 Nos 9-10, PP 1233-1243 1995
(Van Houten et al., 2005)
F.J.A.M. van Houten et F. Kimura, "The virtual maintenance system: A computer-based support tool for robust design, product monitoring, fault diagnosis and maintenance planning", International CIRP design seminar, design in the new economy 6-8 June, 2001 at KTH Stockholm, Sweden
(Viganò et al., 2004)
G. Viganò, Z. Liao, M. Sacco, S. Mottura, et C. R. Boër, "To Build Object-Oriented Virtual Factory Based on Virtual Reality and Simulation Tools", Institute of Industrial Technologies and Automation - National Research Council of Italy (ITIA-CNR) 2002
(Wang et al., 2004)

Q. Wang et J. S. Arora, "Optimization-Based Formulations for Simulation and Design of Dynamic Digital Human Models", The University of Iowa, USA 2004 http://www.digital-humans.org/Report2004/Documents/14-OptimizationBasedFormulations.htm

(Weber et al., 2005)
P. Weber et L. Jouffe, "Complex system reliability modelling with Dynamic Object Oriented Bayesian Networks (DOOBN)", Reliability Engineering and System Safety 91 (2006) 149-1620

(Wiendahl et al., 2005)
H. P. Wiendahl, T. Harms et C. Fiebig, "Virtual Factory Design – A New Tool for a Cooperative Planning Approach", Institute of Production Systems and Logistics, University of Hanover 2002 http://www.dur.ac.uk/det2002/proceedings/part3.pdf

(Wheeler, 2000)
L. J. Wheeler, " Management of process risk during the design phase of a project", Worley Pty Ltd http://www.cape.canterbury.ac.nz/webdb/Apcche_Proceedings/APCChE/Data/701rev.pdf

(Wightman, 2004)
D. Wightman, "TAWL (Task Analysis Workload)"

(Willquista et al., 2003)
P. Willquista et M. Tôrner, "Identifying and analysing hazards in manufacturing industry a review of selected methods and development of a framework for method applicability", International Journal of Industrial Ergonomics 32 (2003) 165–180

(Wu et al., 2004)
R. C. Wu et C.T. Lin, S.F. Liang, et T.Y. Huang et T.P. Jung, "EEG-Based Fuzzy Neural Network Estimator for Driving Performance", International Conference on Systems, Man and Cybernetics October 10-13 2004 The Hague, The Notherlands

(Wunsch et al., 2005)
D. C. Wunsch II, "Fuzzy Logic in Engineering Ethics Analysis", Applied Computational Intelligence Lab, Dept. Electrial & Computer Engineering University of Missouri, Rollal http://web.umr.edu/~asee/Papers/51%20Wunsch%20Fuzzy%20Logic%20in%20Ethics.pdf

(Xudong et al., 1999)
Z. Xudong et D. B. Chaffin, "Effects of Speed Variation on Joint Kinematics during Multisegment Reaching Movements", Human movement Science 1999, vol. 18, no6, pp. 741-757

(Yang et al., 2004)
J. Yang and E. P. Pitarch, "Kinematic Human Modeling", Center for Computer-Aided Design - College of Engineering, The University of Iowa, USA 2004 http://www.digital-humans.org/Report2004/

(Ying, 2002)
H. Ying, "Fuzzy Systems Technology: A Brief Overview", Wayne State University 2002 http://gseacademic.harvard.edu/~elsheish/

(Zachary et al., 2001a)
W. Zachary, G. E. Campbell, K. R. Laughery, F. Glenn et J. A. Cannon-Bowers, "The application of human modeling technology to the design, evaluation and operation of complex systems", NASA Human and Organizational Risk Management Workshop 2001 http://human-factors.arc.nasa.gov/april01-workshop/zachary.pdf

(Zachary et al., 2001b)
W. Zachary, G. Campbell, R. Laughery et F. Glenn, "Application of human modeling technology to the design, operation, and evaluation of complex systems", Systems, Inc. http://www.manningaffordability.com/s&tweb/PUBS/CogModWksp/FinalCogModWkspRpt.PDF

(Zadeh, 1998)
L. A. Zadeh, "The Key Roles of Fuzzy Information Granulation in Human Reasoning", NASA, USA 1998, http://www.dbai.tuwien.ac.at/marchives/fuzzy-mail98/0788.html

(Zha et al., 2003)

X.F. Zha et S.Y.E. Lim, “Intelligent design and planning of manual assembly workstations: A neuro-fuzzy approach”, 2003 Computer & Industrial Engineering 44 (2003) 611-632

(Zhang et al., 2004)

Z. Zhang, A. Chaali, F. Vanderhaegen, “A comparative study on prediction of human operator violation using neural networks “, 2004 International Conference on Systems, Man and Cybernetics October 10-13 2004 The Hague, The Netherlands

(Zimmer, 1999)

G. Zimmer, "The Definition of Psychology”
http://www.chelationtherapyonline.com/anatomy/p92.htm

(Zink, 2003)

K. J. Zink, “From Industrial Safety to Corporate Health Management”, Kaiserslautern University of Technology 2003
http://iea2003.org/s_program/abstract.html

(ZIO, 2002)

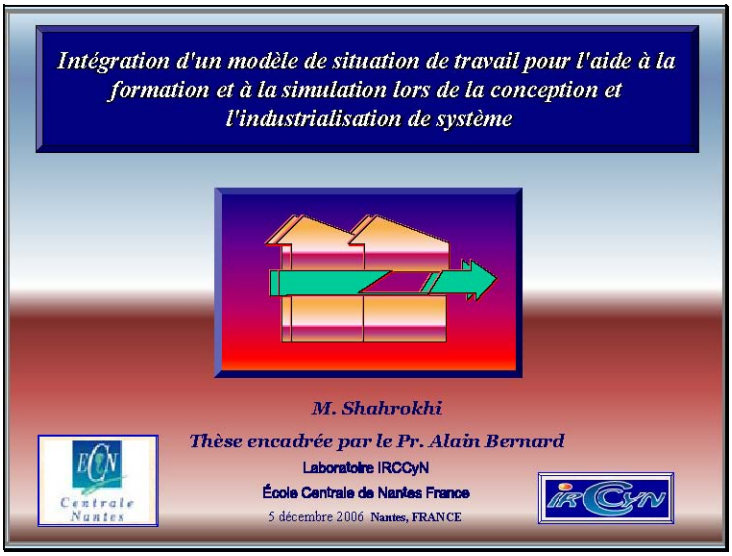
E. Zio, “Event tree analysis”, Dipartimento di Ingegneria Nucleare Politecnico di Milano - Technical University –Italy 2002
http://www.cesnef.polimi.it/corsi/sicura/Event.pdf

(ZIO, 2004)

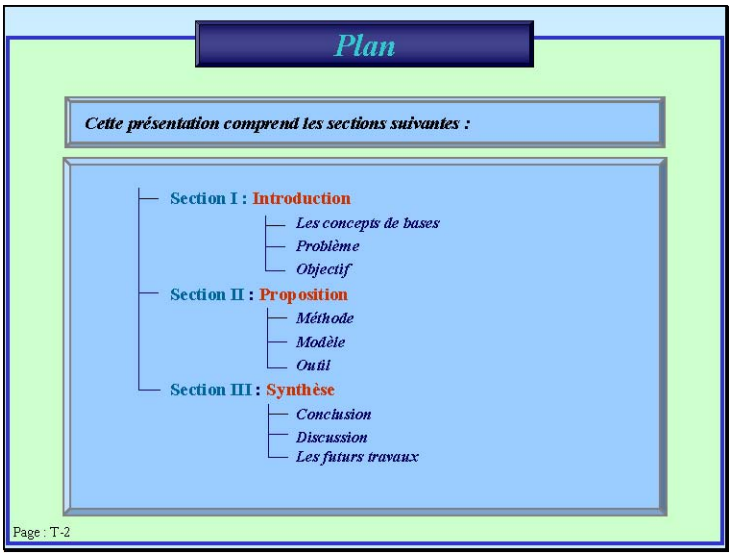
E. Zio, “Importance measures”, Dipartimento di Ingegneria Nucleare Politecnico di Milano Ce.S.N.E.F. - Centro Studi Nucleari Enrico Fermi Via Ponzio 34/3 - 20133 Milano –Italy 2004
http://www.cesnef.polimi.it/corsi/sicura/importance%20measures%202004.pdf

ANNEXE (LES DIAPOSITIVES DE LA PRESENTATION)

