



HAL
open science

OPTIMISATION MULTICRITERE DE LA FIABILITE: APPLICATION DU MODELE DE GOAL PROGRAMMING AVEC LES FONCTIONS DE SATISFACTIONS DANS L'INDUSTRIE DE TRAITEMENT DE GAZ

Dorra Ayadi

► **To cite this version:**

Dorra Ayadi. OPTIMISATION MULTICRITERE DE LA FIABILITE: APPLICATION DU MODELE DE GOAL PROGRAMMING AVEC LES FONCTIONS DE SATISFACTIONS DANS L'INDUSTRIE DE TRAITEMENT DE GAZ. Autre. Université d'Angers, 2010. Français. NNT: . tel-00738462

HAL Id: tel-00738462

<https://theses.hal.science/tel-00738462>

Submitted on 4 Oct 2012

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.

**OPTIMISATION MULTICRITERE DE LA FIABILITE :
APPLICATION DU MODELE DE GOAL PROGRAMMING
AVEC LES FONCTIONS DE SATISFACTIONS DANS
L'INDUSTRIE DE TRAITEMENT DE GAZ**

THESE DE DOCTORAT EN COTUTELLE

Spécialité: Science de l'ingénieur

ECOLE DOCTORALE D'ANGERS

Spécialité: Méthodes Quantitatives

ECOLE DOCTORALE DE SFAX

Présenté et soutenu publiquement le 01/10/2010

A l'Institut des Sciences et Techniques de l'Ingénieur d'Angers

Par Mme Dorra AYADI AZZABI

Devant le jury:

Younes BOUJELBENNE	Président	Professeur à l'Institut Supérieur d'Administration des Affaires de Sfax
Abdefetteh TRIKI	Rapporteur	Professeur à l'Institut Supérieur de Gestion de Tunis
Zohra CHERFI	Rapporteur	Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne
Abdessamad KOBİ	Examineur	Professeur à l'Institut des Sciences et Technologies de l'Ingénieur d'Angers
Habib CHABCHOUB	Examineur	Professeur à l'Institut des Hautes Etudes Commerciales de Sfax
Christian ROBLEDO	Examineur	Maître de conférences à l'Institut des Sciences et Technologies de l'Ingénieur d'Angers

Directeurs de thèse: **Pr. Abdessamad KOBİ et Pr. Habib CHABCHOUB**

Co-encadrant: **Mr. Christian ROBLEDO**

Laboratoire: *LASQUO: Laboratoire en Sécurité de fonctionnement, Qualité et Organisation à l'ISTIA d'Angers.*
GIAD: Unité de recherche en Gestion Industrielle et Aide à la Décision à FSEG Sfax.

Remerciements

J'exprime mes profonds remerciements à mes directeurs de thèse, professeur **Abdessamad KOBİ** et professeur **Habib CHABCHOUB**, qui m'ont permis d'effectuer cette thèse. Leurs soutiens, leurs confiances et leurs disponibilités m'ont permis de m'épanouir sereinement tout au long de mes travaux.

J'adresse également mes vifs remerciements à Mr. **Christian ROBLEDO** pour son aide, sa disponibilité, ses judicieux conseils pendant toute la durée de ma thèse. Sa patience et sa pédagogie sont exemplaires, son œil critique m'a été très précieux pour guider et structurer ces trois années de travail.

Je remercie aussi **Mr. Mohamed ELLOUZE** ingénieur sécurité dans **BRITISH GAS TUNISIE** pour son accueil sympa, ses aides précieuses pour effectuer ce travail de recherche.

Je ne saurais assez exprimer mes remerciements les plus sincères aux membres de jury qui ont bien accepté d'évaluer ce travail.

Mes remerciements vont à tous les membres du laboratoire **LASQUO** et **GIAD** qui m'ont accueilli durant ces trois années, L'ambiance chaleureuse est propice un travail efficace.

Je remercie infiniment mon mari **Lotfi AZZABI** pour ses aides précieuses la compréhension des impératifs qu'entraîne un tel travail, et pour ses encouragements réguliers.

Dédicaces

A Lotfi et Mohamed Rayen

A toute la famille

AYADI

Et toute la famille

AZZABI

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1: PROBLEMATIQUE DE LA FIABILITE	7
INTRODUCTION	9
1. Evolution du concept fiabilité.....	9
1.1. Définition du concept fiabilité	10
1.2. Historique de la fiabilité.....	11
1.3. Les approches de la fiabilité.....	13
1.4. Typologie de la fiabilité	15
2. Fiabilité humaine.....	16
2.1. Définition de la fiabilité humaine	16
2.2. Fiabilité humaine et champs connexe	18
2.2.1 Fiabilité humaine et ergonomie	18
2.2.2 Fiabilité humaine et sécurité	19
2.2.3 Fiabilité humaine et qualité	20
2.3. Le comportement de l'opérateur humain	21
3. Démarche d'analyse de la fiabilité humaine.....	22
3.1. La tâche, travail prescrit: définition du concept	23
3.2. Classification des tâches.....	24
3.3. Tâche effective et tâche prescrite	26
4. L'erreur humaine	28
4.1. Définition de l'erreur humaine.....	29
4.2. Nature de l'erreur humaine.....	29
4.2.1 Modèle de Rasmussen	29
4.2.2 Approche de Reason	31

4.2.3 Classification des erreurs de Swain et Guttman.....	33
4.2.4 Classification des erreurs	33
4.2. Manager l'erreur humaine.....	34
5. Méthode d'analyse de l'erreur humaine.....	35
5.1. La décomposition de la tâche «THERP»	36
5.2. La prise en compte du modèle de Rasmussen «SHERPA»	37
5.3. La prise en compte des facteurs de performance «SLIM»	38
5.4. La prise en compte de l'analyse rétrospective «CREAM»	40
5.5. La prise en compte de l'approche de Reason «ATHEANA».....	42
5.6. Méthode d'analyse préliminaire des conséquences de l'infiabilité humaine «APPRECIH»	44
5.7. Méthode d'analyse de la fiabilité et ergonomie opérationnelle «MAFERGO».....	46
5.8. Méthode d'analyse et de développement des performances de la fiabilité humaine organisationnelle et technique d'un système socio-technique «FHORTE©»	48
CONCLUSION	50
CHAPITRE 2: METHODE ET MODELE D'ANALYSE DES RISQUES	51
INTRODUCTION	53
1. Notion de risque	53
1.1. Définition du risque	53
1.2. Risque et dangers	56
1.3. Risque et sécurité	57
1.4. Risque acceptable et risque majeur.....	58

2. Typologie du risque	61
2.1. Les risques de l'entreprise	62
2.1.1 Les risques différenciés par origine	62
2.1.2 Les risques différenciés par conséquence.....	63
2.1.3 Les risques différenciés par leur niveau d'assurabilité.....	64
2.1.4 Les risques différenciés par leur domaine d'activité	64
2.2. Les risques professionnels.....	64
2.2.1 Les risques mécaniques	65
2.2.2 Les risques physiques.....	65
2.2.3 Les risques dus aux manutentions	65
2.2.4 Les risques chimiques	66
2.2.5 Les risques biologiques.....	66
2.2.6 Les risques de transport de matières dangereuses	67
2.2. Les risques nucléaires	67
3. Analyse du risque	68
3.1. Identification des risques	69
3.2. Evaluation des risques	71
3.3. Traitement des risques	74
3.4. Suivi et capitalisation des risques.....	76
4. Méthode d'analyse et d'évaluation du risque	76
4.1. Méthode d'analyse du système en fonctionnement normal.....	77
4.1.1 Méthode diagramme bloc	77
4.1.2 Méthode graphe de fluence.....	78
4.2. Méthode d'analyse du système en fonctionnement dégradé.....	78
4.2.1 Méthode d'analyse préliminaire des dangers(APD).....	79
4.2.2 Méthode d'analyse des modes de défaillances et de leurs effets(AMDE)	80
4.2.3 Méthode d'analyse des effets des erreurs des logiciels (AEEL)	81
4.2.4 Méthode de diagramme de succès (MDS).....	81
4.2.5 Méthode de l'arbre de défaillance (AD)	82

4.2.6 Méthode de la table de vérité (MTV)	83
4.2.7 Méthode des combinaisons des pannes résumées (MCPR).....	83
4.2.8 Méthode de l'arbre des conséquences (MACQ).....	84
4.2.9 Méthode du diagramme causes-conséquences (MDCC)	86
4.2.10 Méthode de l'espace des états (MEE).....	86
 4.3. Méthode d'analyse du système de conception et suivi de projet	 88
4.3.1 Méthode Structured Analysis Design Technique (SADT)	88
4.3.2 Méthode MERISE	89
 CONCLUSION	 91
 CHAPITRE 3: LA DECISION MULTICRITERE.....	 93
 INTRODUCTION	 96
 1. Aide à la décision	 96
1.1. Définition de l'aide à la décision	96
1.2. La problématique de la décision	98
1.3. Le processus de décision	101
1.4. Démarche de modélisation	102
 2. Analyse multicritère d'aide à la décision.....	 103
2.1. Définition de l'aide multicritère à la décision	103
2.2. Contexte et cadre de l'aide multicritère à la décision.....	106
2.3. Démarche de l'aide multicritère à la décision	107
 3. Les méthodes de l'analyse multicritère d'aide à la décision ...	 110
3.1. Les méthodes de l'approche unique de synthèse	110
3.1.1 Technique for order preference by similarly to ideal solution (TOPSIS) ...	110
3.1.2 Simple multi-attribute rating technique (SMART)	113
3.1.3 Multiple Attribute Value Theory (MAVT).....	113
3.1.4 Multiple Attribute Utility Theory (MAUT)	115

3.1.5 Utility Theory Additive (UTA)	116
3.1.6 Analytic Hierarchy Process (AHP).....	117
3.1.7 La méthode EVAMIX	120
3.2. Les méthodes de surclassement de synthèse	120
3.2.1 Les méthodes PROMETHEE	121
3.2.2 Les méthodes ELECTRE	125
3.2.3 Les méthodes basées sur la fiabilité (MACBETH)	129
3.3. Les méthodes interactives.....	132
3.4. Procédure de choix d'une AMC.....	133
3.4.1 Caractérisation des inputs.....	134
3.4.2 Caractérisation des outputs	135
3.4.3 Caractérisation des méthodes d'aides à la décision multicritère selon les inputs et les outputs	136
4. Les méthodes d'optimisation mathématiques multicritères ...	137
4.1. La méthode de critère globale	137
4.2. La programmation mathématique à objectifs multiples	138
4.3. ϵ - Constraint Method.....	138
4.4. Le compromise programming(CP)	139
4.5. Le goal programming(GP).....	139
4.5.1 Le goal programming pondéré	141
4.5.2 Le goal programming lexicographique	141
4.5.3 Le goal programming minmax	142
4.5.4 Le goal programming incluant des fonctions de satisfactions	143
4.5.5 Le goal programming avec intervalle.....	146
4.5.6 Le goal programming flou	148
4.5.7 Le goal programming interactive	149
4.6. Procédure de choix d'une méthode d'optimisation mathématique....	150

5. Critiques des méthodes d'aides à la décision multicritères et d'optimisation mathématique multicritère	150
5.1. Avantages et inconvénients des méthodes d'aides à la décision multicritère	151
5.2. Avantages et inconvénients des méthodes d'optimisation mathématiques multicritères.....	153
5.3. Comparaison entre, des méthodes d'aides à la décision multicritère et les méthodes d'optimisation mathématiques multicritères	154
CONCLUSION	155
CHAPITRE 4: MODELE D'OPTIMISATION MULTICRITERE DE LA FIABILITE	157
INTRODUCTION	158
1. Problématique d'optimisation de la fiabilité	158
1.1. Optimisation multicritère	159
1.2. Les conditions d'optimisation multicritère.....	160
1.3. Les problèmes d'optimisation multicritère.....	161
1.3.1 Constraints satisfaction problem (CSP)	162
1.3.2 Les solutions de Constraints satisfaction problem.....	162
1.3.3 Représentation de Constraints satisfaction problem.....	163
1.4. L'optimisation multicritère pour l'aide à la décision	164
2. modèle d'optimisation de la fiabilité humaine.....	166
2.1. Analyse de l'existant.....	169
2.2. Identification des dangers.....	172
2.3. Identification des risques	175
2.4. Classement des risques.....	177
2.5. Optimisation de la fiabilité humaine.....	180

2.6. Suivi et contrôle.....	183
CONCLUSION.....	186
CHAPITRE5: EXPERIMENTATION DU MODELE D’OPTIMISATION MULTICRITERE DE LA FIABILITE DANS BRITISH GAZ TUNISIE	187
INTRODUCTION	189
1. Usine d’Hannibal British Gaz	189
1.1. Présentation.....	189
1.2. Le système de contrôle de l’usine.....	194
2. Santé, Sécurité et Environnement(HSE)	195
2.1. Le système de gestion HSE.....	195
2.2. Behaviour Based Safety.....	197
3. Expérimentation du modèle d’optimisation de la fiabilité humaine.....	198
3.1. Analyse de l’existant.....	198
3.2. Identification des dangers.....	202
3.3. Identification des risques	205
3.4. Classement des risques	214
3.5. Optimisation de la fiabilité humaine.....	221
3.5.1 Minimisation des risques explosion.....	221
3.5.2 Minimisation des risques d’incendie	234
3.5.3 Minimisation des risques de fatigue respiratoire	245
3.5.4 Minimisation des risques d’atteinte cellulaire irréversible	256
3.5.5 Minimisation des risques d’arrêt cardiaque.....	269
3.6. Contrôle et suivi	280

CONCLUSION.....	284
CONCLUSION GENERALE	285
BIBLIOGRAPHIE	289
ANNEXE 1	309
ANNEXE 2	313
ANNEXE 3	324
ANNEXE 4	340

Liste des figures

Figure 1: Interrelation entre les différents types de la fiabilité	16
Figure 2: Pratiques de la fiabilité humaine	17
Figure 3: Champs connexes entre la fiabilité humaine et l'ergonomie	19
Figure 4: Champs connexes entre la fiabilité humaine et la sécurité	20
Figure 5: Champs connexes entre la fiabilité humaine et qualité	21
Figure 6: Ce modèle canonique du processus.....	24
Figure 7: De la tâche prescrite à la tâche effective	26
Figure 8: Écarts entre le travail prescrit et le travail effectif	27
Figure 9: Formes schématiques d'écart entre le prescrit et l'interprété	28
Figure 10: Modèle décisionnel de Rasmussen	31
Figure 11: Classification des erreurs selon Reason	32
Figure 12: Trajectoire des accidents selon Reason.....	34
Figure 13: L'analyse rétrospective et prédictive de la méthode CREAM...	41
Figure 14: Le processus de réalisation de la méthode ATHEANA	43
Figure 15: Démarche d'analyse de la fiabilité humaine dans APRECIH...	45
Figure 16: Les étapes de MAFERGO	47
Figure 17: Champ lexical du risque.....	55
Figure 18: Ingrédient du risque	55
Figure 19: Champ connexe entre dangers et risque.....	57
Figure 20: Champ connexe entre sécurité et risque.....	58
Figure 21: Perception du risque acceptable	59
Figure 22: Perception du risque majeur	60
Figure 23: Champ connexe entre risque majeur et risque acceptable	61
Figure 24: Risque et origine	63
Figure 25: Les différentes étapes d'analyse du risque	68
Figure 26: Identification des risques	69
Figure 27: Evaluation des risques	71
Figure 28: Matrice de hiérarchisation des risques.....	73
Figure 29: Traitement des risques	74
Figure 30: Système en boîte noire	77
Figure 31: Graphe de succès.....	82
Figure 32: Arbre des causes ou arbre de défaillance	83
Figure 33: Démarche de la MCPR	84

Figure 34: Elaboration d'un arbre des conséquences selon la démarche déductive	85
Figure 35: Elaboration d'un arbre des conséquences selon la démarche inductive.....	85
Figure 36: Graphe d'états pour un système de deux composants	87
Figure 37: Structuration des données de traitement selon la méthode MERISE.....	90
Figure 38: Problématique de choix	98
Figure 39: Problématique de Tri.....	99
Figure 40: Problématique de Rangement	100
Figure 41: Problématique de Description	100
Figure 42: Processus de décision	102
Figure 43: Préférence entre les actions a et b selon le vrai critère.....	104
Figure 44: Préférence entre les actions a et b selon le quasi -critère.....	105
Figure 45: Préférence entre les actions a et b selon le pré-critère	105
Figure 46: Démarche top-down d'analyse multicritère	108
Figure 47: Démarche bottom-up d'analyse multicritère	108
Figure 48: Démarche intermédiaire d'analyse multicritère	109
Figure 49: Illustration des distances à l'idéal et à l'anti-idéal.....	111
Figure 50: La structure hiérarchique.....	118
Figure 51: Différents types de critères	124
Figure 52: La procédure MACBETH.....	130
Figure 53: Fonction type satisfaction.....	145
Figure 54: Fonction de pénalité à 5 segments de forme U.....	147
Figure 55: Forme triangulaire de la fonction d'appartenance	148
Figure 56: Représentation de 3 variables (A, B, C) et les 3 contraintes (A \neq B, A > B, A < B).....	163
Figure 57: Dépendance entre optimisation multicritère et aide à la décision	165
Figure 58: Développement de la proposition méthodologique.....	167
Figure 59: Les expérimentations dans notre modèle proposé.....	168
Figure 60: Analyse de l'existant des risques	169
Figure 61: Identification des dangers.....	172
Figure 62: Identification des risques.....	175
Figure 63: Classement des risques.....	177

Figure 64: Optimisation de la fiabilité humaine	180
Figure 65: Suivi et contrôle des résultats optimaux.....	183
Figure 66: L'usine de traitement de Gaz Hannibal.....	190
Figure 67: Diagramme bloc de L'usine de traitement de Gaz Hannibal	191
Figure 68: Equipe de gestion de l'usine de traitement de Gaz Hannibal	194
Figure 69: Structure du système SHEMS de l'usine de traitement de Gaz Hannibal.....	195
Figure 70: Le système de gestion des opérations(SOG)	196
Figure 71: Les six piliers de la sécurité Sur la base du comportement	198
Figure 72: Situation des Risques Spécifiques dans les sites de traitement de Gaz	199
Figure 73: Situation des Risques Spécifiques dans les bâtiments	200
Figure 74: Courbes de fréquence des événements d'Hannibal	201
Figure 75: Cartographie de localisation des dangers dans les unités de travail.....	204
Figure76 : Structure hiérarchique du problème de classification des risques.....	215
Figure 77: Comparaison par paire des critères	216
Figure 78: Vecteur propre correspondant au critèreC1.....	217
Figure 79: Vecteur propre correspondant au critèreC2.....	217
Figure 80: Vecteur propre correspondant au critèreC3.....	218
Figure 81 : Vecteur propre correspondant au critèreC4.....	219
Figure 82: Performance des risques spécifiques	220
Figure 83: Classement des risques spécifiques	220
Figure 84: La fonction de satisfaction du critère C1: nombre de maintenance.....	225
Figure 85: La fonction de satisfaction du critère C2: Délais d'intervention en cas de rupture de Gaz	227
Figure 86: La fonction de satisfaction du critère C3: Supression de Gaz naturel.....	228
Figure 87: La fonction de satisfaction du critère C4: La température de méthane dans le Gaz naturel	231
Figure 88: La fonction de satisfaction du critère C1: La résistance de transfert dans les tuyaux	237

Figure 89: La fonction de satisfaction du critère C2: les voies de circulation	239
Figure 90: La fonction de satisfaction du critère C3: Pouvoir calorifique de Gaz naturel.....	241
Figure 91: La fonction de satisfaction du critère C4: La vitesse de propagation de flamme dans l'air.....	243
Figure 92: La fonction de satisfaction du critère C1: Le volume des cavités de stockage du Gaz naturel.....	249
Figure 93: La fonction de satisfaction du critère C2: Le diamètre du filtre de cyclone.....	251
Figure 94: La fonction de satisfaction du critère C3: Importance des protecteurs munis de coquille	252
Figure 95: La fonction de satisfaction du critère C4: La pression du détecteur des fuites.....	254
Figure 96: La fonction de satisfaction du critère C1: Densité de la population près des stocks de Gaz combustible.....	260
Figure 97: La fonction de satisfaction du critère C2: Etanchéité de la canalisation du Gaz naturel	262
Figure 98: La fonction de satisfaction du critère C3: Valeur limite d'exposition des travailleurs aux Gaz combustible	263
Figure 99: La fonction de satisfaction du critère C4: Le diamètre du GAZUDOC	266
Figure 100: La fonction de satisfaction du critère C1: La nature du procédé utilisé	272
Figure 101: La fonction de satisfaction du critère C2: Quantité de soufre dans le Gaz acide	274
Figure 102: La fonction de satisfaction du critère C3: Le nombre de formation.....	275
Figure 103: La fonction de satisfaction du critère C4: Tension des raccords isolants.....	277
Figure 104: Processus d'exécution du programme de suivi des risques..	281

Liste des Tableaux

Tableau 1: Grille d'analyse pour l'analyse préliminaire des risques	79
Tableau 2: Grille d'évaluation de la criticité	80
Tableau 3: Les différentes problématiques de décision	101
Tableau 4: Matrice de décision.....	114
Tableau 5: Matrice des fonctions de valeur partielle.....	114
Tableau 6: Échelle de Saaty de la méthode AHP.....	118
Tableau 7: Indice de cohérence moyen.....	119
Tableau 8: Tableau comparatif des méthodes PROMETHEE	125
Tableau 9: Catégorie de jugement	131
Tableau 10: Matrice des jugements du décideur par rapport au critère qualité	131
Tableau 11: Caractérisation des inputs	134
Tableau 12: Caractérisation des outputs.....	135
Tableau 13: Classification des méthodes d'aide à la décision multicritère selon la matrice inputs/outputs	136
Tableau 14: Classification des méthodes d'optimisation mathématique selon la matrice inputs/outputs	150
Tableau 15: Les avantages et inconvénients des méthodes d'aide à la décision multicritère.....	153
Tableau 16: Les avantages et les inconvénients des méthodes d'optimisation mathématiques multicritères	154
Tableau 17: Tableau comparatif des méthodes d'optimisation mathématiques multicritères et des méthodes d'aides à la décision multicritères.....	154
Tableau 18: Les substances utilisées et conservées.....	193
Tableau 19: Exercices d'intervention d'urgence.....	197
Tableau 20: Classement des risques spécifiques (RS).....	203
Tableau 21: AMDEC des risques spécifiques	210
Tableau 22: Relation Danger / Risques spécifiques	213
Tableau 23: Causes / Risques spécifiques.....	214
Tableau 24: Jugement des ratios de cohérences.....	219
Tableau 25: Limite admissible des variables du Risque Explosion.....	224

Tableau 26: Solution optimale pour la minimisation du risque explosion du gaz.....	233
Tableau27: Limite admissible des variables du Risque Incendie	237
Tableau28: Solution optimale pour la minimisation du risque incendie dans l’usine de traitement de gaz	245
Tableau29: Limite admissible des variables responsables du Risque Fatigue Respiratoire	248
Tableau 30: Solution optimale pour la minimisation du risque fatigue respiratoire	256
Tableau 31: Limite admissible des variables du Risque Atteinte Cellulaire Irréversible	259
Tableau 32: Solution optimale pour la minimisation du risque Atteinte cellulaire irréversible	268
Tableau 33: Limite admissible des variables du Risque Arrêt cardiaque	272
Tableau 34: Solution optimale pour la minimisation du risque Arrêt cardiaque.....	279
Tableau 35: Tableau de contrôle et suivi des solutions optimaux de la fiabilité humaine	282
Tableau 36: Tableau de contrôle et suivi des solutions non optimaux de la fiabilité humaine	283

Liste des photos

Photo1: Champs aérien de L'usine de traitement de Gaz Hannibal 189

Introduction générale

De nos jours, l'entreprise est devenue un monde complexe où se côtoient une multitude de processus plus ou moins formalisés et un ensemble de règles de fonctionnement tacites ou écrites. Selon cette nouvelle organisation, la panne d'un équipement, l'indisponibilité d'une source d'énergie, l'arrêt d'un système automatique, les accidents sont de moins en moins tolérables et acceptés par le citoyen comme par les entreprises. Pour ce faire la **Fiabilité** est maintenant une science qu'aucun concepteur de produit ou d'installation ne peut ignorer **[FADIER E. et al 2007]**.

La notion de la fiabilité va au-delà de la simple fabrication des produits fiables et de leurs supports, la fiabilité implique également d'être un partenaire commercial de confiance, d'entretenir un dialogue avec les clients et les partenaires. Elle est considérée comme étant la science des défaillances basée sur l'expérience, elle est indissociable de la qualité, la meilleure connaissance de la fiabilité provient de l'analyse des défaillances lorsque les produits sont en service.

Cependant, l'adoption de la fiabilité limitée sur l'analyse systémique pour la prévision des risques souffre du manque de prise en compte de la variabilité des situations de travail. Cette variabilité se manifeste par la présence de l'opérateur humain comme le postulat de base de l'apparition des événements et des grandes catastrophes des défaillances.

La fiabilité humaine a d'abord été tout naturellement définie en prolongement de la fiabilité technique. La chasse à l'erreur humaine qui en a découlé, comprise comme une défaillance coupable des opérateurs, n'a pas donné les résultats escomptés. En plus, elle considérait l'homme de manière isolée, sans prendre en compte les aspects collectifs du travail.

Depuis quelques années l'Homme, longtemps écarté des modèles de description à l'époque où l'on pensait que l'automatisation allait le réduire à l'exécution des tâches intellectuelles, fait un retour remarqué au cœur même des problématiques industrielles. Ses capacités cognitives

incomparables en font un des vecteurs indispensables aux nouvelles formes d'organisation du travail qui associent flexibilité et réactivité.

L'homme a été considéré comme une ressource quelconque sans spécificité particulière, mais ces dernières années ont vu émerger le besoin de développer des représentations de l'entité humaine au travail. Dès lors la maîtrise du comportement d'une organisation ne s'inscrit plus uniquement dans sa dimension technique mais aussi dans celle, encore plus complexe de l'homme et du social. Ainsi, le travail collaboratif et les rapports humains viennent se superposer aux compétences strictement métiers nécessaires à l'exécution d'une tâche donnée **[BENNOUR M. 2004]**.

Ainsi, l'analyse de la fiabilité est plus que jamais un enjeu stratégique pour la réduction des risques au sein des organisations. Ces risques majeurs couvrent bien sûr les accidents à caractère technologique, mais plus généralement tout événement susceptible d'engager la pérennité d'une entreprise

L'un des enjeux majeurs de l'entreprise aujourd'hui, relève de la mise en place d'un système de prévention et gestion des risques adapté pour faire face à un arsenal croissant d'exigences réglementaires et de recommandations normatives. Il s'agit par conséquent, de mettre en place une approche globale et systémique des risques permettant de répondre aux exigences des parties intéressées et de la société civile afin d'assurer pérennité et compétitivité à long terme.

De nombreux travaux ont été publiés depuis le début des années 1990, mettant en évidence le degré d'importance du risque au sein de l'organisme ainsi que sa relation avec l'opérateur humain, parmi ces travaux nous citons ceux de : **[JAMBON F. 1992]** propose une méthodologie pour améliorer la fiabilité des systèmes homme-machine par la prise en compte explicite des erreurs et des interruptions dans la pratique de l'Ingénierie de l'Interaction Homme-Machine, et ceci à travers une application d'un modèle qui explicite les activités mentales en relation avec la détection et la correction de singularité dans les systèmes critiques automatisés et notamment dans les systèmes aéronautiques, pour lesquels les erreurs humaines et les interruptions décisive.

[DE LA GARZA C. 1995] présente dans ses travaux de recherches une compréhension de l'émergence des processus accidentels dans le cadre des travaux de maintenance d'infrastructures ferroviaires. Il s'agit d'une analyse ergonomique de deux métiers : l'entretien des voies ferrées et l'entretien des installations de signalisations électriques.

En plus, [FADIER E. et al 1998] proposent une démarche méthodologique «M.A.F.E.R.G.O : Méthode d'Analyse de la Fiabilité et Ergonomie Opérationnelle » permettant l'analyse d'un système industriel utilisant la double approche fiabiliste et ergonomique.

[DIDELOT A. 2001] propose dans ses travaux de recherches d'identifier, d'analyser et de caractériser des activités palliatives mises en place par les opérateurs pour faire face aux divers aléas. Cette analyse a permis de déterminer et de décrire les causes initiatrices de ces activités, décelées comme des Conditions Limites Tolérées par l'Usage (CLUs).

Aussi, [FUMEY M. 2001] présente dans une démarche de modélisation des risques agrégés et une méthodologie de gestion du risque global permettant une gestion intégrée des risques opérationnels et des risques stratégiques.

[POLET P. 2002] contribue par ces travaux de recherches qui s'intègrent dans un projet GIPC (Groupe d'Intégration de la Prévention dès la Conception) du programme PROSPER (Programme Système de Production -CNRS) à l'analyse des risques dans les systèmes Homme-machine en considérant conjointement les facteurs techniques et humains, et ceci afin d'intégrer dans les analyses de risques les comportements volontairement déviés des opérateurs par les Conditions Limites Tolérées par l'Usage.

De son côté, [GUIOCHET J. 2003] propose dans ces travaux de recherches une démarche aux concepteurs pour appréhender la sécurité des systèmes, en intégrant le concept de risque et en se plaçant à un niveau système et ceci sur la base de la notation UML (*Unifie Modeling Language*) pour la description du système ; Cette démarche est ensuite appliquée sur le cas concret du développement d'un robot télé-échographe actionné par des muscles artificiels de McKibben.

[BENNOUR M. 2004] ajoute dans ces travaux de recherches une méthodologie d'estimation de performance mettant en évidence le lien avéré entre l'entité humaine, caractérisé par ses compétences, et la performance des activités. Elle sous entend une démarche d'affectation des ressources humaines évaluée en cherchant à déterminer qu'elles étaient les assignations envisageables garantissant, la satisfaction d'un ou de plusieurs objectifs de performance d'un processus. Ainsi, le problème d'affectation traité et caractérisé par une forte explosion combinatoire et afin de pallier cette difficulté, la méthodologie d'affectation s'est basée sur un algorithme heuristique dichotomique.

[LASSAGNE M. 2004] propose dans ces travaux de recherches une méthodologie pour resituer la gestion des risques dans une perspective globale, sur la base des études qualitatives dans le cas de la régulation du risque dans l'industrie maritime, et compte tenu de la sensibilité du terrain, l'étude proposée est basée sur une méthode projective de scénario, et les résultats d'une telle perspective montre l'importance du risque dans le secteur maritime et analyse les enjeux managériaux du mouvement actuel d'évaluation vers un régime réglementaire qui introduit une réelle prise en compte du risque par le biais de la performance.