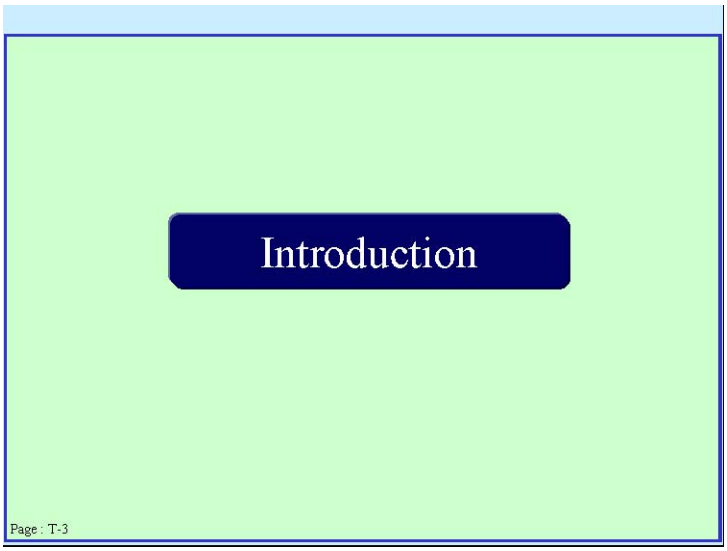
Diapositive 1



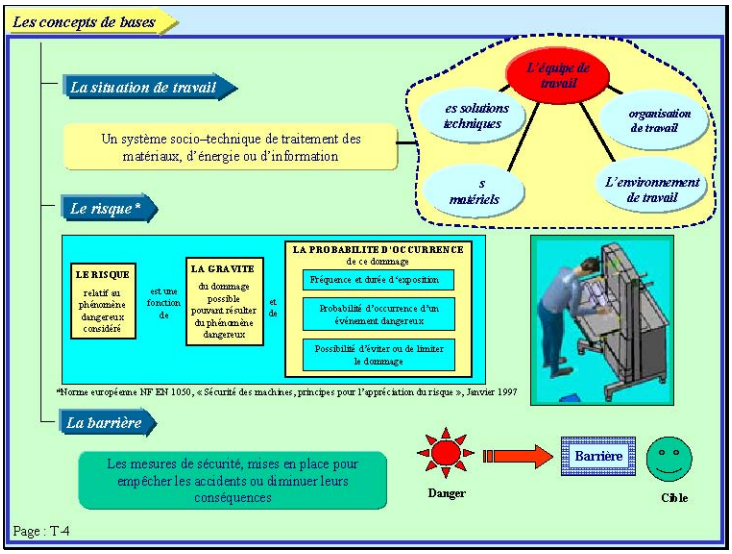
Diapositive 2



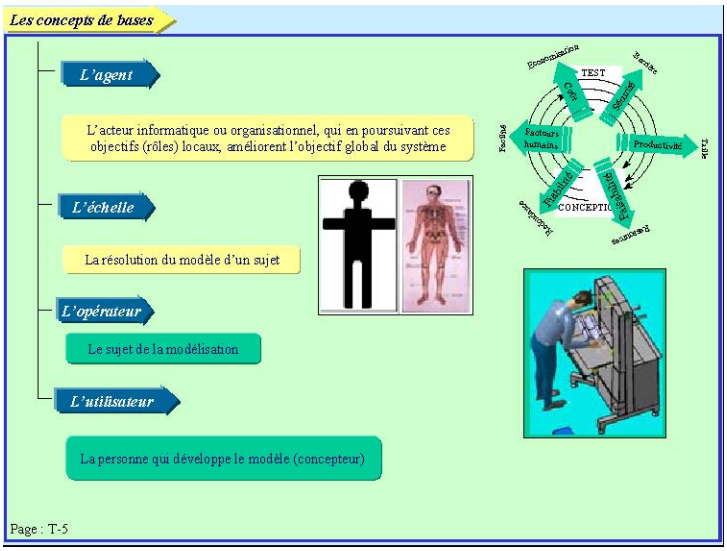
Diapositive 3



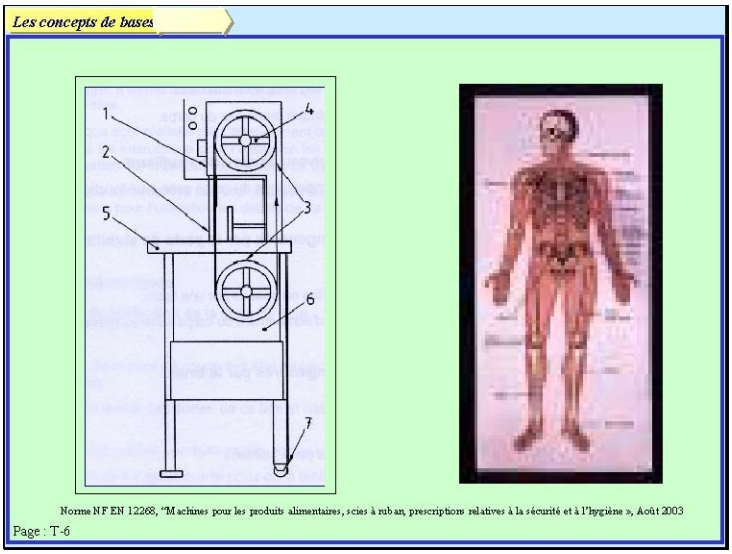
Diapositive 4



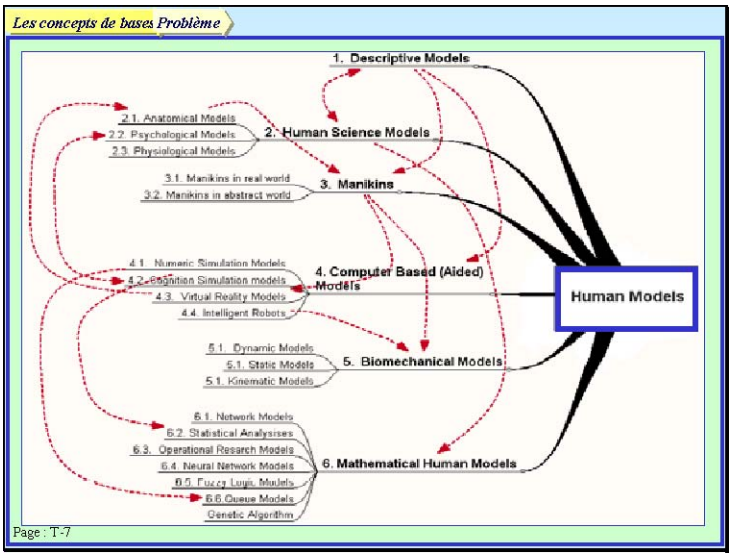
Diapositive 5



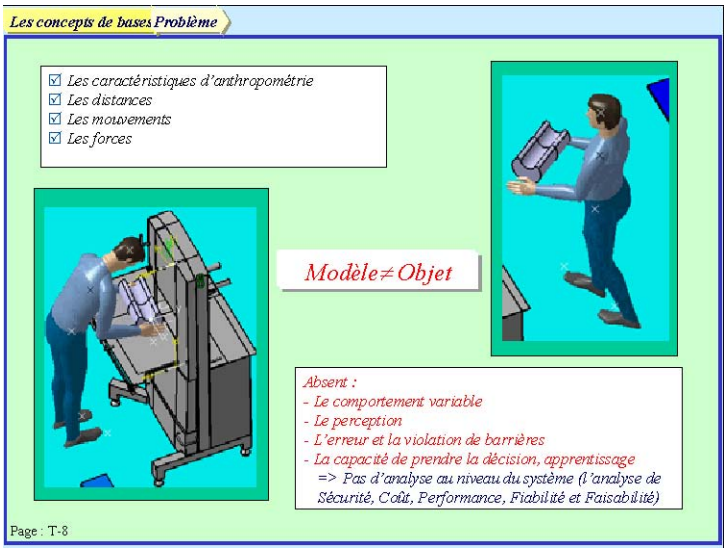
Diapositive 6



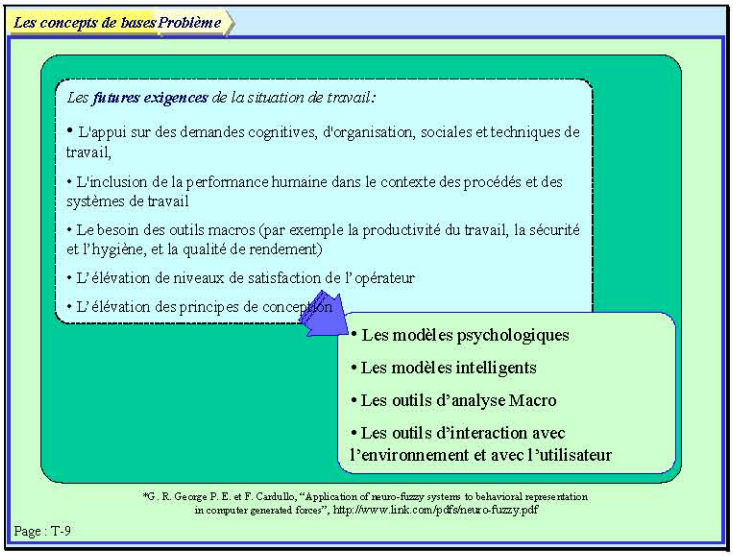
Diapositive 7



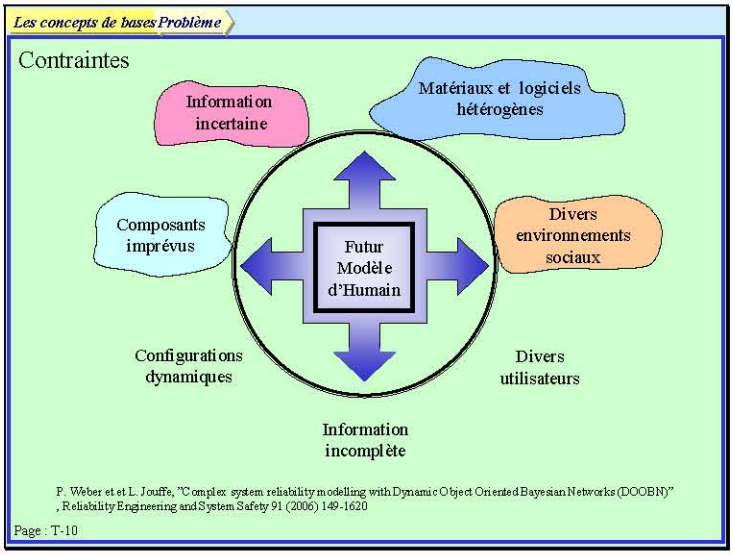
Diapositive 8



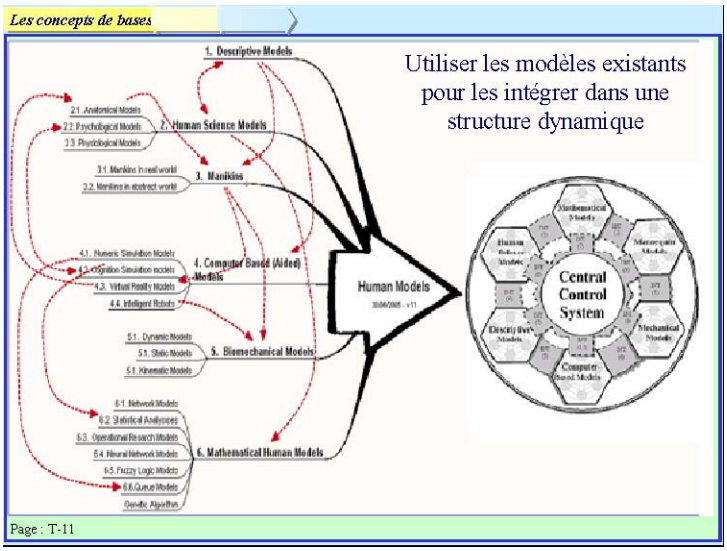
Diapositive 9



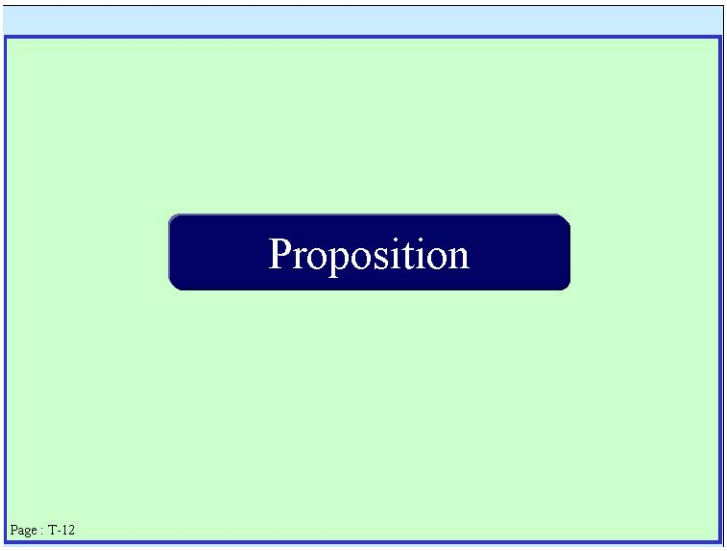
Diapositive 10



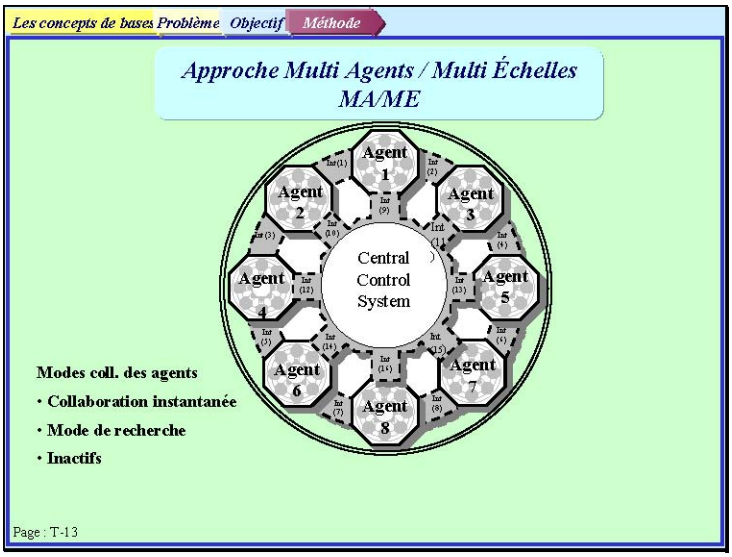
Diapositive 11



Diapositive 12

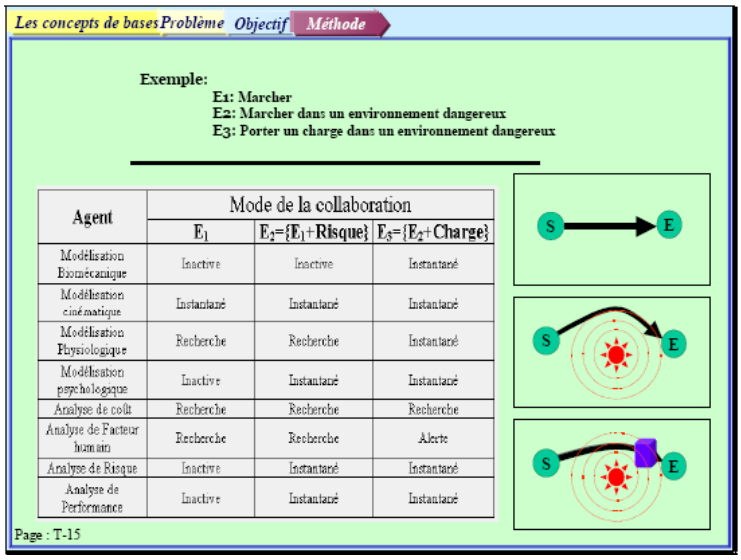


Diapositive 13



Diapositive 14

Diapositive 15



Les concepts de bases Problème Objectif Méthode

Exemple:

E1: Marcher
E2: Marcher dans un environnement dangereux
E3: Porter un charge dans un environnement dangereux

Agent	Mode de la collaboration		
	E_1	E_2={E_1+Risque}	E_3={E_2+Charge}
Modélisation Biomécanique	Inactive	Inactive	Instantané