Dans le même contexte, [FADIER E. et al 2005] proposent aussi dans leurs recherches un cadre explicatif permettant de mettre à jour les phénomènes organisationnels qui peuvent entraîner une baisse du niveau de sécurité d'un système. La mise en évidence d'interactions entre des modèles de sécurité et d'organisation fournira une vision globale rendant possible l'appréhension de tels phénomènes.

Suite à cette revue de la littérature citée ci-dessus, une conclusion mérite d'être signalée, c'est que tous les travaux de recherches se sont limités à la résolution du problème d'analyse de la fiabilité, et plus particulièrement à déterminer le rôle de l'opérateur dans le degré d'apparence du risque ainsi que de son degré de gravité, sans pour autant chercher des solutions pour minimiser ce risque afin d'optimiser la fiabilité.

Il nous a donc semblé utile et intéressant d'engager un travail de recherche autour de cette thématique d'optimisation de la fiabilité sur la base d'une minimisation des risques, dans un contexte tunisien, afin de répondre à une interrogation principale qui fait l'objet de notre problématique à savoir :

Comment optimiser la fiabilité par une approche multicritère d'aide à de décision?

Notre travail de recherche est subdivisé en cinq chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons la problématique de la fiabilité, à travers une définition des principaux termes et vocabulaire relatifs à la fiabilité. Après avoir défini la notion de fiabilité, son discours d'émergence dans le monde industriel, ainsi qu'une typologie des différents types de la fiabilité ; le travail est spécifié pour donner une idée complète sur la fiabilité humaine et le comportement de l'opérateur humain dans la réalisation des différentes tâches ; la dernière partie de ce chapitre est consacrée à l'identification des approches et méthodes d'analyse de la fiabilité humaine.

Le second chapitre, permet l'identification de la notion de risque, nous présentons une définition du vocabulaire et du champ connexe d'apparition du risque, après nous montrons une typologie des différents types de risques, ainsi qu'une méthodologie complète d'analyse du risque commençant par l'identification des risques jusqu'à leurs suivis et leurs capitalisations. La dernière partie de ce chapitre est employée pour la présentation de différentes méthodes de sûreté de fonctionnement qui sont dédiées à l'analyse et l'évaluation de la notion de risque.

Dans le troisième chapitre, nous présentons une réflexion sur la méthodologie d'aide à la décision en précisant les différentes méthodes et approches appliquées pour l'analyse d'aide à la décision ; la partie suivante de ce chapitre sera consacrée à présenter un panorama des approches d'agrégations multicritères que nous classons en trois catégories : les méthodes élémentaires, les méthodes d'optimisation mathématique et les méthodes d'aide à la décision multicritère. Pour chaque méthode, nous présentons les fondements théoriques, les avantages et les limites.

Dans le quatrième chapitre, nous proposons notre modèle de recherche d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine, ce modèle se divise en six grandes parties : analyse de l'existant, identification des dangers, identification des risques, classement des risques, optimisation multicritère de la fiabilité humaine et suivi et contrôle des résultats ; par application de l'approche multicritère d'aide à la décision. Ainsi, l'apport de notre travail de recherche s'établit à chaque niveau de ces étapes d'analyse des risques. Ainsi, l'application de l'approche multicritère d'aide de décision est répartie en deux étapes ; la première étape consiste à faire un classement des risques sur la base des outils multicritères de surclassement, et la deuxième étape permet d'appliquer une formulation d'une programmation mathématiques multicritères pour la minimisation des risques en tenant compte des contraintes internes/ externes par application du modèle du Goal Programming avec les fonctions de satisfactions.

Le cinquième chapitre est consacré à l'expérimentation de notre modèle de recherche « optimisation multicritère de la fiabilité humaine », dans une entreprise de traitement de Gaz naturel, afin de bien identifier le degré d'importance de notre modèle à l'échelle pratique.

Chapitre 1:

PROBLEMATIQUE DE LA FIABILITE

Sommaire

INTRODUCTION	9
1. Evolution du concept fiabilité	9
1.1. Définition du concept fiabilité	10
1.2. Historique de la fiabilité.....	11
1.3. Les approches de la fiabilité.....	13
1.4. Typologie de la fiabilité	15
2. Fiabilité humaine	16
2.1. Définition de la fiabilité humaine	16
2.2. Fiabilité humaine et champs connexe	18
2.2.1 Fiabilité humaine et ergonomie	18
2.2.2 Fiabilité humaine et sécurité.....	19
2.2.3 Fiabilité humaine et qualité.....	20
2.3. Le comportement de l'opérateur humain	21
3. Démarche d'analyse de la fiabilité humaine	22
3.1. La tâche, travail prescrit : définition du concept	23
3.2. Classification des tâches.....	24
3.3. Tâche effective et tâche prescrite	26
4. L'erreur humaine	28

4.1. Définition de l'erreur humaine.....	29
4.2. Nature de l'erreur humaine.....	29
4.2.1 Modèle de Rasmussen	29
4.2.2 Approche de Reason	31
4.2.3 Classification des erreurs de Swain et Guttmann.....	33
4.2.4 Classification des erreurs	33
4.2. Manager l'erreur humaine.....	34
5. Méthode d'analyse de l'erreur humaine.....	35
5.1. La décomposition de la tâche «THERP»	36
5.2. La prise en compte du modèle de Rasmussen «SHERPA»	37
5.3. La prise en compte des facteurs de performance «SLIM»	38
5.4. La prise en compte de l'analyse rétrospective «CREAM»	40
5.5. La prise en compte de l'approche de Reason «ATHEANA».....	42
5.6. Méthode d'analyse préliminaire des conséquences de l'infiabilité humaine «APPRECIH»	44
5.7. Méthode d'analyse de la fiabilité et ergonomie opérationnelle «MAFERGO».....	46
5.8. Méthode d'analyse et de développement des performances de la fiabilité humaine, organisationnelle et technique d'un système socio-technique «FHORTE©»	48
CONCLUSION	50

INTRODUCTION

Dans de nombreux systèmes industriels complexes, l'analyse et la modélisation des dysfonctionnements forment une étape indispensable venant en amont des projets de conceptions des systèmes de supervisions. Elle constitue potentiellement une source précieuse pour s'orienter vers la déduction des besoins informationnels des utilisateurs [MOUSSA F. et al 2006].

Toutefois, la performance des machines dépend de la fiabilité de l'outillage à utiliser, de l'environnement d'opérateur, de l'efficacité de la maintenance, du processus d'opération, et de l'expertise technique. Par suite, plus les équipements sont compliqués, plus les implications de la panne des équipements deviennent toujours plus critiques. L'analyse de la fiabilité est requise pour identifier les goulots et trouver les composantes. Donc c'est important de choisir une méthode convenable pour le recueil de donnée de la fiabilité de même que pour son analyse [BARABADY J. et al 2008].

Ce chapitre a pour objectif de présenter la problématique de la fiabilité. Dans une première partie, nous décrivons les concepts de base liés à la notion de la fiabilité. La seconde partie permet d'identifier la fiabilité humaine comme l'une des composantes de la fiabilité, et ceci à travers la présentation des différentes tâches prescrites par l'opérateur, et les erreurs qui peuvent parvenir. La dernière partie de ce chapitre est consacrée à présenter les différentes méthodes et approches d'analyse de la fiabilité humaine.

1. Evolution du concept fiabilité

Dans les systèmes complexes, assurer la fiabilité est un des apports majeurs. Ainsi, la fiabilité sociotechnique tend vers des évolutions diverses pendant les dernières décennies, se focalisant sur les composantes techniques, évoluant alors de quantitatives vers des approches qualitatives, et plus tard d'une vision négative à une vision positive du rôle des agents humains, et enfin de l'individu à la galerie organisationnelle de l'analyse.

1.1 Définition du concept fiabilité

La fiabilité d'un composant exprime la probabilité qu'il fonctionne correctement (sans défaillance) pendant un temps déterminé dans des conditions (que l'on appellera conditions de bases) fixées de manière précise. Ce qui signifie que l'on doit définir sans ambiguïté :

- ce qu'est un fonctionnement correct ;
- la variable temps adoptée, c'est-à-dire l'unité d'usage la plus significative (heure, kilomètre, nombre de cycles...) [BUFFERNE J. 2009].

Dans la même orientation, [GUILLAUMART L. et al 2006] considèrent que : « La fiabilité est la probabilité d'un réseau accomplissant ses objectifs pour une période donnée du temps sous des conditions opératoires».

La commission électronique internationale [CEI. 1988] définit la fiabilité comme étant : « la probabilité pour qu'une entité puisse accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donnée $[t_1, t_2]$; que l'on écrit : $R(t_1, t_2)$ ».

Plusieurs notions sont fondamentales dans cette définition tel que :

- Fonction : la fiabilité est caractéristique de la fonction attribuée au système, la connaissance de son architecture matérielle est souvent insuffisante et il faut utiliser des méthodes d'analyse fonctionnelle ;
- Conditions : le rôle de l'environnement est primordial en fiabilité, il faut aussi connaître les conditions d'utilisation, la connaissance du matériel n'est pas suffisante ;
- Intervalle : on s'intéresse à une durée et pas à un instant, par hypothèse le système fonctionne à l'instant initial, le problème est de savoir combien de temps. En général $t_1 = 0$ et on note $R(t)$ la fiabilité.

A partir de ces définitions, on peut conclure que tout système industriel nécessite ou nécessitera un recours plus au moins grand aux concepts liés à la fiabilité et ceci depuis le stade de l'avant projet jusqu'à la réalisation et l'exploitation du système. En plus, on comprend que la fiabilité devient une science et une dimension fondamentale qu'aucun concepteur ne peut l'ignorer, elle contient intrinsèquement un aspect probabiliste, et de nombreux modèles statistiques pour évaluer le taux de défaillance d'un matériel.

1.2 Historique de la fiabilité

Les techniques de sûretés de fonctionnements (fiabilité, disponibilité, maintenabilité, sécurité...) se sont développées tardivement par rapport aux techniques de diverses disciplines de l'art de l'ingénieur. La notion de la fiabilité est ainsi liée à la création assez récente d'un corps de concepts et de méthodes, l'histoire de ces concepts et de leurs introductions dans le domaine industriel s'avère difficile à reconstituer compte tenu de leur inégal développement suivant les branches [IEEE. 1984].

Dans ce qui suit, un historique des faits marquants du concept fiabilité, compte tenu des évolutions industrielles :

- **Au début de l'ère industrielle (1930)** : l'étude des problèmes de la fiabilité remonte au début de l'ère industrielle, et elle s'est limitée aux systèmes mécaniques et électroniques. Avec le développement du transport aérien, on a vu apparaître un autre aspect de la fiabilité tel que le recueil d'informations statistiques sur la fréquence de pannes des divers équipements des avions notamment les moteurs. Dans les années 1930, ces relevés statistiques sont étendus aux accidents des avions, c'est ainsi que les premiers concepts probabilistes pour les niveaux de sécurité et de fiabilité des avions deviennent une réalité. [BAZOVSKY I. 1961]. D'une manière générale, avant les années 1940, les aspects qualitatifs des techniques de la fiabilité et de la sécurité étaient pris en compte de manière fort intuitive, et se limitaient à l'expérience acquise par les concepteurs, l'intérêt accordé à ces problèmes résulte d'un long apprentissage dans la société industrielle. [LAGADEC P. 1966]

-**Les années (1940)** : en réalité ce n'est qu'à partir de la deuxième guerre mondiale que commencent à être forgés les outils de l'ingénieur avec la volonté de laisser le moins de place possible au hasard.

Les premiers modèles de la fiabilité prévisionnelle apparaissent en Allemagne où se développaient les projets de missile V₁, et à partir de ces modèles on s'aperçut que la fiabilité des éléments devrait être beaucoup plus élevée que la fiabilité du système, il semble que V₁ fut le premier système industriel pour lequel on déterminera délibérément et avec succès, un niveau de fiabilité grâce à des exigences de fiabilité vérifiées expérimentalement sur les composants [HVILAND R P. 1961].

Parallèlement, les études de fiabilité sur les missiles se poursuivent aux Etats-Unis, pour améliorer la fiabilité selon deux nécessités telles qu'une meilleure conception de matériels

plus résistants et plus adaptés, et des contrôles pour améliorer la vie utile d'un composant ou d'un système [VILLEMENT A. 1988].

-Les années (1950) : la complexité grandissante des systèmes électroniques-surtout à usage militaire-génère des taux de défaillances qui entraînaient une disponibilité des matériels grandement réduite et une augmentation des coûts. Commence ainsi à se faire jour l'idée qu'il est plus raisonnable de concevoir des équipements fiables plutôt que d'attendre les défaillances, et ensuite réparer. Pendant ce temps, devant la révolution électronique et la miniaturisation des circuits, une grande importance fut accordée à la qualité des équipements destinés à produire les composants électroniques, il fut défini des techniques conduisant à des composants de très haute fiabilité [VILLEMENT A. 1988].

C'est aussi, dans le début des années 1950 que des efforts furent entrepris pour comprendre les erreurs humaines qui contribuaient aux défaillances des systèmes ; les premières estimations quantitatives des performances humaines furent effectuées dans le domaine des armes nucléaires [VILLEMENT A. 1988].

-Les années (1960) : ces années connurent l'émergence de nouvelles techniques de fiabilité, et une variété plus large d'applications. C'est le début des analyses détaillées relatives aux défaillances de composants et à leurs effets sur le fonctionnement du système ou sur la sécurité des biens et des personnes [VILLEMENT A. 1988].

Les analyses prévisionnelles de défaillances ont une importance croissante notamment dans le domaine des armes nucléaires, elles deviennent de plus en plus complexes et utilisent la méthode du diagramme de succès, ainsi que la création de la méthode Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets (AMDE). Face aux difficultés croissantes rencontrées dans l'utilisation de ces méthodes dans l'analyse des systèmes complexes, d'autres approches se sont développées tel que la méthode des combinaisons de pannes [VILLEMENT A. 1988].

En 1961, le concept d'Arbre des Causes est introduit par Wastson des « Bell Telephone Laboratoire » comme une méthode permettant d'évaluer la sécurité du système de contrôle du lancement du missile [HENLEY J. et al 1981].

D'une manière générale, à la fin des années 1960, l'utilisation intensive de ces méthodes pour l'évaluation de la sécurité, reste limitée à quelques industries de pointe, mais peu à peu la préoccupation de la fiabilité touche le domaine civil et les produits de grande consommation.

-**Les années (1970) et la première moitié des années (1980)** : l'industrie nucléaire va contribuer à innover dans les méthodes de prévision des risques industriels. La première évaluation complète du risque lié à une installation industrielle est relative aux centrales nucléaires, et fut publiée en 1975 un effort d'une cinquantaine d'ingénieurs consacré à cette étude dirigée par le professeur Rasmussen [**REACTOR SAFETY. 1975**]; Le risque était ainsi, caractérisé par la probabilité annuelle de décès de personnes des populations environnantes à la suite d'un accident conduisant à une dispersion de produit radioactif. Cette première étude de risque avait pour but d'apprécier les risques industriels qui faisait courir une telle industrie aux populations et ainsi de rassurer les mouvements.

En plus, au début des années 1970, se sont effectués des travaux sur la fiabilité des logiciels qui donnent ensuite lieu à de nombreux développements.

1.3 Les approches de la fiabilité

Les données de la fiabilité sont obtenues par des essais sur des composants des systèmes dans des conditions données (événements discernables et quantifiables). Elles sont donc «microscopiques » et sont essentielles pour les méthodes prédictives, largement utilisées.

On distingue deux approches :

- **L'approche qualitative** est la récente et elle concerne la description de l'architecture du système du point de vue matériel et fonctionnel (utilisation des systèmes experts). L'aspect matériel se caractérise par le recensement des composants et la description de leurs connexions alors que, pour l'aspect fonctionnel, il s'agit de modélisation de la logique du système, de ses conditions d'utilisations et du comportement de ses composants à l'aide de variables d'états [**ROGNIN L. 2000**]. Cette approche qualitative est composée de deux directions, l'une proposant une catégorisation des erreurs, l'autre suggérant le support pour leurs préventions. La première direction, descriptive et analytique, ne vise pas la réduction des erreurs, elle vise plutôt à promouvoir les outils permettant l'analyse des erreurs [**EHSANI A. et al 2008**].

Alors que la deuxième direction, est basée sur les modèles mentaux des agents, elle ne permet pas seulement de décrire les erreurs mais aussi de prédire leurs occurrences, et identifier leurs conséquences.

Divers modèles de classifications et des méthodes sont proposés [NORMAN D. et al 1983] pour cette approche qualitative [ROUSSE SH. et al 1983], [LEPLAT J. 1985], [RASMUSSEN J. et al 1987], [REASON J. 1987], [REASON J. 1990]. Ces méthodes permettent de décrire les problèmes et leurs solutions en identifiant les phases dans l'information traitant.

- **L'approche quantitative** est basée sur des données techniques, humaines et économiques. Les données économiques sont importantes pour l'évaluation des coûts de remise en fonctionnement des composants (maintenance curative) et des coûts de prévention des défaillances de ceux-ci (maintenance préventive). Cela met en jeu les coûts en personnels, matériels et de production. Les données sur les facteurs humains sont obtenues de plusieurs manières : retour d'expérience, simulateurs, jugements d'experts, expériences en laboratoire utilisées pour HCR (Human Cognitive Reliability) et banques de données. Les données techniques sont obtenues soit par réalisation d'essais, soit par l'utilisation des résultats en exploitation (retour d'expérience) ou sur avis d'experts. Une collecte efficace des données de retour d'expérience doit nécessairement inclure deux grands volets :

- une collecte relative aux données de fiabilité des matériels ;
- une collecte de données permettant ultérieurement de caractériser l'efficacité des équipes chargés de la remise en marche des installations après défaillance ou maintenance préventive.

La collecte des données de fiabilité concerne tous les éléments d'information relatifs à l'occurrence des défaillances. Une fiche de collecte des informations qui serait optimale rendrait compte d'un certain nombre d'informations : repère du matériel (fonctionnel ou matériel), mode de fonctionnement du matériel (permanent, stand-by actif ou passif) des repères du matériel (fonctionnel ou matériel) [ZWINGELSTEIN G. 1995].

Les deux approches présentées ci-dessus sont focalisées sur la fiabilité à une seule dimension ; ainsi, l'évolution des réseaux techniques et des composantes humaines ont permis l'apparition d'une approche collective portant sur les dimensions des deux approches en même temps.

1.4 Typologie de la fiabilité

On distingue plusieurs types de fiabilité (termes spécifiques) :

- **la fiabilité opérationnelle** : (observée ou estimée) déduite de l'analyse d'entités identiques dans les mêmes conditions opérationnelles à partir de l'exploitation d'un retour d'expérience. Elle résulte de l'observation et de l'analyse du comportement des composants dans des conditions opérationnelles délimitées par leur environnement.

- **la fiabilité prévisionnelle** : (prédite) correspondant à la fiabilité future d'un système et établie par son analyse, connaissant les fiabilités de ses composants ; elle estime une sûreté future à partir de considérations sur la conception du composant.

C'est la fiabilité calculée sur la base d'un modèle mathématique défini, à partir des données du projet et de la fiabilité estimée ou prédite de ses composants, en tenant compte des conditions d'exploitation prédéterminées.

- **la fiabilité extrapolée** : déduite de la fiabilité opérationnelle par extrapolation ou interpolation pour des conditions ou des durées différentes.

- **la fiabilité intrinsèque** : ou inhérente qui découle directement des paramètres de conception. Sans modification de conception des entités, il n'est pas possible d'obtenir un niveau de fiabilité au plus égal à la fiabilité intrinsèque [ARMP. 2008].

- **la fiabilité humaine** : Aptitude d'un opérateur humain à accomplir une mission requise, dans des conditions données, pendant une durée donnée [ZWINGELSTEIN G. 1995].

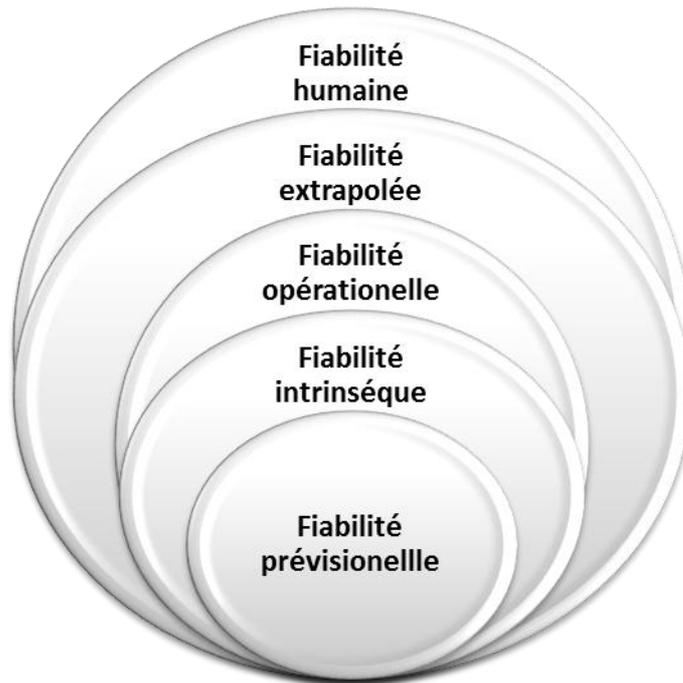


Figure. 1 Interrelation entre les différents types de la fiabilité

2. Fiabilité humaine

L'apport de la performance humaine est de contribuer à la fiabilité et à la sécurité des systèmes complexes est devenue une grande nécessité. Ainsi, les interactions hommes-machines ont été longtemps reconnues comme la contribution la plus importante pour assurer la sécurité des opérations [CEPIN M. 2008].

Prendre en compte les facteurs humains suppose de considérer les individus au travail et d'essayer de comprendre leurs comportements dans l'action. Cela nécessite aussi de s'intéresser à leurs interactions au sein d'une équipe ou d'un groupe de travail de comprendre leurs motivations et leurs réticences dans l'organisation [DURAND T. 2002].

2.1 Définition de la fiabilité humaine

Le facteur humain est un concept dont les limites sont difficiles à définir tant l'objet en est complexe. Plusieurs définitions ont été proposées que :

[VANDERHAEGEN F. 2001] définit la fiabilité humaine comme étant : « une fonction de dégradation aux déviations selon l'état de comportement humain, et l'état du système est fonction à ce comportement ».

[DE TERSSAC G. et al 1990] considèrent que la fiabilité humaine est « l'opportunité des opérateurs à atteindre des buts implicites et explicites à l'intérieur des limites acceptables », ainsi, le point intéressant à mettre en œuvre c'est l'évolution de l'idée de la probabilité de la panne considérée comme une notion importante de succès des opportunités basées sur les conditions environnementales. [SWAIN AD. et al 1983] définit la fiabilité humaine comme étant « la probabilité qu'un opérateur accomplit correctement les tâches requises, dans des conditions données, et n'assume pas les tâches qui peuvent dégrader le contrôle du système ». Le domaine de la fiabilité humaine est trop centré sur le binôme Homme /Système, alors que la dynamique effective de cette fiabilité humaine ne s'observe et ne se comprend qu'au niveau d'une organisation dans sa globalité sociotechnique, comme schématisé si dessous :

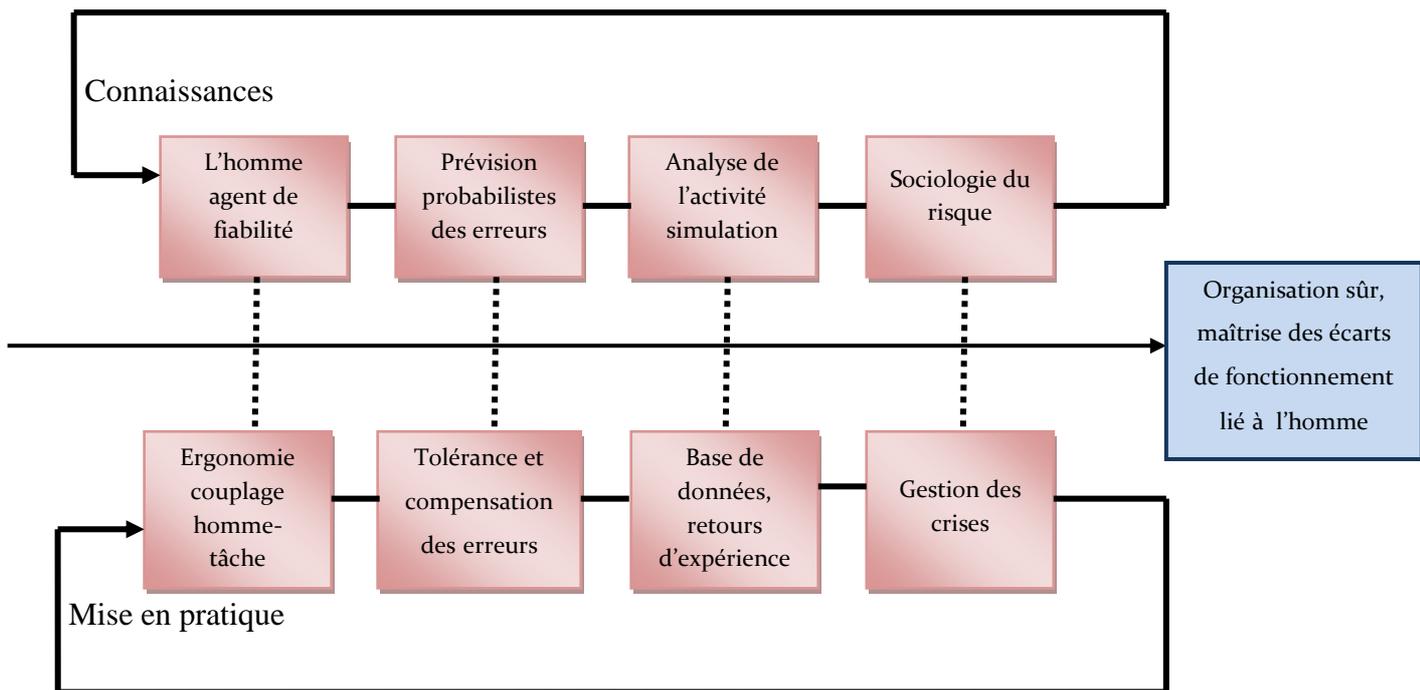


Figure. 2 Pratiques de la fiabilité humaine [FADIER E. et al 1994]

2.2 Fiabilité humaine et champs connexes

La plupart des approches méthodologiques de la fiabilité humaine, mettent l'accent sur la nécessité préalable d'une bonne connaissance du système et aussi une bonne interaction entre la fiabilité humaine et les autres disciplines, et ceci pour pouvoir situer les interventions humaines dans le système global. La fiabilité humaine exerce des relations avec les autres disciplines au sein du système, tel que :

2.2.1 Fiabilité humaine et ergonomie

Historiquement la fiabilité humaine et l'ergonomie sont apparues de façon parallèle, encore que l'ergonomie apparaisse comme la première démarche systématique qui permet d'organiser les connaissances sur l'homme [JENNINCS RH. 1974].

Ainsi, dans leurs objectifs l'ergonomie et la fiabilité humaine peuvent être différenciées, l'ergonomie vise à adapter la situation de travail en cherchant l'efficacité, c'est-à-dire le rapport de l'efficacité au coût pour l'opérateur. L'objectif général proposé par l'ergonomie est surtout d'assurer la sécurité, la santé...en situation de travail. Bien que l'objectif d'efficacité ne soit pas absent des préoccupations de l'ergonomie, la fiabilité humaine a pour objectif de diminuer l'occurrence des erreurs ou des dysfonctionnements du système, en mettant l'accent sur l'efficacité du système homme-tâche : ce qu'il s'agit d'obtenir, c'est la conformité aux exigences de la tâche et l'absence d'erreurs [LEPLAT J. et al 1989].

D'une façon générale, la fiabilité humaine et l'ergonomie sont étroitement liées, l'élargissement des missions de l'ergonomie sont liées à l'évolution du contexte social et la focalisation de la fiabilité humaine sur les critères d'erreur répond à l'évolution technologique qui a renforcé l'importance de l'opérateur dans la fiabilité des systèmes complexes. Si les actions d'ergonomie et les interventions de fiabilité humaine visent prioritairement les unes l'efficacité, les autres l'efficacité, les domaines d'intervention différencient peu ces deux approches dans la mesure où toutes les deux interviennent pour que dans la conception des systèmes techniques soit prise en compte la logique de leur utilisation [LEPLAT J. et al 1981].

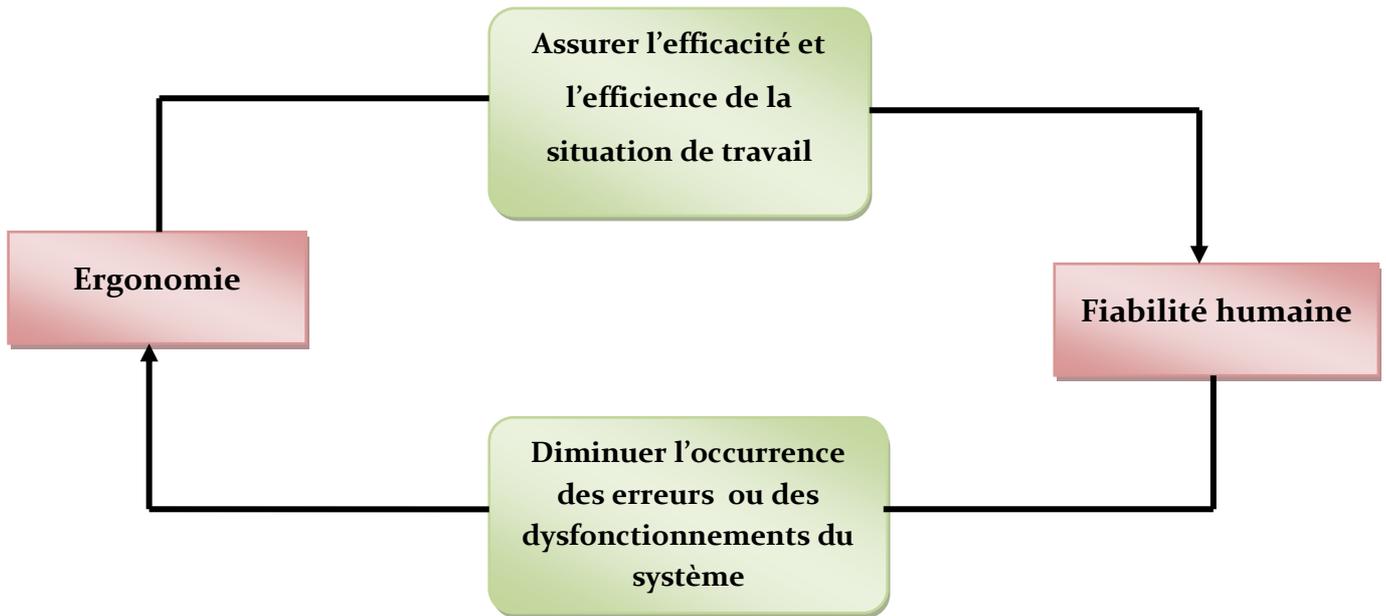


Figure. 3 Champs connexes entre la fiabilité humaine et l'ergonomie

2.2.2 Fiabilité humaine et sécurité

Si dans le domaine de la fiabilité il convient de distinguer la fiabilité de l'opérateur de la fiabilité du système dans son ensemble, en ce qui concerne la sécurité il est presque toujours sous entendu qu'il s'agit de la sécurité des systèmes ; en d'autres termes, tout se passe comme si dans les études de la fiabilité ; on peut envisager le cas d'un opérateur peu fiable par suite des possibilités d'erreurs, de défaillances... alors que dans le domaine des études de sécurité on n'envisage pas le cas d'un opérateur en pleine possession de ses moyens et qui consciemment chercherait à détruire le système ou à en contrecarrer la mission.