Modélisation cinématique	Instantané	Instantané	Instantané
Modélisation Physiologique	Recherche	Recherche	Instantané
Modélisation psychologique	Inactive	Instantané	Instantané
Analyse de coût	Recherche	Recherche	Recherche
Analyse de Facteur humain	Recherche	Recherche	Alerte
Analyse de Risque	Inactive	Instantané	Instantané
Analyse de Performance	Inactive	Instantané	Instantané

Page : T-15

Diapositive 16

Les concepts de bases Problème Objectif Méthode

Approche MA/ME

Agents de modélisation

- Modélisation anatomique (MA)
- Modélisation biomécanique (MB)
- Modélisation cinématique (MK)
- Modélisation physiologique (MP)
- Modélisation psychologique (MS)

Agents d'analyse

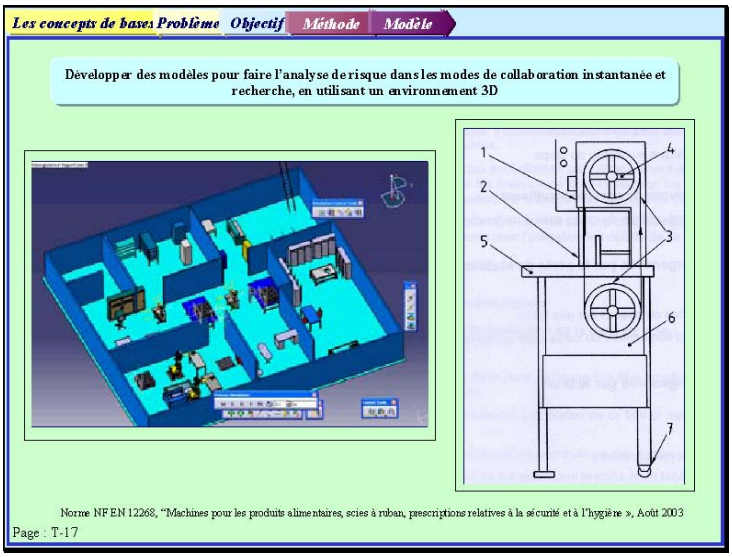
- Analyse des facteurs humains (AH)
- Analyse de risque (AR)
- Analyse économique (AE)
- Analyse de performance (AP)

Les échelles :

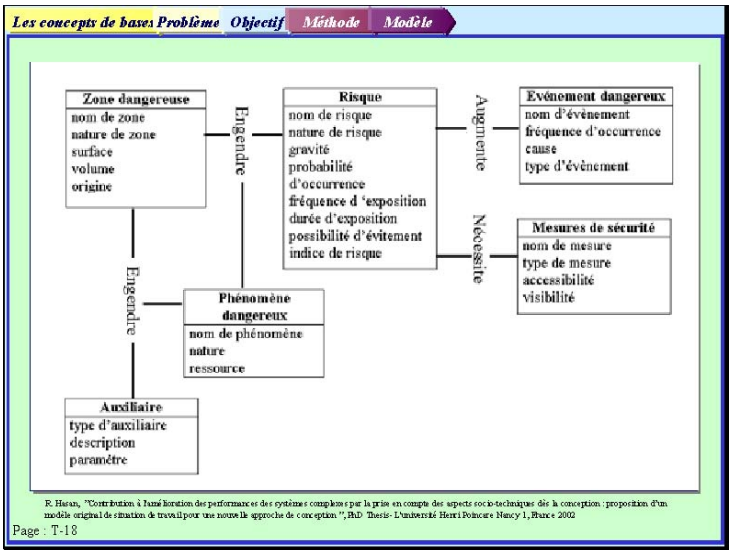
- *L'analyse de groupe de travail*
- *L'analyse de corps entier*
- *L'analyse d'organe*
- *La micro-analyse*