Ainsi, la fiabilité humaine intervient de façon déterminante et à plusieurs niveaux pour la sécurité du système globale. En plus, il est possible de dire que la présence à un poste d'une certaine importance d'un opérateur à fiabilité diminuée conduit presque toujours à un système à sécurité dégradée. Par contre, avoir un opérateur ou un système homme-tâche fiable ne suffit pas pour avoir un système global sûr ; cela dépend de la façon dont cette capacité humaine est employée en vue de la réalisation des deux types d'objectifs du système : celui de la fiabilité de fonctionnement et celui de la sécurité [LEPLAT J. et al 1981].

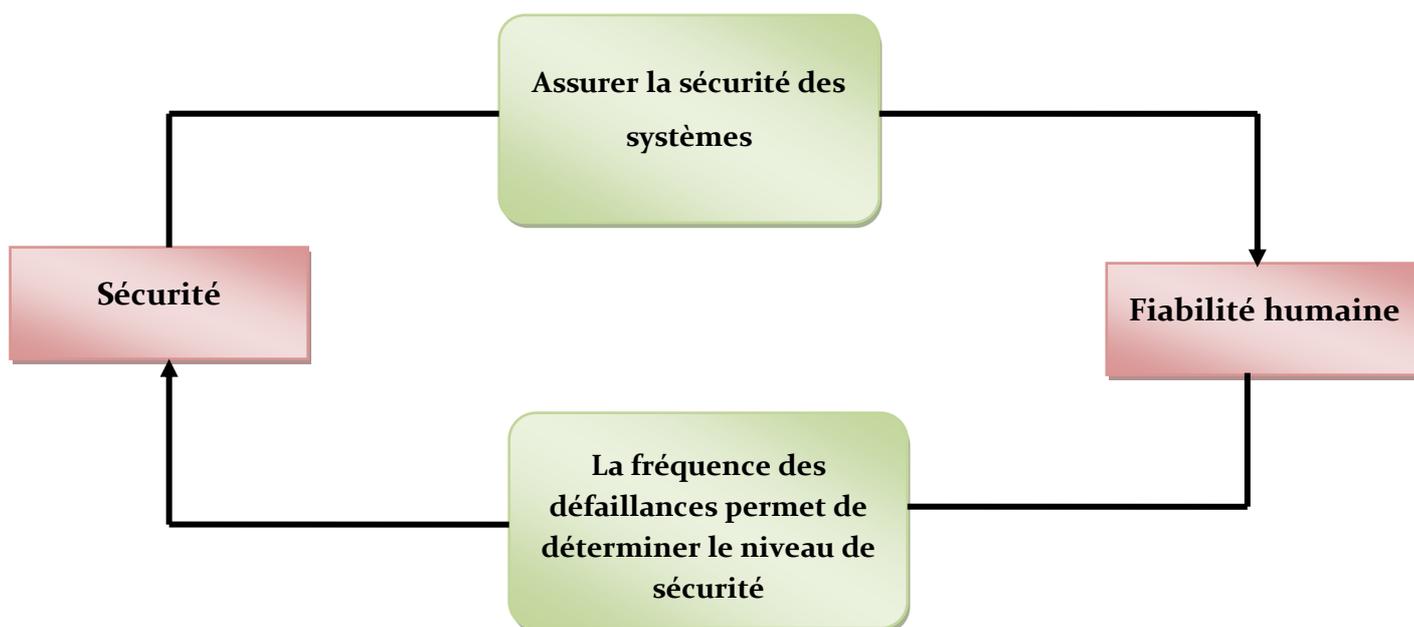


Figure. 4 Champs connexes entre la fiabilité humaine et la sécurité

2.2.3 Fiabilité humaine et Qualité

La qualité est un outil contributeur au résultat, un outil d'aide à la décision, qui renvoie à une procédure un guide d'intelligence à plusieurs ; cette relativité stratégique est une conséquence de la nécessité d'accueillir la multiplicité des formes d'expertises, des points de vue, qui permet l'implication de tous les acteurs concernés, du niveau local au niveau global.

La relation généralement posée entre la qualité et la fiabilité est que la seconde apparaît comme une composante de la première. En effet, si l'on définit largement la qualité d'un produit comme l'aptitude de celui-ci à satisfaire les besoins des utilisateurs, la fiabilité représente l'aspect de cette aptitude, relatif à la minimisation de la fréquence des défaillances. En effet, le management de la qualité ne concerne pas que des objets fabriqués, il intéresse aussi des services assurés essentiellement par des hommes. Dans cette perspective, la fiabilité apparaît encore comme une composante de ce management : la fiabilité du service rendu par un commerçant, un animateur ou un formateur en grande partie, évaluable en terme de qualité perçue de ce service [LEPLAT J. et al 1981].

En conclusion, le rapport entre fiabilité humaine et management de la qualité, dans les industries modernes, est complexe, intégrant plusieurs niveaux d'implication dans l'élaboration d'un produit.

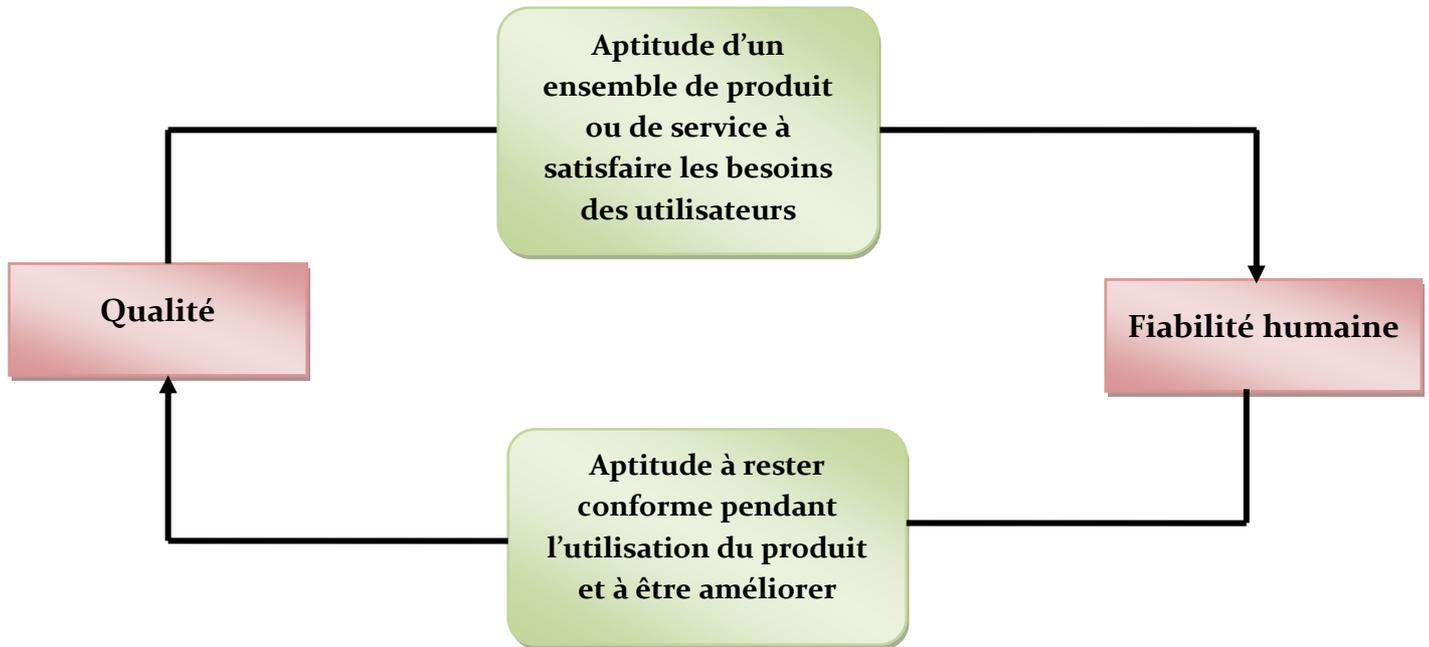


Figure. 5 Champs connexes entre la fiabilité humaine et qualité

2.3 Le comportement de l'opérateur humain

Le comportement de l'opérateur est évidemment fort différent de celui des matériels qu'il a conçu et qu'il exploite, il est notamment caractérisé par l'intelligence et la capacité d'innovation et d'invention [BIENVENU C. 1981]. Quelques caractéristiques apparaissent importantes pour expliciter le mécanisme du comportement humain :

-**la variabilité**: les performances humaines ont une grande variabilité. Elle est liée à la complexité des processus sensoriels, mentaux et physiques mis en jeu pour l'accomplissement de tâche. Elle entraîne l'existence d'un certain pourcentage d'actions « hors tolérance », ce qui est une source d'erreurs humaines. En fait, généralement un certain degré de variation peut être toléré dans une tâche et l'erreur humaine naît lorsque la variation des performances est supérieure à la variation tolérée [VILLEMEUR A. 1988].

- **le besoin d'information et la capacité de prévision** : en général, le cerveau ressent douloureusement l'absence d'informations et cherche à en recueillir par tous ses capteurs. De

ce fait l'opérateur humain génère deux conséquences, la première est positive en ce sens qu'elle permet à l'opérateur de consacrer une partie de son attention à la surveillance d'autres paramètres lorsqu'il a constaté que l'un d'entre eux, après contrôle, était en train d'évoluer favorablement ; la deuxième, est fâcheuse celle-là, consiste à extrapoler audacieusement une situation stationnaire et à croire, par conséquent, qu'il ne se passe rien de plus dans les heures qui suivront... [VILLEMEUR A. 1988].

- la capacité à compenser les variations de difficulté de la tâche par une augmentation de charge de travail sans variation des performances : l'augmentation de la difficulté d'une tâche ne se traduit pas toujours par une diminution des performances de l'opérateur.

Ainsi, l'opérateur augmente les opérations de contrôle en fonction de l'augmentation de la charge de travail, ainsi il existe une valeur maximale dépendant de l'opérateur au-delà de laquelle l'opérateur ne peut plus compenser les augmentations de difficulté, c'est alors qu'apparaît brutalement une dégradation des performances, l'un au moins des paramètres de fonctionnement n'étant plus maintenu à sa valeur nominale [WANNER J C. 1981].

-Le stress : le stress est un ensemble de réactions physiologiques. Il se traduit par une impression de tension et a un impact important sur les performances, dans des cas extrêmes le stress peut aller jusqu'à paralyser l'opérateur [KANTOWITZ B H. et al 1983].

3. Démarche d'analyse de la fiabilité humaine

Parler de facteurs humains, c'est admettre, puis chercher à comprendre, à contrôler, et si possible à réduire la variabilité de l'être humain, pour que ce composant puisse être traité comme un domaine non aléatoire, compatible avec les théories techniques et organisationnelles du monde industriel [AMALBERTI R. 1998].

Les récents événements dans lesquels le facteur humain a été mis en cause sont principalement dus à un manque d'attention à la sûreté, à des lacunes dans la gestion et l'organisation, et à des exigences juridiques ou réglementaires Imprécises [ISBN 92-64-02090-X 2004]. De ce fait, et compte tenu de l'importance accordée au comportement du facteur humain, il est important de recenser les aspects importants susceptibles d'expliquer les erreurs.

3.1 La tâche, travail prescrit : définition du concept

Le comportement humain dépend de façon directe et indirecte des caractéristiques de la tâche qu'exerce chaque individu et de son environnement de travail. [LEONTIEV A. 1976] définit la tâche comme étant : « un but donné dans des conditions déterminées ». Pour [LEPLAT J. et al 1983] « la tâche indique ce qui est à faire, l'activité ce qui se fait. La notion de tâche, véhicule avec elle l'idée de prescription [...]. La notion d'activité renvoie, elle, à ce qui est mis en jeu par le sujet pour exécuter ces prescriptions [...] ».

La tâche comprend les prescriptions et les moyens de réalisations ; autrement dit, la tâche regroupe l'ensemble des prescriptions et des moyens donnés pour les respecter.

Ainsi, on définira une tâche (T) comme un couple de situations :

- une situation initiale (S_0) qui définit les conditions déterminées 0
- et une situation finale désirée (S_f) qui définit le but.

$$T = (S_0, S_f)$$

Une situation est caractérisée par différents attributs tels que son instant d'occurrence et l'état du système. Une situation constitue par conséquent un vecteur. Schématiquement une tâche peut être représentée par deux points dont les coordonnées sont données par S_i et S_{i+1} [POLET P. 2002].

Le [MOIGNE JL. 1990] caractérise un processus dans un repère (Temps, Espace, Forme). Ainsi, il définit un processus comme la modification de la position dans un référentiel (Espace, Forme) d'une collection de produits identifiables par leurs formes. La figure 6 montre les différentes interactions dans un modèle canonique du processus.

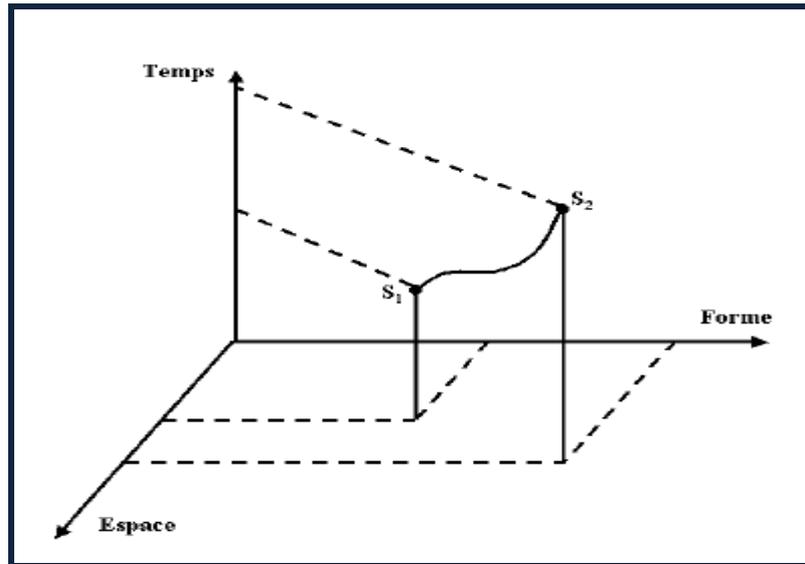


Figure. 6 Le modèle canonique du processus [Le MOIGNE JL. 1990]

3.2 Classification des tâches

Les tâches de l'opérateur de conduite de grands systèmes industriels peuvent être classées de plusieurs façons telles que [EDWARDS E. et al 1973] proposent la classification suivante :

- **Les tâches simples** : correspondent à des actions faisant partie d'opérations séquentielles comportant peu de prise de décision ;
- **Les tâches complexes** : correspondent à des opérations séquentielles assez bien définies mais comportant une prise de décision, une certaine latitude est donnée à l'opérateur ;
- **Les tâches de vigilances** : correspondent à la détection d'un signal, d'une alarme, la probabilité d'erreur est alors affectée par la longueur de l'attente, le niveau de motivation, le type de signal, sa fréquence et le type d'action à effectuer lorsqu'il est reconnu ;
- **Les tâches de contrôles** : correspondent à l'activité de surveillance et de contrôle d'un processus multi variables où des décisions d'agir doivent être prises ; l'opérateur doit empêcher les perturbations d'évoluer en défaillances graves ;
- **Les tâches post-incidentelles ou post- accidentelles** : correspondent à l'activité de l'opérateur après un incident ou accident ; elles peuvent varier considérablement et aller de la réponse apprise et automatique à la recherche d'une stratégie nouvelle. Les probabilités d'erreurs dans ces tâches sont fortement augmentées lorsque l'incident est suffisamment grave

pour que l'opérateur puisse se trouver dans un état de tension élevée [LEPLAT J. et al 1981].

Une autre classification est possible :

-Les tâches prescrites : sont définies par celui qui en commande l'exécution, et formalisées sous une forme documentaire, en d'autre terme elles correspondent à ce qu'on attend du sujet ;

-Les tâches effectives ou exécutées : correspondent à ce que l'opérateur fait effectivement, en d'autre terme, elles correspondent aux résultats atteints par l'opérateur humain. Ces résultats sont le fruit des actions qu'il a réalisé, c'est à dire de son activité [LEPLAT J. et al 1983] ;

-Les tâches actualisées: dans un système instable, l'opérateur est souvent confronté à des modifications de la situation habituelle qui l'obligent à adapter, actualiser ce qu'il projetait d'exécuter. Des modifications de procédures, des modes opératoires, des récupérations d'incidents, des précautions particulières, des changements de critères sont alors le lot de l'opérateur qui tient compte de l'état du système et de la situation pour actualiser la tâche [FADIER E. et al 1994] ;

-Les tâches redéfinies : sont celles que l'opérateur s'approprie, basées sur ses propres représentations, stratégies et critères de réussite. Elles n'entrent pas forcément en contradiction avec les prescriptions ; elles peuvent compléter et adapter les tâches prescrites et peuvent ainsi rendre l'opérateur plus fiable car celui-ci s'est simplifié les données en se les appropriant en fonction de ses compétences personnelles [FADIER E. et al 1994].

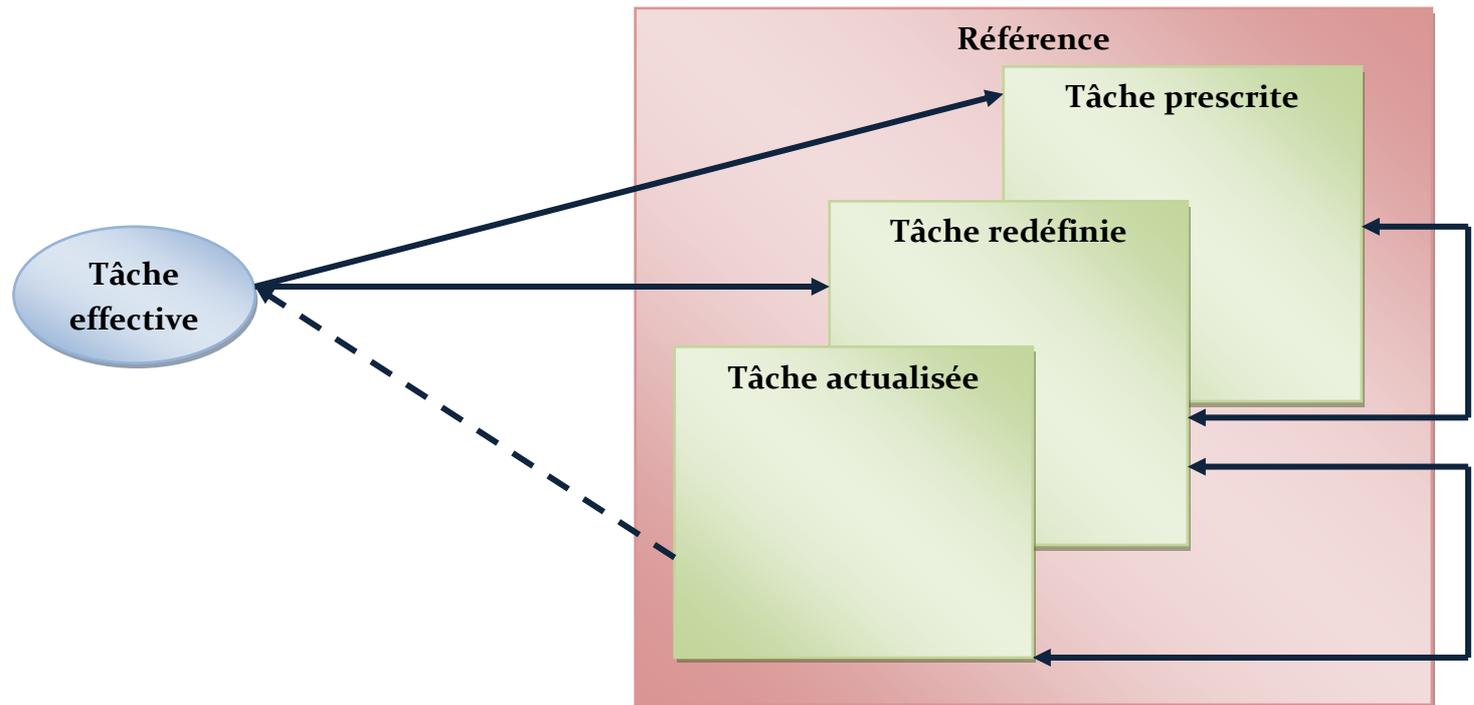


Figure. 7 De la tâche prescrite à la tâche effective [LEPLAT.J et al 1983]

3.3 Tâche effective et tâche prescrite

Différents types d'écarts entre le travail prescrit et le travail effectif sont envisageables :

- des écarts sur la dimension temporelle,
- des écarts sur la dimension spatiale,
- des écarts sur la forme.

Bien évidemment, l'écart entre le travail prescrit et le travail effectif se traduit également en termes d'actions. Dans ce cas, l'activité ne respecte pas les procédures et les consignes prescrites correspondant à la tâche prescrite [POLET P. 2002].

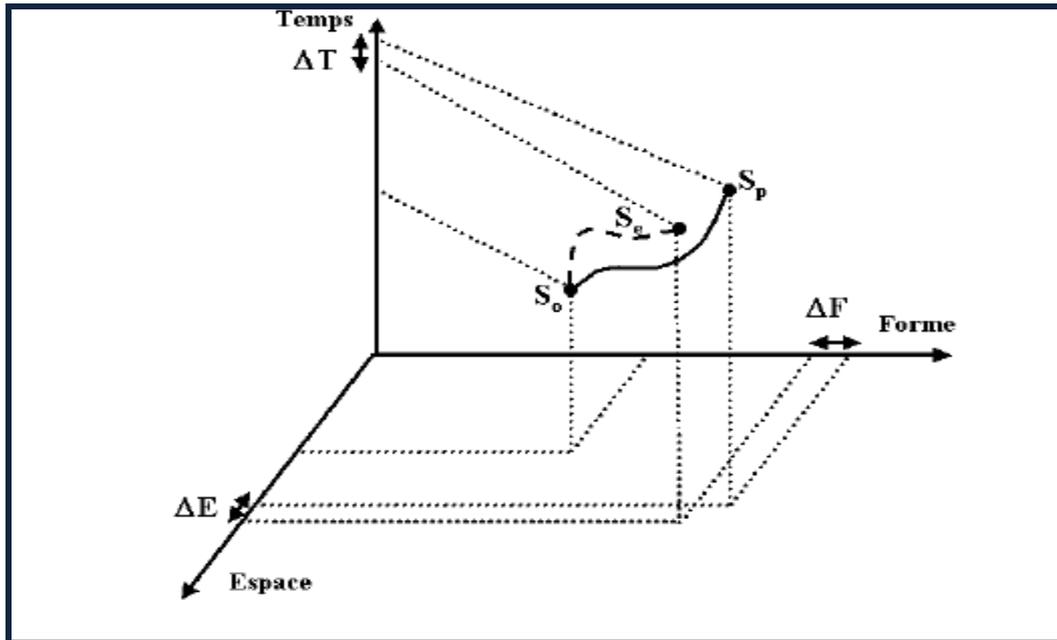


Figure. 8 Écarts entre le travail prescrit et le travail effectif [POLET P. 2002]

L'écart entre la tâche prescrite (T_p) et la tâche effective (T_e) peut se manifester par l'écart entre les deux situations finales.

Soient :

$$T_p \equiv (S_{p,0}, S_{p,f}) \text{ et } T_e \equiv (S_{e,0}, S_{e,f})$$

On a alors :

$$S_{p,f} \neq S_{e,f}$$

Avec :

T_p : La tâche prescrite,

T_e : La tâche effective,

$S_{p,0}$: Situation prescrite initiale,

$S_{p,f}$: Situation prescrite finale,

$S_{e,0}$: Situation d'écart initiale,

$S_{e,f}$: Situation d'écart finale,

Cet écart peut admettre différentes causes :

- Une erreur d'interprétation, due à une incompréhension (objectifs mal définis, vocabulaire différent),
- Des intérêts différents entre le prescripteur et l'opérateur.

Mais une tâche étant décomposable en sous-tâches, l'écart peut également se manifester à ce niveau. Ainsi les objectifs finaux sont identiques mais les objectifs intermédiaires sont différents. Il s'ensuit alors une décomposition différente de la tâche. Le niveau de décomposition de la tâche prescrite peut être insuffisant et l'opérateur affine alors la tâche à des fins opérationnelles. Des écarts entre les sous-tâches prescrites et les sous-tâches effectives sont possibles. Les deux « trajectoires » peuvent correspondre à des chemins différents et on pourra observer des objectifs locaux différents, mais également, un niveau de décomposition différent [POLET P. 2002].

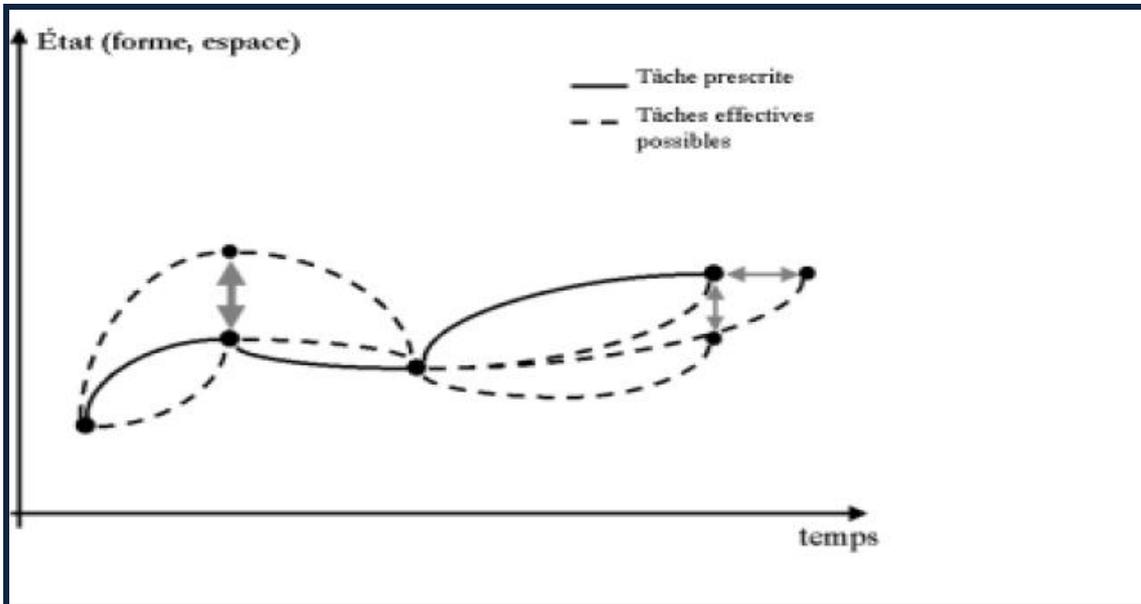


Figure. 9 Formes schématiques d'écart entre le prescrit et l'interprété [HOLLNAGEL E. 1996]

4. L'erreur humaine

L'erreur humaine, souvent qualifiée de « faute », est invoquée régulièrement comme cause principale d'accidents aux conséquences dramatiques dans les systèmes à risques [JAMBON F. 1999].

4.1 Définition de l'erreur humaine

Les erreurs humaines sont souvent dépendantes, une erreur humaine peut entraîner une autre. Intuitivement l'erreur humaine peut être définie comme : « écart entre le comportement de l'opérateur et ce qu'il aurait dû être, cet écart dépassant des limites d'acceptabilité dans des conditions données ». Ainsi, les limites d'acceptabilité peuvent être définies par rapport :

- Aux caractéristiques de l'action prescrite ;
- Aux conséquences de l'erreur humaine notamment sur le système.

Ces limites peuvent exister explicitement ou implicitement et ne devenir explicites qu'après manifestation de l'erreur humaine [VILLEMEUR A. 1988].

L'erreur se définit selon [GRAU JY. et al 1995] comme « le non respect d'une procédure ou la non application des recommandations d'un manuel d'utilisation ». Cette définition a l'avantage d'être précise et de pouvoir s'appuyer sur une documentation de référence. Mais elle se rapproche plus d'une définition juridique que d'une réelle réalité psychologique. »

4.2 Nature de l'erreur humaine

Les modèles explicatifs de l'erreur humaine sont nombreux, dans ce qui suit nous allons proposer quelques modèles les plus connus:

4.2.1 Modèle de Rasmussen

Rasmussen [RASMUSSEN J. 1986] propose un modèle simplifié à trois niveaux de contrôle des actions humaines :

-Le comportement basé sur les habiletés (“skill-based behavior”), est aussi appelé niveau des réflexes. Il représente les actions sensori-motrices effectuées par un opérateur suite à une intention mais qui se déroule sans réel contrôle conscient. C'est le niveau le plus bas, au sens

de la complexité de mise en œuvre cognitive, du comportement humain. C'est aussi un niveau qui peut engendrer des comportements extrêmement rapides et efficaces. Les comportements de ce niveau sont difficiles à apprendre, mais aussi très difficiles à oublier.

Les comportements de ce niveau sont quelquefois basés sur la réponse à un retour d'information simple, comme les tâches de poursuite.

- **Le comportement basé sur les règles (“rule-based behavior”)**, est aussi appelé niveau des procédés. Selon Rasmussen, « L'activité est dirigée par un but, mais elle est structurée par un contrôle proactif, grâce à une règle stockée. Très souvent, le but n'est même pas formulé explicitement, mais on le trouve implicitement dans la situation, et il libère les règles stockées. Le contrôle est théologique, en ce sens que la règle ou le contrôle sont sélectionnés sur la base d'expériences antérieurement réussies. Le contrôle évolue selon le principe de la priorité à la règle la plus adaptée ». Les comportements de ce niveau utilisent des règles pré-stockées instanciées par la situation présente.