Page : T-14

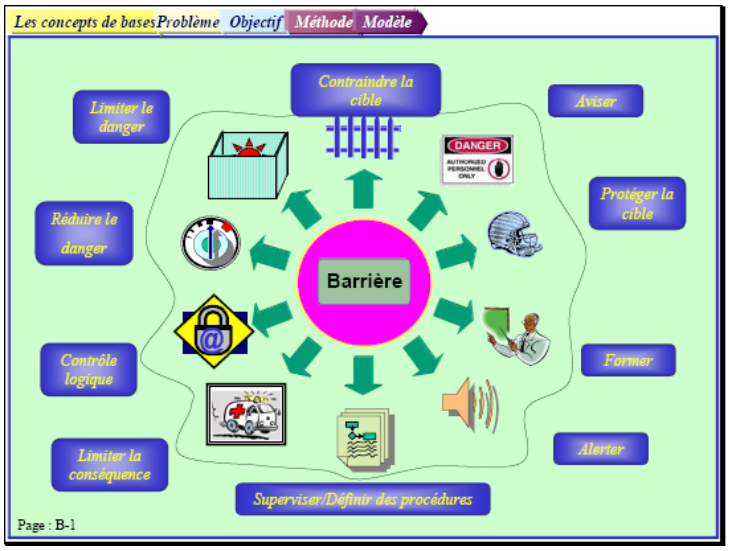
Diapositive 17



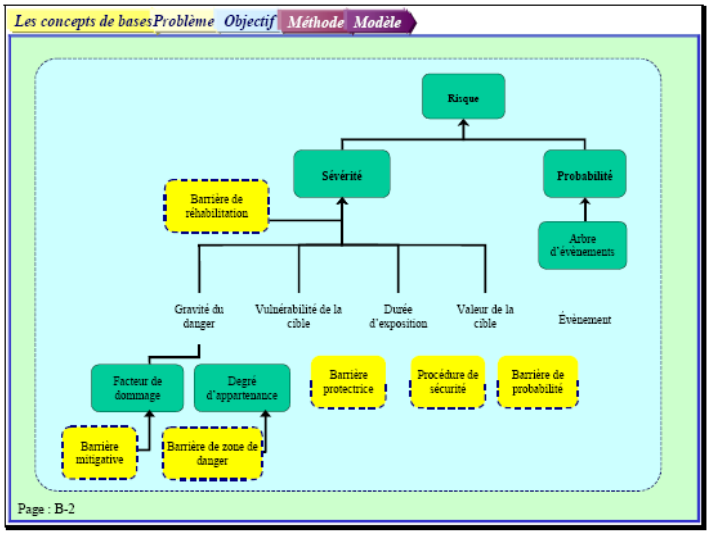
Diapositive 18



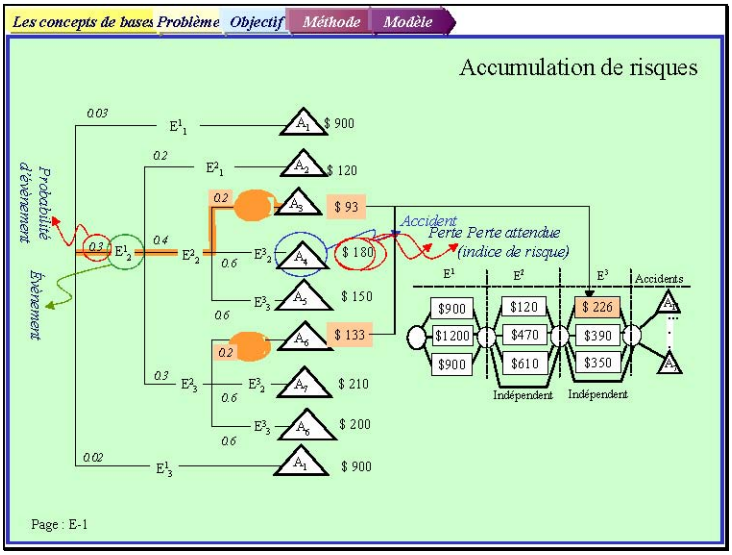
Diapositive 19



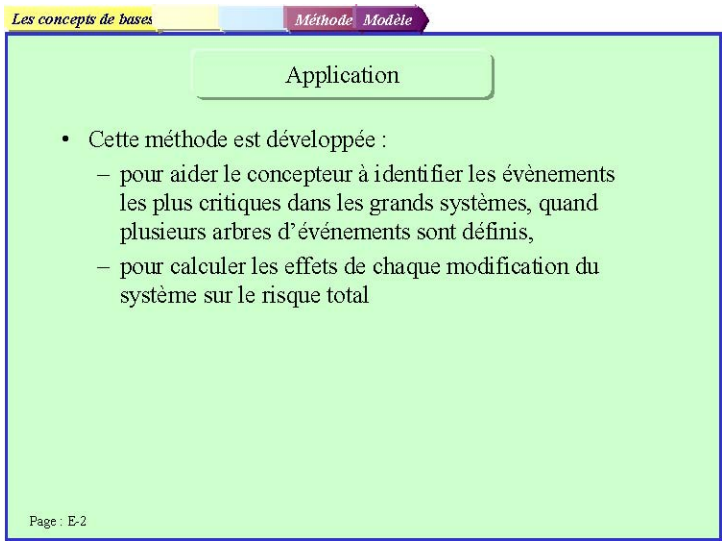
Diapositive 20



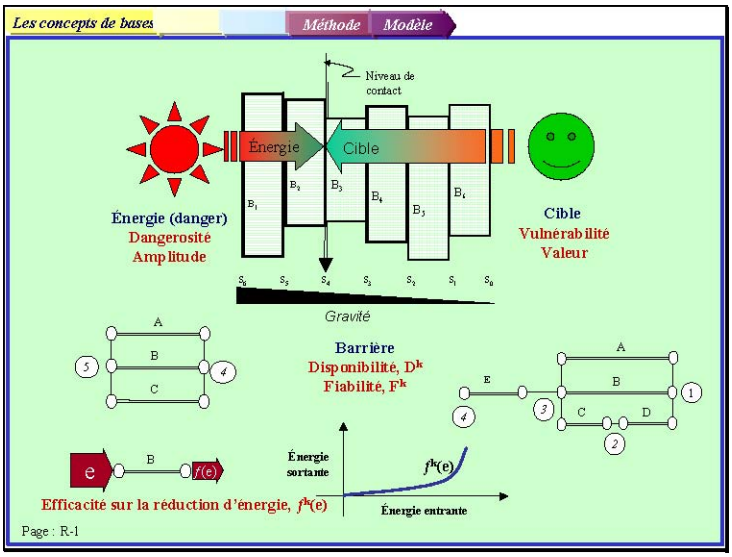
Diapositive 21



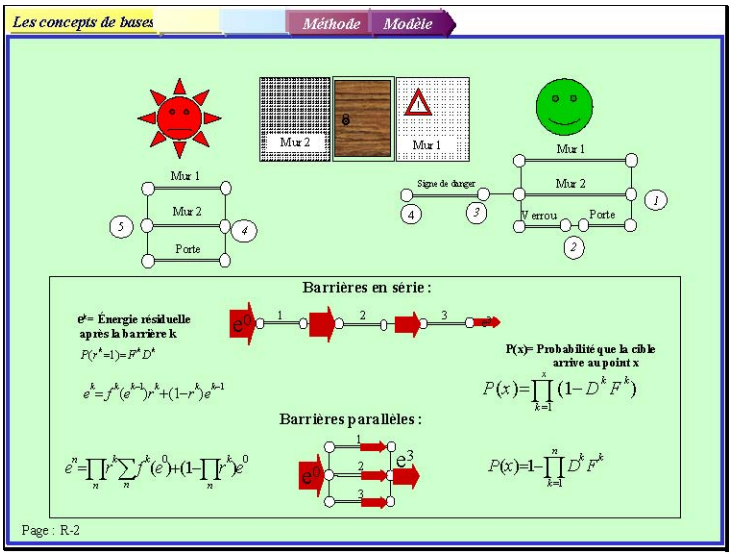
Diapositive 22



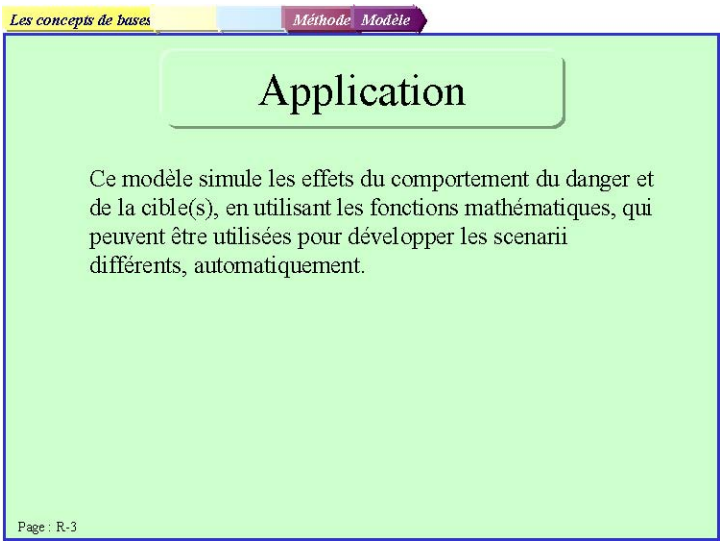
Diapositive 23



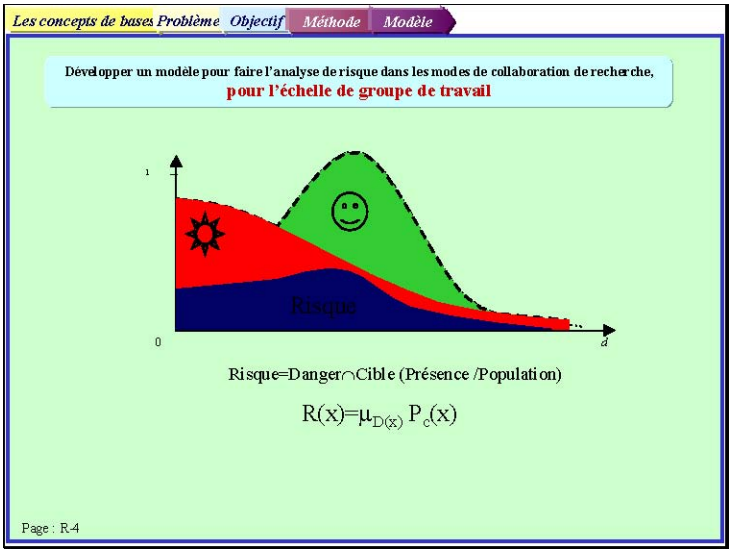
Diapositive 24



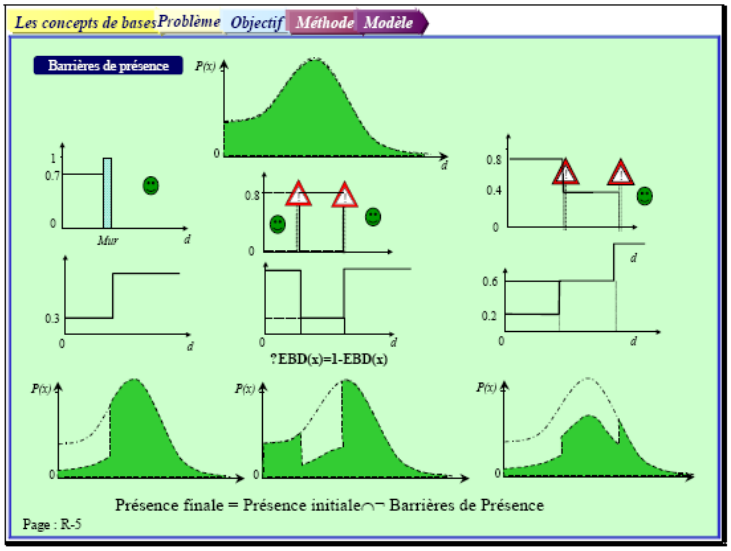
Diapositive 25



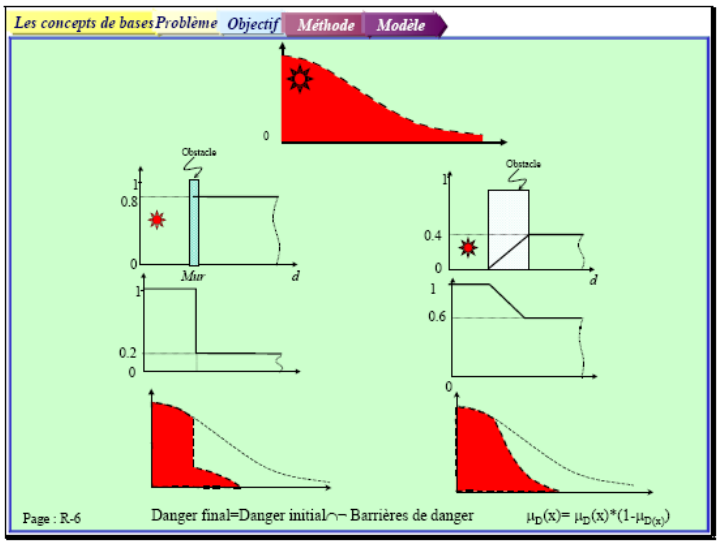
Diapositive 26



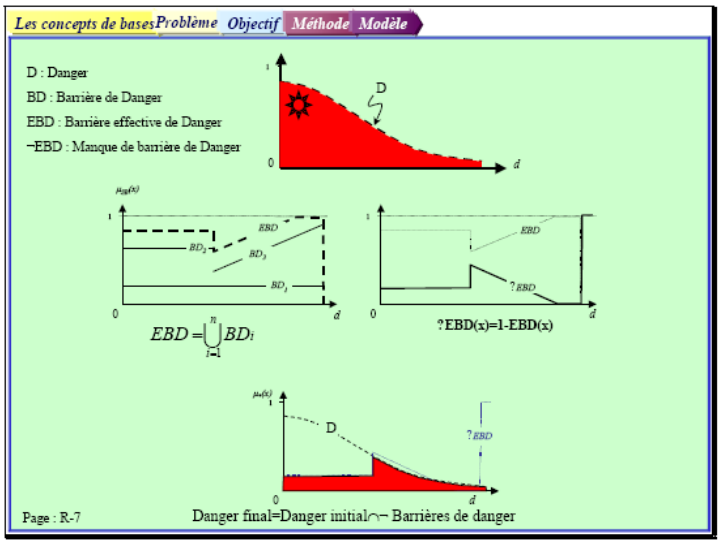
Diapositive 27



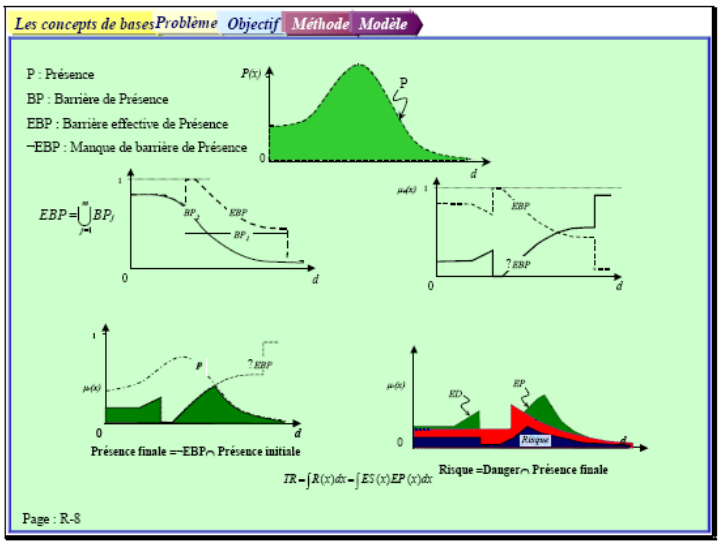
Diapositive 28



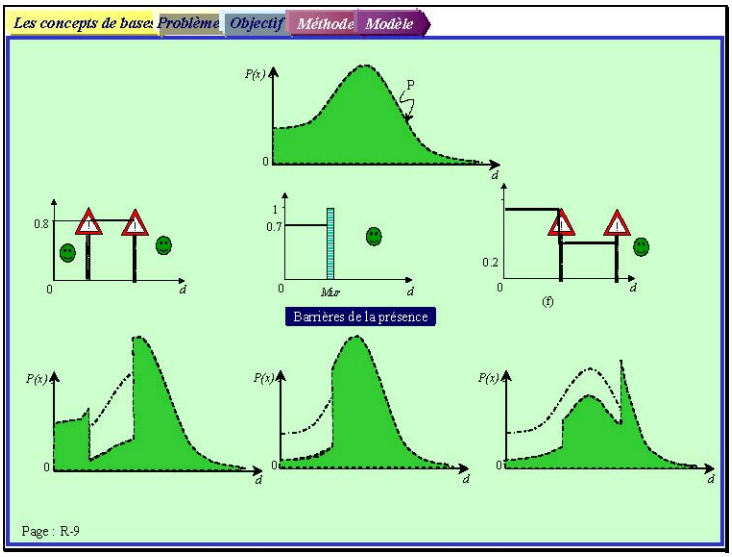
Diapositive 29



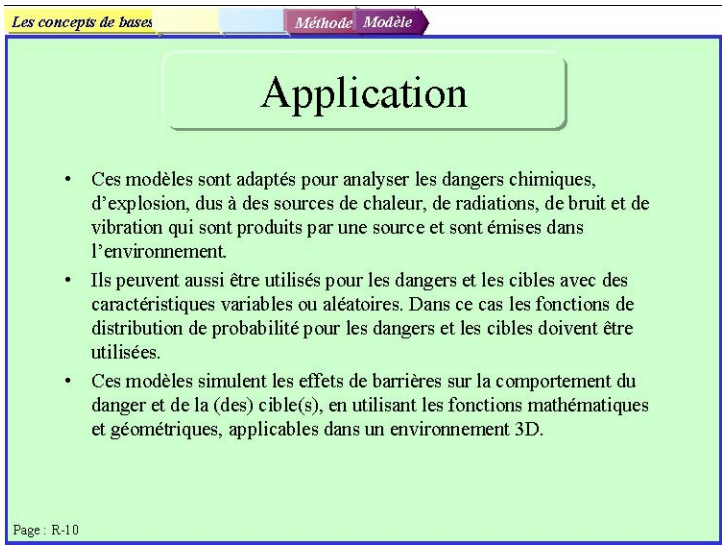
Diapositive 30



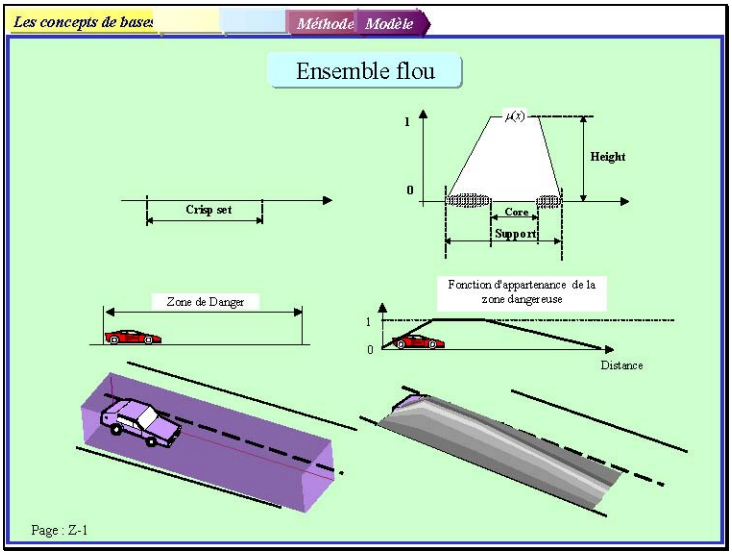
Diapositive 31



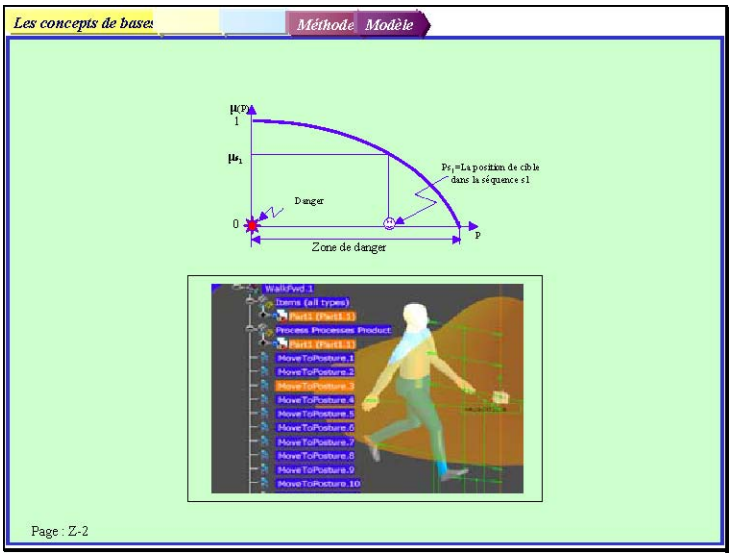
Diapositive 32



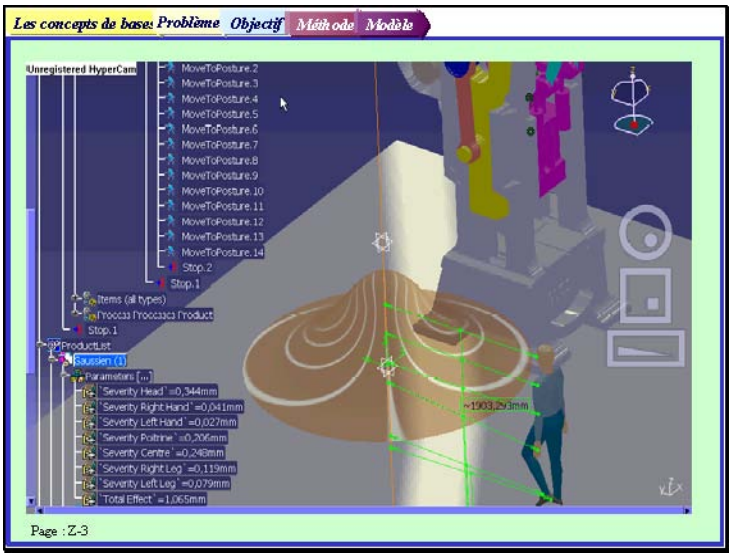
Diapositive 33



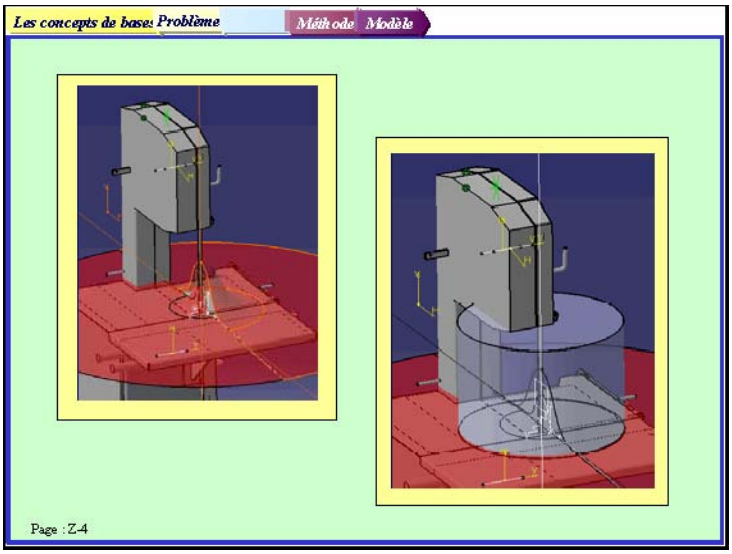
Diapositive 34



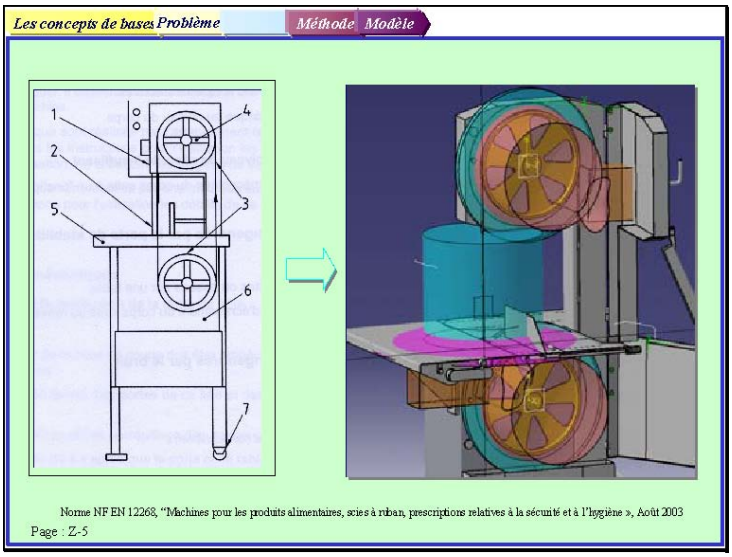
Diapositive 35