Ce type de comportement est conscient, et l'opérateur comme l'environnement fournit les paramètres de la règle. L'opérateur n'a pas besoin d'avoir déjà vécu une situation identique, mais il utilise une règle qui est valable dans une situation analogue. Il peut avoir vécu cette situation, l'avoir apprise, ou encore l'avoir planifiée au niveau le plus haut. Le choix de la règle à appliquer utilise le principe de la priorité à la règle la plus adaptée selon les données sur la situation. La limite entre les niveaux des réflexes et des procédés n'est pas nettement définie, et dépend de l'entraînement de l'opérateur tout comme de son attention. En règle générale, il est possible de faire la distinction selon que l'opérateur peut ou non rapporter sans difficulté l'ensemble des actions qu'il a effectuées.

- **Le comportement basé sur les connaissances (“knowledge-based behavior”)**, est aussi appelé niveau du savoir. Ce niveau de comportement, le plus haut cognitivement, est utilisé lorsqu'aucun réflexe ou aucune règle ne convient à la situation rencontrée par l'opérateur. Ce comportement est utilisé lorsque l'opérateur est confronté à des situations non familières ou bien totalement nouvelles. Pour ces situations, le but est clairement exprimé par l'opérateur en fonction de son analyse de l'environnement et par ses objectifs. Les traitements effectués à ce niveau sont conscients, lents, séquentiels, et fastidieux. Ils s'apparentent à un processus de résolution de problème qui aboutit à la génération d'un plan adapté à la situation. À ce niveau

de raisonnement, la structure du comportement de l'opérateur s'appuie sur un modèle mental de la situation.

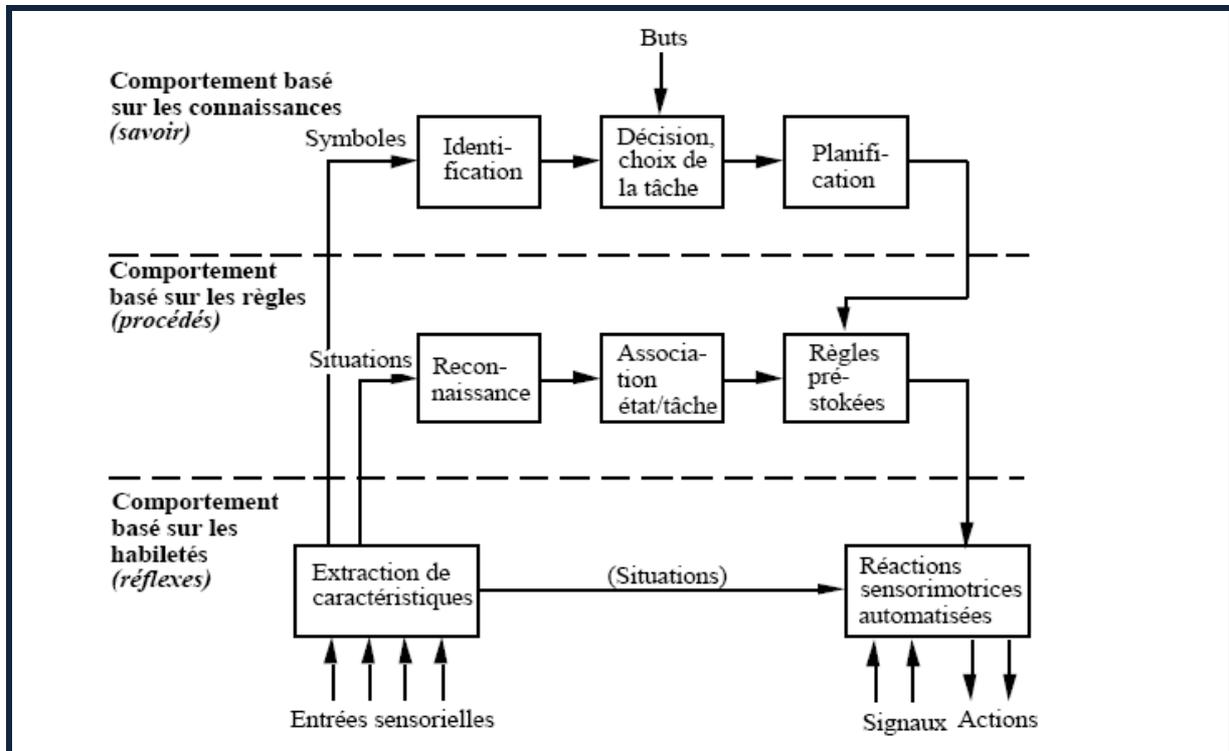


Figure. 10 Modèle décisionnel de Rasmussen [RASMUSSEN J. 1986]

4.2.2 Approche de Reason

Le modèle proposé par Reason [REASON J. 1990] est inspiré par des idées de classification de l'erreur proposée par Rasmussen. Suivant que l'action soit intentionnelle ou non, Reason propose une classification à trois niveaux :

- **Le niveau conceptuel** exploite les hypothèses sur les mécanismes cognitifs impliqués dans la production d'erreur. Ce type de classification est plus basé sur une modélisation théorique de l'erreur que sur des données observables.

- **Le niveau comportemental** est le plus superficiel. Il s'intéresse à la partie observable du comportement erroné. Les classifications de ce niveau peuvent s'intéresser à la caractéristique formelle de l'erreur, comme par exemple le mauvais ordonnancement des actions, mais aussi à ses conséquences, comme les dommages causés.

- **Le niveau contextuel** s'intéresse aux caractéristiques formelles de l'erreur mais aussi à des hypothèses causales. Il représente une sorte d'intermédiaire entre les deux autres niveaux de classification. Il permet en particulier de mettre en évidence l'interaction complexe entre des facteurs déclenchant locaux et les mécanismes d'erreur sous-jacents.

En d'autre terme, deux grandes approches s'opposent dans le modèle de Reason :

- Les ratés et les lapsus, qui résultent d'actions **non intentionnelles**,
- Les fautes et les violations, qui résultent d'**actions intentionnelles**.

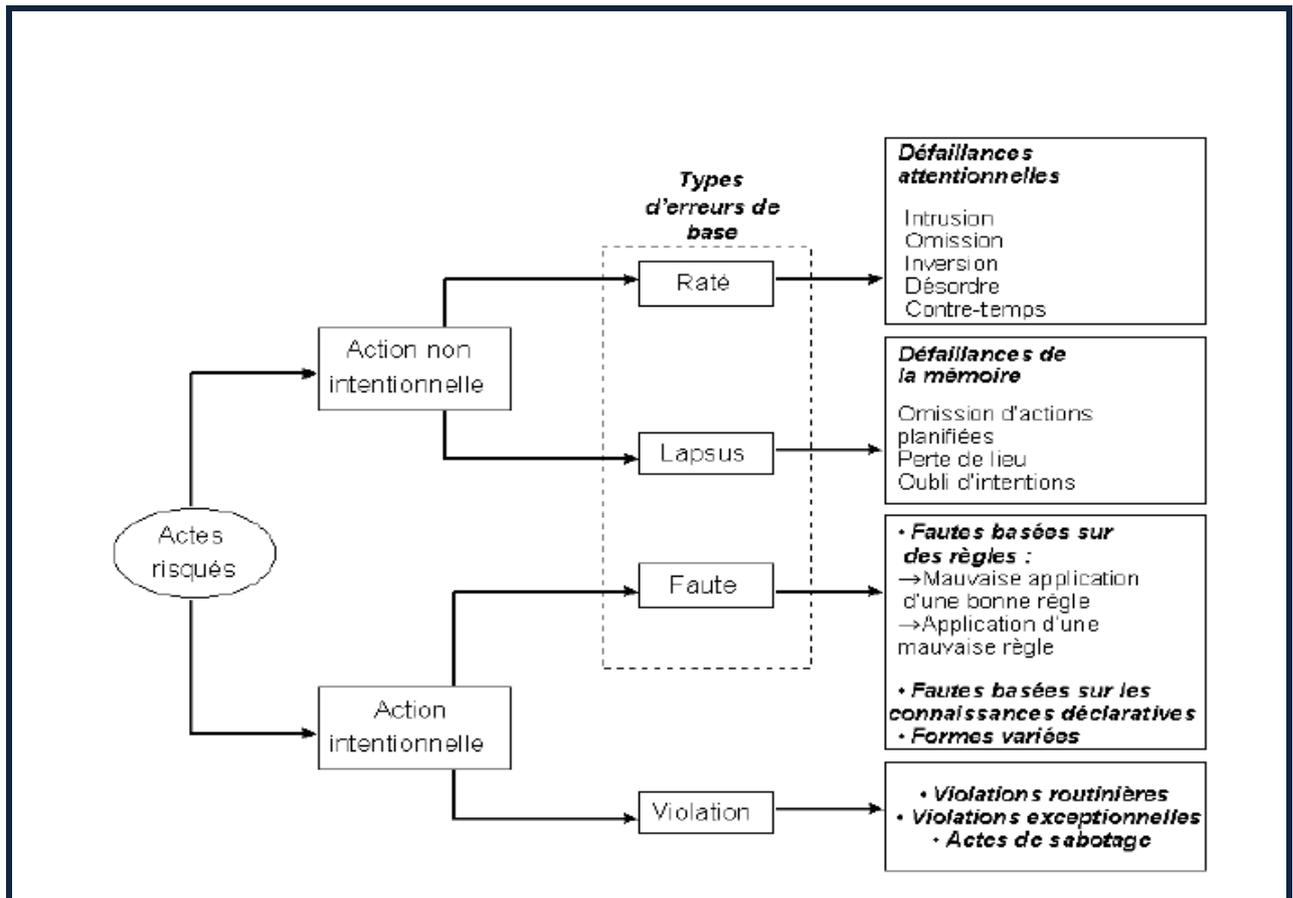


Figure. 11 Classification des erreurs selon Reason [REASON J. 1990]

4.2.3 Classification des erreurs de Swain et Guttman

Swain et Guttman [SWAIN A D. et al 1983] utilisent une classification des erreurs limitée aux actions humaines en sortie uniquement. Ils considèrent l'opérateur comme centre de l'étude, donc les actions en sortie sont les actions qu'effectue l'opérateur sur le système. La classification proposée ne s'intéresse qu'à la partie visible de l'erreur. Elle ne prend pas en compte les mécanismes internes qui l'ont déclenchée. De ce fait, elle ne permet pas de prévoir ni même prévenir efficacement l'occurrence de ces erreurs. Néanmoins, cette vision symptomatique de l'erreur permet aux concepteurs d'envisager systématiquement les procédures de récupération simples, qui s'intéressent principalement aux symptômes de l'erreur et assez peu à leurs causes internes.

4.2.4 Classification des erreurs de Nicolet, Carnino et Wanner

Nicolet, Carnino et Wanner [NICOLET JL. et al 1990] proposent une classification comprenant sept erreurs type :

-**Les erreurs de perception** sont multiples et ont des causes variées. Un opérateur peut ne pas percevoir une information ou un signal car celui-ci peut être fugace, masqué, peu contrasté, ou encore noyé dans un grand nombre de stimuli. Un opérateur peut également ne pas percevoir un signal de façon consciente et l'acquiescer de manière automatique.

-**Les erreurs de décodage** sont dues à une mauvaise interprétation d'un signal correctement reçu.

-**Les erreurs dues au non-respect d'une procédure ou d'une réglementation** ne sont pas limitées au domaine aéronautique ou nucléaire. Elles font aussi partie de la vie quotidienne. Les opérateurs, en particulier les experts, estiment mal les risques et ont tendance à simplifier les procédures car "l'expérience prouve" que rien n'arrive jamais.

-**Les erreurs de modèle ou de représentation** sont parmi les erreurs les plus dangereuses car difficiles à détecter par leur auteur. Elles peuvent en effet prendre un caractère "diabolique", l'opérateur ayant tendance à faire "coller" les signaux qu'il reçoit à son modèle mental, rendant ainsi l'invalidation de ce dernier très difficile.

- **Les erreurs de communication homme-homme** semblent assez éloignées des préoccupations des concepteurs d'interfaces homme-machine. Néanmoins la communication homme-homme devient de plus en plus médiatisée. L'interface joue alors un rôle primordial dans le bon déroulement de cette communication.

- **L'absence de prise de décision en temps voulu** affirme qu'une mauvaise décision prise à temps vaut mieux qu'une bonne décision prise trop tard. Le facteur temps joue un rôle primordial dans les systèmes dynamiques. Il peut en effet transformer une situation critique en une situation catastrophique.

-**Les actions mal séquencées ou mal dosées** sont pour la plupart dues à des erreurs d'autres types survenues en amont [NICOLET JL. et al 1990].

4.3 Manager l'erreur humaine

Le concept de l'erreur humaine est très insaisissable. Dans un premier regard, l'allocation fréquente des causes accidentelles de l'erreur humaine apparaît subjective et guidée par la boîte à outils de l'analyste. C'est une réflexion simple de la nature de l'analyse causale, il suffit de mettre en place un rôle objectif de revenir en arrière pour rechercher les causes primordiales de l'existence des erreurs de leurs racines [RASMUSSEN J. et al 1987].

Ainsi, l'erreur d'un opérateur n'est en fait que le dernier maillon d'une longue suite d'erreurs. Selon [REASON J. 1993], un accident ne peut avoir lieu que s'il existe une trajectoire traversant l'ensemble des défenses du système. Ces défenses peuvent présenter des lacunes, représentées par les trous, mais un accident ne se produit que si l'ensemble de ces lacunes se font face comme schématisé si dessous :

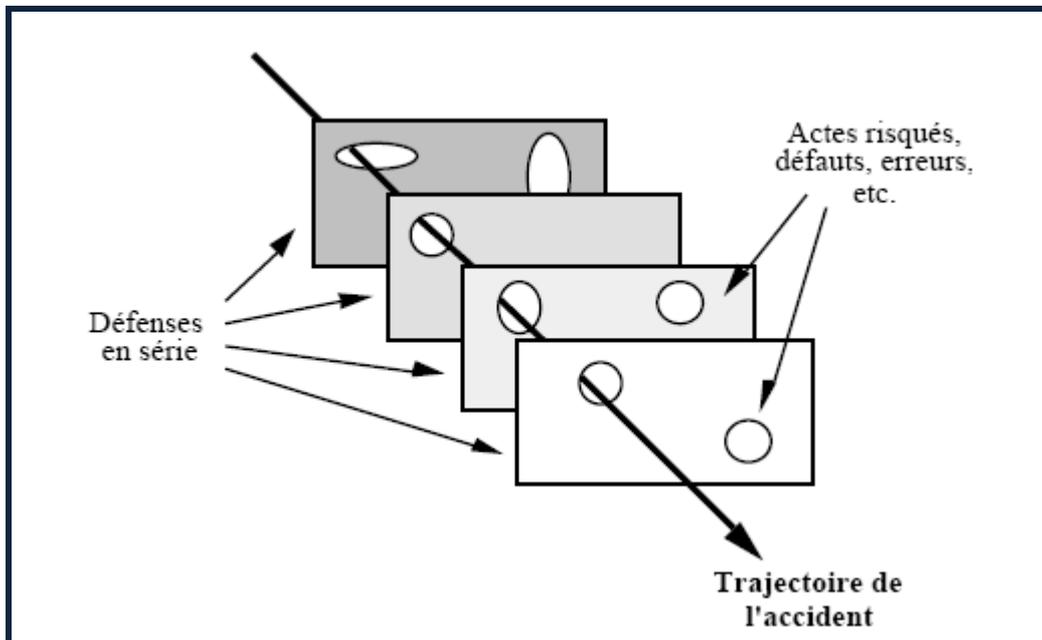


Figure. 12 Trajectoire des accidents selon Reason [REASON J. 1993]

Ainsi, malgré des manquements aux règlements dans le but d'augmenter l'efficacité, des erreurs de la part d'opérateur, ou encore des défauts d'organisation de la part de l'encadrement, il n'y a le plus souvent aucune conséquence grave à ces actes. Les nombreuses défenses en série et la robustesse d'un système ont donc un effet pervers : elles renforcent le sentiment des opérateurs et de tous les intervenants du système, que l'erreur commise est sans conséquence. Dès lors, les procédures de sécurité risquent de ne plus être appliquées à tous les niveaux de la hiérarchie. Les manquements aux règles se multipliant, il suffit qu'ils permettent à une trajectoire accidentelle d'apparaître, et c'est la catastrophe.