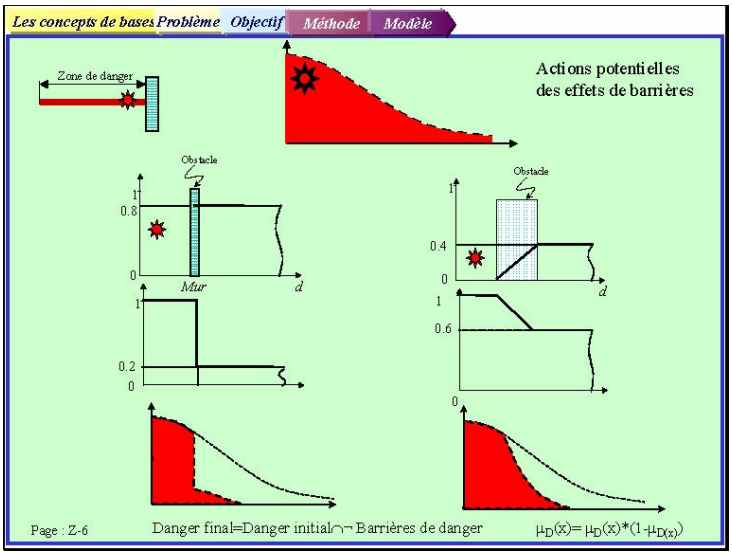
Diapositive 36



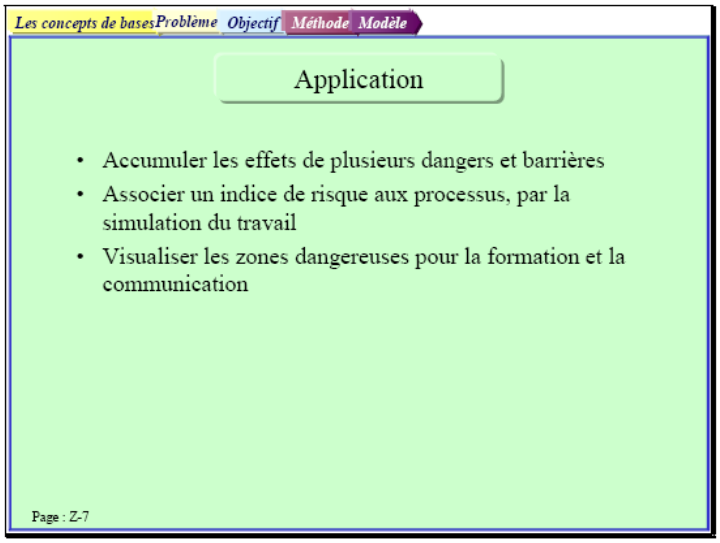
Diapositive 37



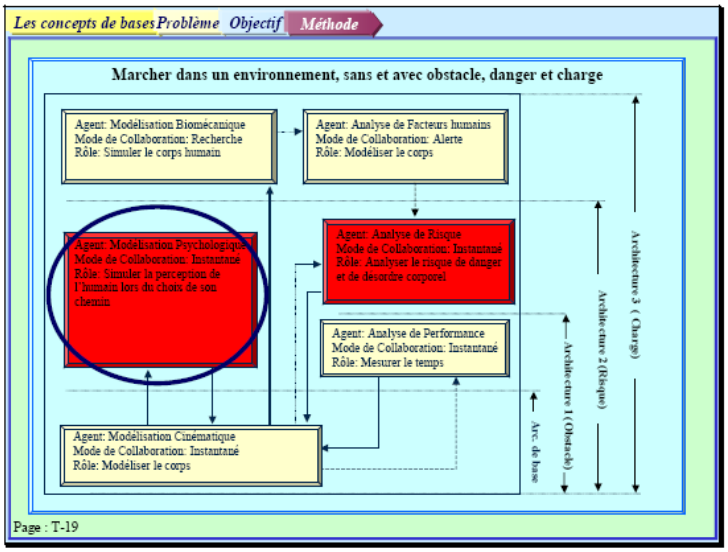
Diapositive 38



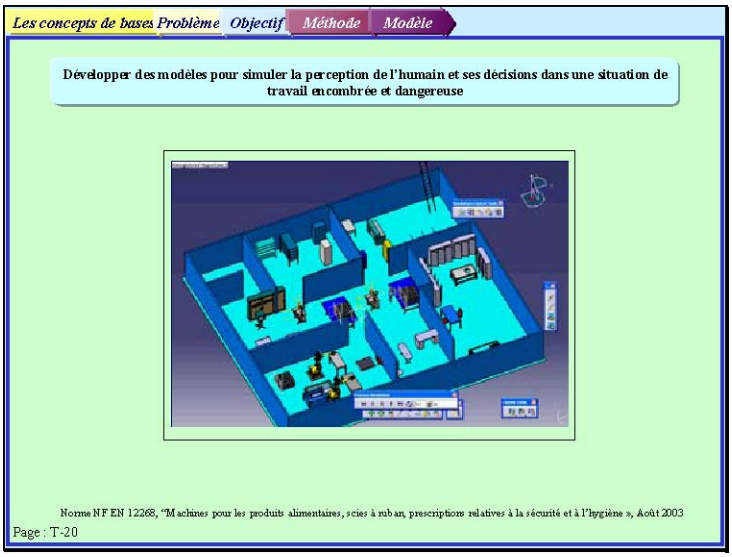
Diapositive 39



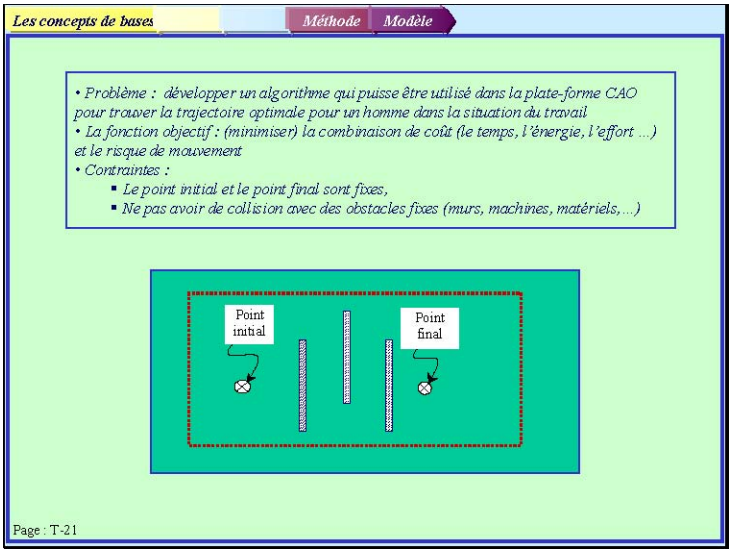
Diapositive 40



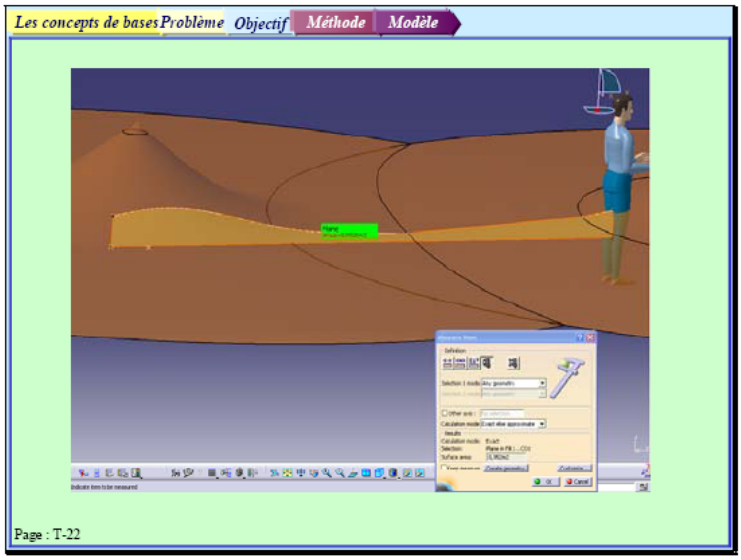
Diapositive 41



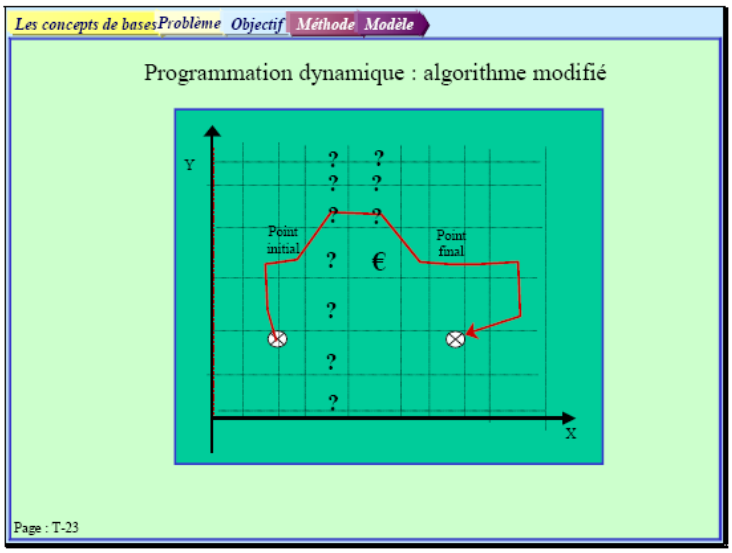
Diapositive 42



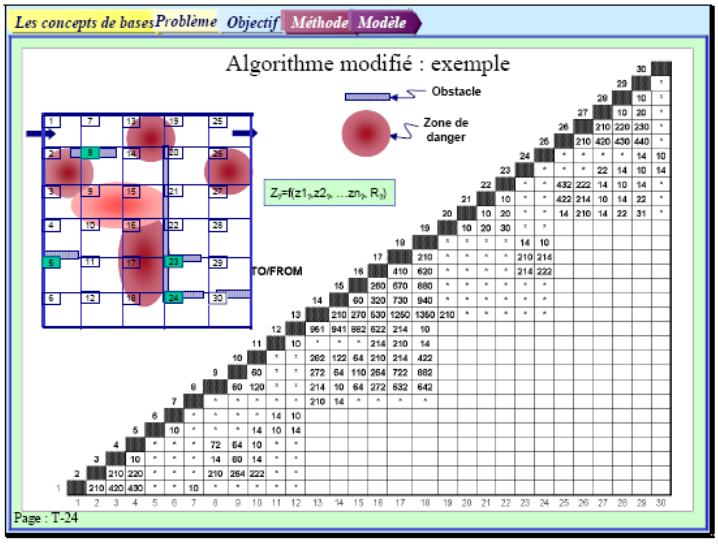
Diapositive 43



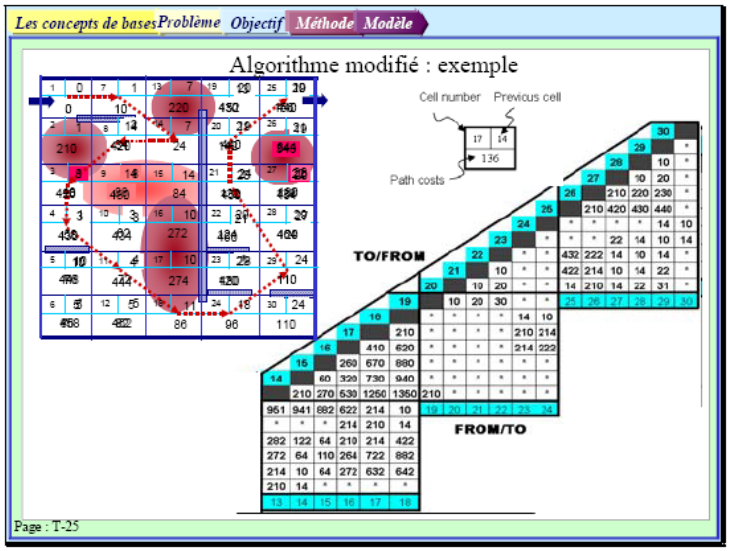
Diapositive 44



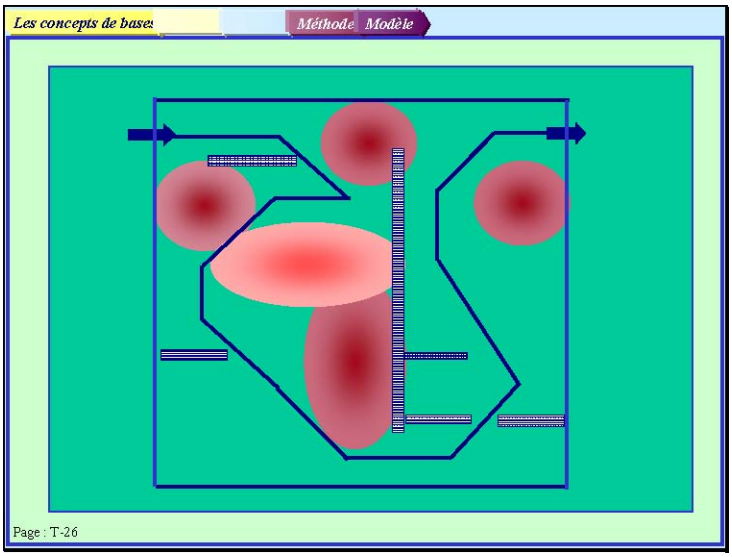
Diapositive 45



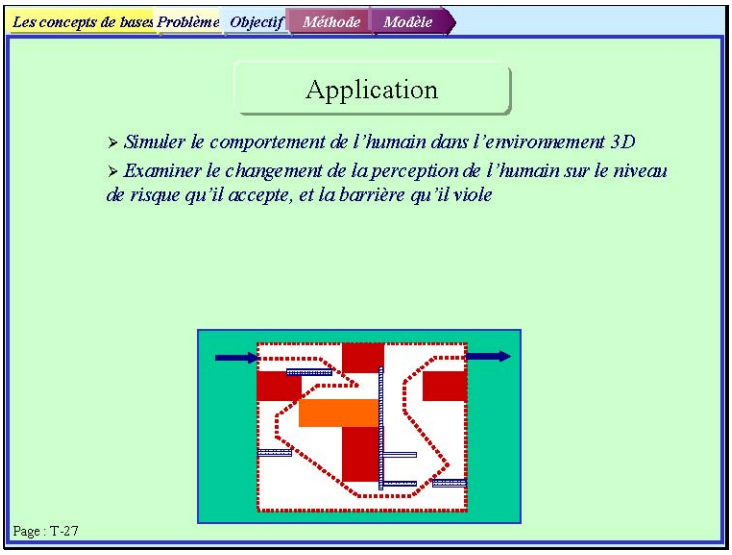
Diapositive 46



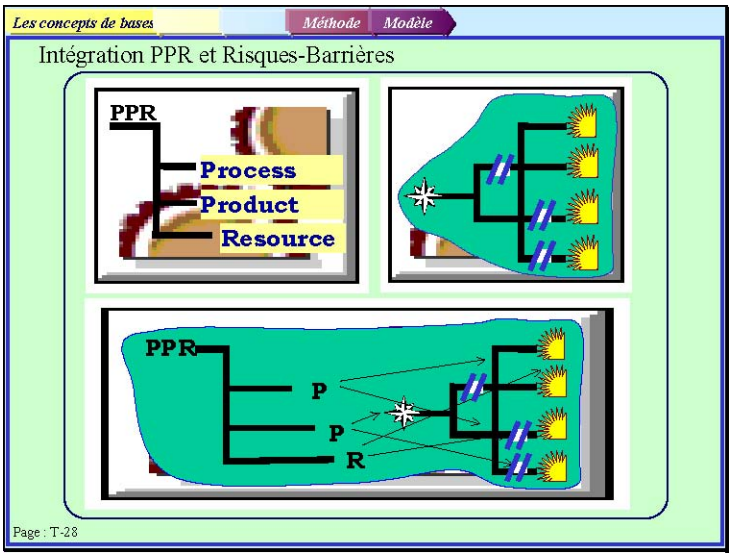
Diapositive 47



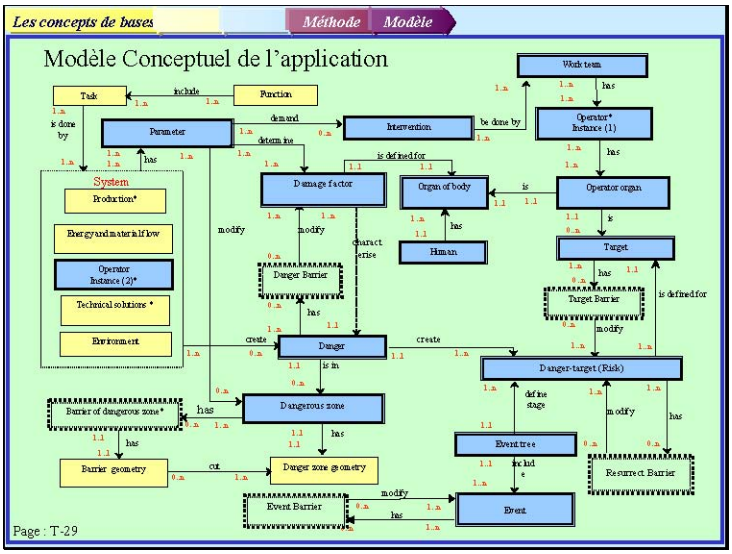
Diapositive 48



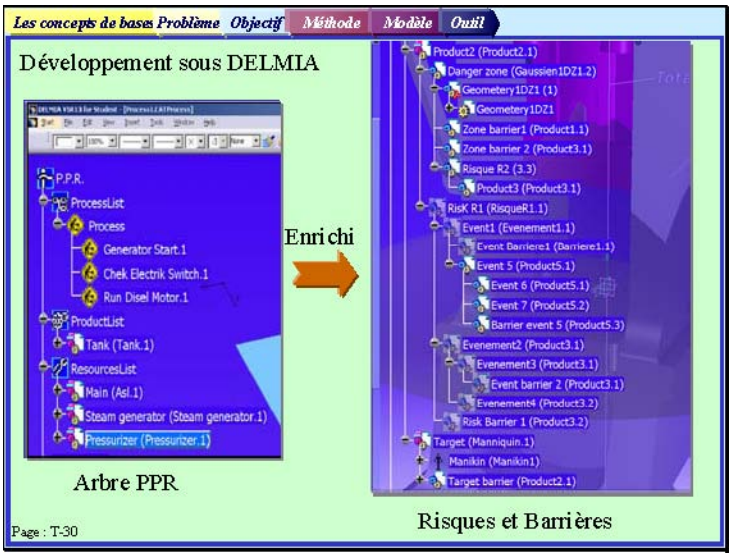
Diapositive 49



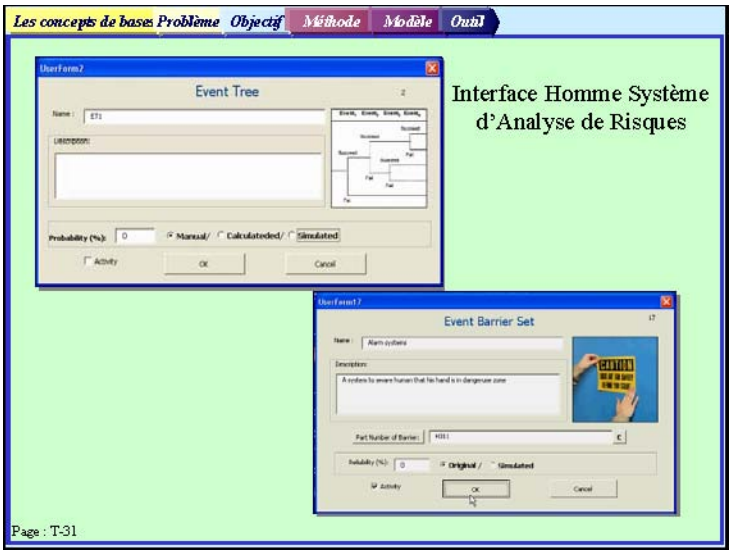
Diapositive 50



Diapositive 51

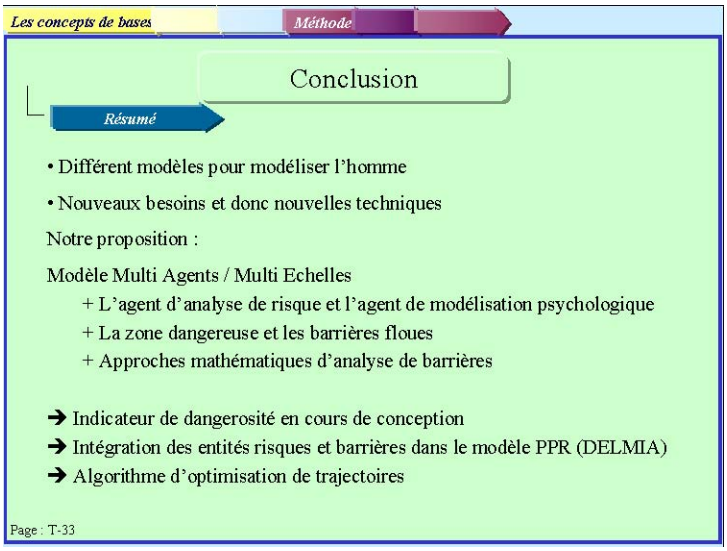


Diapositive 52

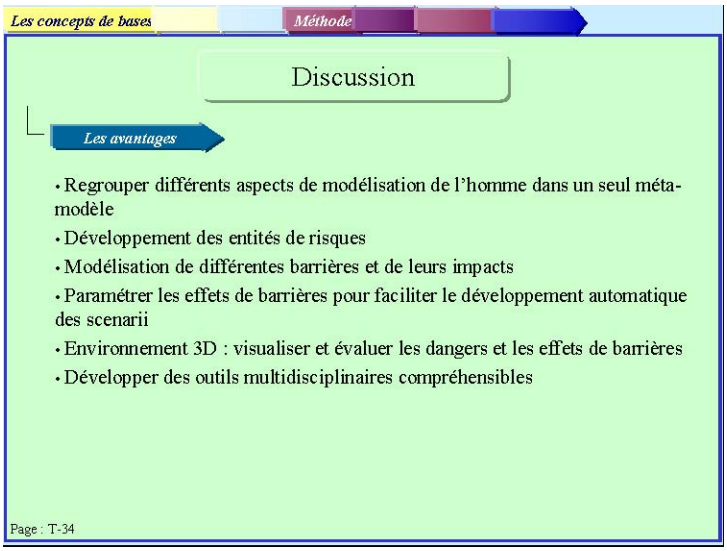


Diapositive 53

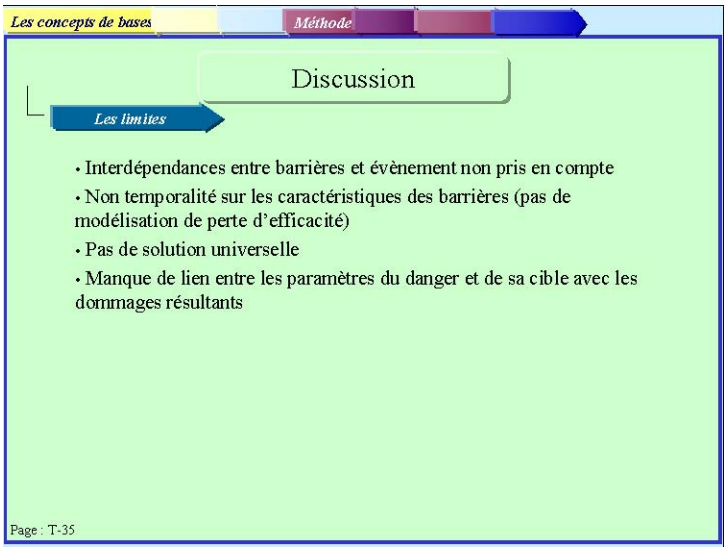
Diapositive 54



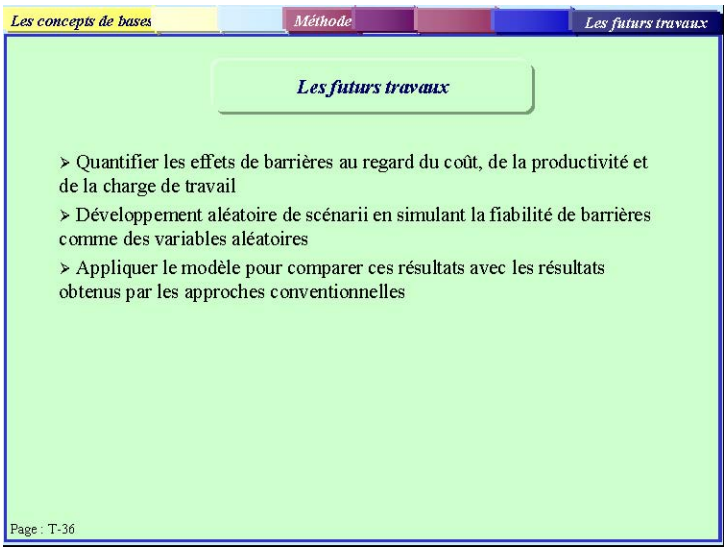
Diapositive 55



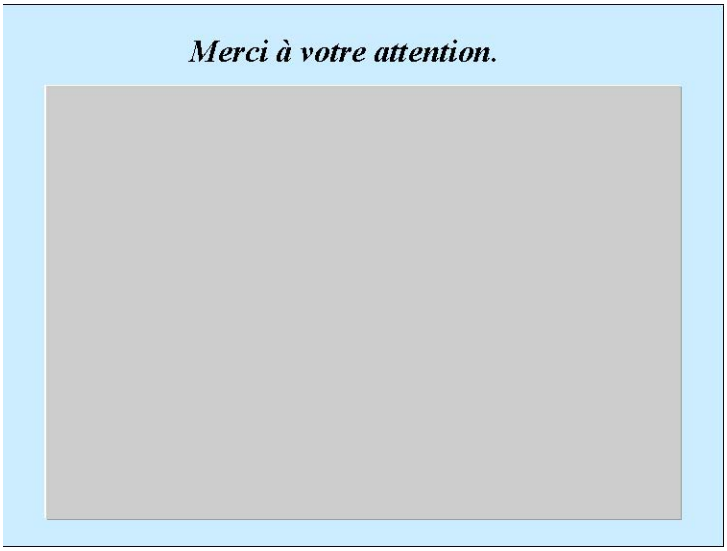
Diapositive 56



Diapositive 57



Diapositive 58



Titre : Intégration d'un modèle de situation de travail pour l'aide à la formation et à la simulation lors de la conception et l'industrialisation de systèmes

Résumé : Dans cette thèse nous nous intéressons à la définition des modèles d'humains pour leur prise en compte dans les situations de travail durant les phases de conception des systèmes industriels.
Les différents modes d'interventions de l'homme (normal, dégradé, maintenance, dépannage, etc.) et tous les aspects de son intervention (ergonomie, sécurité, respect des normes, .. .) sont considérés.
Dans ces cadres, nous avons envisagé et classifié les différents modèles d'humain dans les situations de travail en indiquant leurs spécificités et leurs applications dans les différents domaines.
Nous proposons un modèle plus intégré, regroupant des aspects indispensables (mathématiques, sciences humaines, modèles descriptifs et réalité virtuelle) avec une interface mixte de logique floue et classique.
Enfin, nous avons particulièrement étudié les modèles construits en ingénierie virtuelle afin d'améliorer les applications actuelles pour ajouter de nouveaux points de vues, plus généraux, plus flexibles et plus réalistes au sein des outils de conception de systèmes.
Nous proposons une nouvelle approche pour définir des zones dangereuses de situation de travail dans un environnement virtuel ou augmenté.
Notre proposition finale est un ensemble de modèles et de processus d'évaluation de performance applicables dans le cadre d'environnements d'ingénierie de production assistée par ordinateur.

Mots-clés : Système de production, Système socio-technique, Analyse de risque, Conception de système industriel.

Title: Integration of a working situation model for an aided approach for training and simulation during design and industrialization of systems

Abstract: In this thesis we are interested in the definition of the human models for their integration in the working situation definition during the design phases of industrial systems.
Various modes of interventions of the man (normal, damaged, maintenance, breakdown service, etc.) and all aspects of its intervention (ergonomics, safety, respect of the standards, etc.) are considered.
Within these frameworks, we consider and classify the various human models in the working situations by indicating their specificities and their applications in the various fields.
We then proposed a more integrated model, gathering essential aspects (mathematical, social sciences, descriptive models and virtual reality) with a mixed interface of fuzzy and traditional logic.
Lastly, we particularly studied the models actually built for virtual engineering in order to improve the current applications to add new points of sights, more general, more flexible and more realistic within the tools used for system design..
We propose a new approach to define danger zones of working situation in a virtual or augmented reality environment.
Our final proposal is a set of models and processes of applicable performance evaluation methods within the framework of computer-aided production engineering environments.

Keywords: Production system, Socio-technical system, Risk analyzes, Conception of industrial system.

Discipline : Sciences de l'Ingénieur