Enfin, Chercher à supprimer l'erreur humaine est une quête inutile et certainement vouée à l'échec. Une démarche plus cohérente consiste à apprivoiser l'erreur, à la domestiquer et à apprendre à la connaître de façon à réduire ses occurrences et à prévoir son comportement. L'être humain doit admettre que l'erreur surviendra, généralement au pire moment. L'homme doit alors pouvoir s'apercevoir de son erreur et être en mesure de la corriger [JAMBON F. 1992].

5. Méthode d'analyse de l'erreur humaine

L'erreur humaine ne doit pas être vue comme un comportement totalement imprévisible ; en effet, l'erreur et ses déclinaisons, les fautes, les lapsus, les ratés, sont les mal-aimés de notre société technologique. Une toute petite erreur de manipulation peut avoir de nos jours des conséquences sans commune mesure avec l'erreur commise, et valoir à son auteur une avalanche de reproches. Pourtant l'erreur ne doit pas être vue comme une fatalité mais plutôt comme le prix à payer pour la formidable capacité d'adaptation et de traitement de l'information de l'être humain.

De nombreuses méthodes et approches d'analyses de la fiabilité ont été développées. L'objectif de ces méthodes est de guider l'évaluateur à quantifier pour une tâche donnée l'estimation de la probabilité d'erreur humaine.

5.1 La décomposition de la tâche: «THERP»

La méthode THERP (The Technique for Human Error Reduction and Prediction) a été créée par [SWAIN AD. et GUTTMAN HE. 1983], dans l'industrie nucléaire. C'est une méthode qui consiste à analyser les tâches, identifier et quantifier les erreurs [KENNEDY G A L. et al 2007].

La méthode THERP s'appuie sur une décomposition de la séquence incidentelle ou accidentelle en tâches élémentaires quantifiables. Les données associées aux tâches élémentaires permettent alors de calculer la probabilité d'incident ou accident de la séquence [RAAFAT H M N. et al 1987].

L'analyse se décompose en 5 étapes :

- *Définition des points faibles du système* : il s'agit de repérer les fonctions du système qui peuvent être influencées par les erreurs humaines. Pour chaque fonction, on identifiera les opérations élémentaires réalisées pour une tâche donnée par les opérateurs ;
- *Listes et analyse des tâches* : une analyse approfondie de la tâche permet d'identifier, et pour chacune des sous tâches, les sous tâches et les informations qui sont nécessaires aux opérateurs. A chaque étape, l'analyste décide quelles erreurs peuvent se produire. Pour aider l'analyse, THERP inclut l'utilisation d'un arbre d'événement, qui présente une combinaison des erreurs relatives aux différentes opérations élémentaires.
- *Estimation de la probabilité d'erreurs qui se rapportent aux tâches* : la probabilité $P(E)$ d'une erreur élémentaire est obtenue par la formule :

$$P(E) = P_1 \times K \times P_2$$

Avec, P_1 : Probabilité de base, fonction de la caractéristique de l'opération,

K : Coefficient correctif selon le niveau de stress de l'opérateur,

P_2 : Probabilité de non-récupération de l'erreur.

Les valeurs de probabilité sont fournies par une vingtaine de tables des données d'analyse d'incidents, des jugements subjectifs.

- *Estimation des effets de l'erreur humaine sur le système* : l'analyse de la fiabilité doit être réintégrée à une analyse globale de la fiabilité du système, pour déterminer la contribution humaine au dysfonctionnement. Si des critères d'évaluation de risque sont importants, il est alors nécessaire d'évaluer également la fréquence des événements indésirables.
- *Recommandations pour modifier le système et nouveau calcul de la probabilité de défaillance du système* : une analyse plus approfondie doit permettre de déterminer comment la disponibilité du système peut être améliorée par la réduction des probabilités d'erreurs humaines [SWAIN A D. et al 1983].

5.2 La prise en compte du modèle de Rasmussen: «SHERPA»

La méthode SHERPA (Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach), a été développée par [EMBREY DE. 1986] c'est une technique qui permet d'évaluer qualitativement et quantitativement la fiabilité humaine et d'élaborer des recommandations spécifiques pour réduire l'erreur humaine, notamment en ce qui concerne les procédures, les formations ou la conception d'équipement.

L'analyse se décompose en 6 étapes :

- *Analyse hiérarchique des tâches* : cette analyse hiérarchique consiste à identifier les différentes sous tâches et leurs buts respectifs ainsi que la manière dont ces buts se combinent pour atteindre l'objectif global ;
- *Classification des tâches* : les différentes tâches détaillées à l'étape précédente, peuvent être classifiées en quatre grands types de processus mentaux selon l'approche de Rasmussen (tâche basée sur les habilités, tâche basée sur les règles, tâche basée sur les règles du type : si x alors y, tâches basées sur les connaissances) [EMBREY D E. 1986] ;
- *Identification des erreurs humaines* : Après la classification des tâches selon les types de comportement associés, l'analyste considère les modes d'erreurs agrégés à chaque comportement ;

- *Analyse des conséquences* : L'analyste considère les conséquences de chaque erreur identifiée, et met en évidence lequel des conséquences a des impacts pour l'erreur critique ;
- *L'analyse de recouvrement*: A ce niveau, il s'agit de déterminer s'il ya possibilité de récupérer l'erreur pendant la réalisation d'une tâche, et cette dernière serait l'entrée de la tâche d'après ; sinon, s'il n' ya pas possibilité de récupérer l'erreur, alors la tâche sera arrêtée ;
- *Tabulation*: L'information obtenue par la méthode SHERPA est convertie dans une sorte de tableau. La probabilité ordinaire (P) d'une erreur est alors classée selon un ordre décroissant (lorsque l'événement se produit à peine), moyen (lorsque l'événement se produit une fois ou deux fois) ou élevé (lorsque l'événement se produit fréquemment) Le même processus est appliqué pour la criticité de l'erreur (C) [HARRIS D. et al 2005].

5.3 La prise en compte des facteurs de performance: «SLIM»

Le développement initial de la méthode SLIM (Success like lihood Index Method) a été réalisé par [EMBREY D E. 1984]. L'objectif de cette méthode se base sur des outils d'analyse de la décision et pose comme principe que l'erreur humaine dépend de facteurs de performances.

L'analyse se décompose en 8 étapes :

- *Définition des situations et des tâches* : cette phase consiste à définir correctement les situations à évaluer en fournissant aux experts le maximum d'informations possibles sur les différentes tâches à effectuer ;
- *Choix des facteurs de performance* : cette phase permet d'initialiser la réflexion sur la différenciation des tâches en fonction de facteurs de performance, par la suite les experts déterminent les pôles des échelles catégorisant les facteurs de performance ;
- *Evaluation des tâches sur la base des facteurs de performance* : pour chaque facteur de performance, le logiciel MAUD (Multi Attribute Utility Decomposition) détermine une échelle linéaire graduée de 1 à 9 correspondants aux bornes identifiées précédemment. Cette cotation permet donc de transformer pour un facteur de

performance donné, l'aspect descriptif d'une tâche en une valeur dont la quantification doit être comprise comme étant relative par rapport aux autres quantifiées ;

- *Choix de la valeur idéale et calcul du classement* : la valeur actuelle de chaque facteur de performance étant donnée par les experts, le logiciel MAUD utilise cette référence pour repositionner les tâches en termes de distance par rapport à cette référence ;
- *Vérification d'indépendance* : il est primordial avant de procéder au calcul de l'indice SLI (indice de probabilité de succès) de vérifier que les échelles de facteurs de performance sont indépendantes. Dans le cas où deux facteurs de performances sont proches leur contribution serait double, et le résultat de l'étude totalement biaisé ;
- *Identification des poids relatifs* : cette identification permet de caractériser et de comparer l'importance des facteurs de performance en terme de succès ou d'échec ;
- *Calcul de l'indice SLI* : l'indice SLI de chaque tâche est calculé à partir de cette formule :

$$SLI_j = \sum_i^x (R_{ij} \cdot W_i)$$

Où :

SLI_j = l'indice de probabilité de succès pour une tâche j,

J = numéro de la tâche,

W_i = poids normalisé du facteur de performance i ;

R_{ij} = valeur sur l'échelle du facteur de performance i de la tâche j (compris entre 0 et 1) ;

x = nombre de facteurs de performance considérés.

- *Conversion des SLI en probabilités* : les indices SLI obtenus par le module MAUD sont des mesures relatives de chance de succès de chaque tâche. Pour les transformer en probabilité d'erreur humaine, il est nécessaire de les étalonner sur une échelle SLI pour chaque ensemble de tâches considérées. [HUMPHREYS P. 1988].

5.4 Prise en compte de l'analyse rétrospective «CREAM»

La méthode CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis) a été développée par [HALNAGEL E. 1998]. Elle peut être considérée comme la méthode la plus utilisée dans la seconde génération des outils développés pour l'analyse de la fiabilité humaine.

La CREAM est utilisée dans les analyses rétrospectives d'identification des accidents et des incidents, comme elle permet au contrôleur d'accomplir l'analyse des tâches afin de déterminer les erreurs et leurs multiplications et d'identifier enfin, les effets de la performance sur la sécurité des systèmes [KENNEDY G A L. et al 2007].

Ainsi, la méthode CREAM représente une démarche de rangement des erreurs basées sur la fixation d'une probabilité de panne définie aussi comme probabilité d'accomplissement d'une tâche incorrecte, qui permet d'identifier principalement l'évaluation prédéfinie posé par des conditions d'accomplissements [BERNHARD R. 2008].

L'analyse se décompose en 7 étapes :

- Appliquer le réseau de re-circulation de la tâche au sein des opérations de travail et sélectionner à partir des événements des séquences réalisées dans les analyses similaires ;
 - Analyser la tâche déterminée à partir de la méthode hiérarchique de l'analyse des tâches ;
- 1) Déterminer les conditions de travail nommées aussi conditions de performance courant, le total de ces conditions de performances courantes est de 9 niveaux :
- Adéquation de l'organisation,
 - Condition de travail,
 - Adéquation entre l'interface homme-machine et le support opérationnel,
 - Disponibilité de temps,
 - Temps par jour,
 - Adéquation entre les préparations de formations,
 - Equipe de collaboration de la qualité.

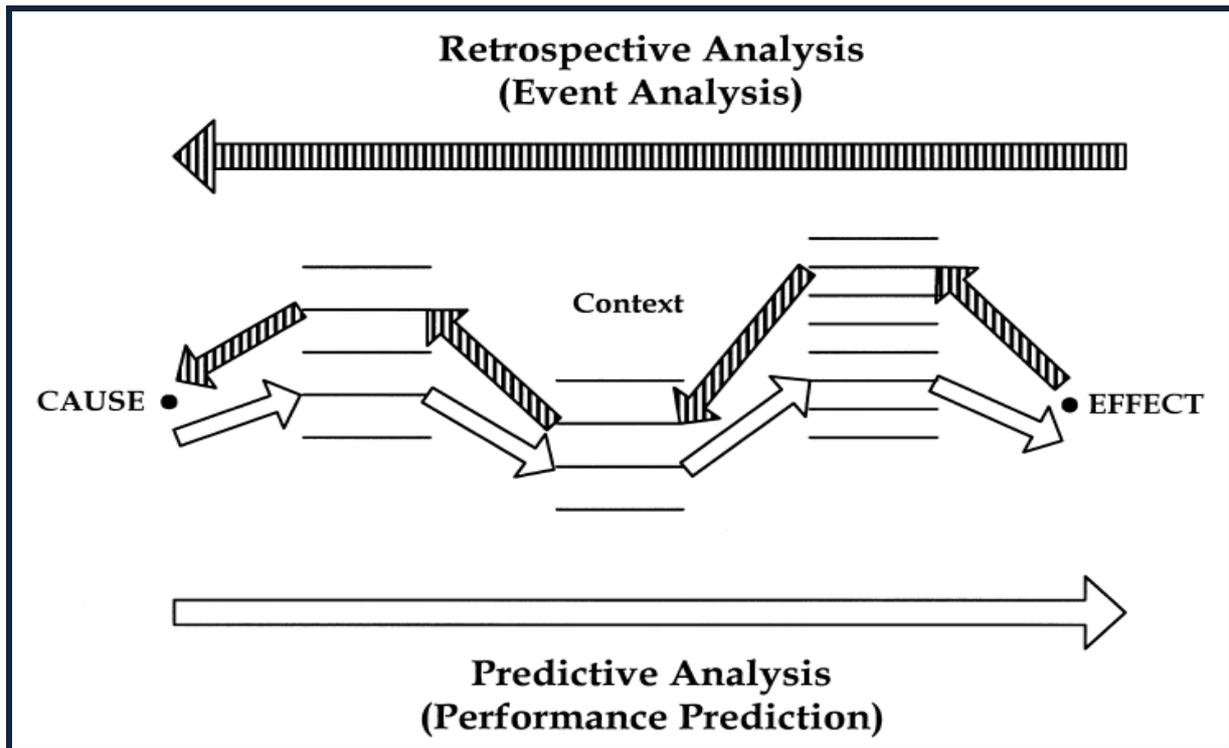


Figure. 13 L'analyse rétrospective et prédictive de la méthode CREAM [KIM IS. 2001]

- Déterminer le profil d'une demande cognitive pour identifier les demandes cognitives spécifiques et simplifier les fonctions cognitives,
- Déterminer la probabilité des modes de contrôles au niveau de chaque élément des tâches intégrés dans la réalisation de la fiabilité humaine,
- Identification de la probabilité cognitive de la fonction de panne,
- Déterminer la probabilité cognitive de défaillance pour toutes les tâches associées et qui peuvent être estimées par la probabilité cognitive nominale de panne [KIM IS. 2001].

5.5 Prise en compte de l'approche de Reason «ATHEANA»

La méthode ATHEANA (A Technique For Human Error Analysis) a été développée par [COOPER SE. 1996]. Elle représente la base des méthodes d'analyses de la fiabilité humaine, pourvu qu'elle est basée sur la définition des scénarios capables de rechercher les contextes force d'erreurs.

La méthode ATHEANA est une approche compréhensive pour l'identification et la définition des événements de pannes humaines appropriées, elle est considérée comme étant la méthode la plus significative pour rechercher les postes d'accidents et les événements de pannes humaines, spécialement les pannes d'usage qui représentent le contexte d'un événement où il manque les forces virtuelles des opérateurs.

Ainsi, la méthode ATHEANA est caractérisée par deux grandes parties :

- Détermination des événements de pannes humaines pour identifier les scénarios des accidents dans le modèle analyse de la probabilité de la sécurité, ainsi que les événements de pannes humaines qui sont caractérisées par les actions de non sécurité,
- Identification des concepts suivants : contexte de la force d'erreur, l'effet de la combinaison entre le développement des facteurs de performances et la création d'un plan des conditions de situation des erreurs humaines. [KIM IS. 2001].

Le processus de réalisation de la méthode ATHEANA est comme suit :

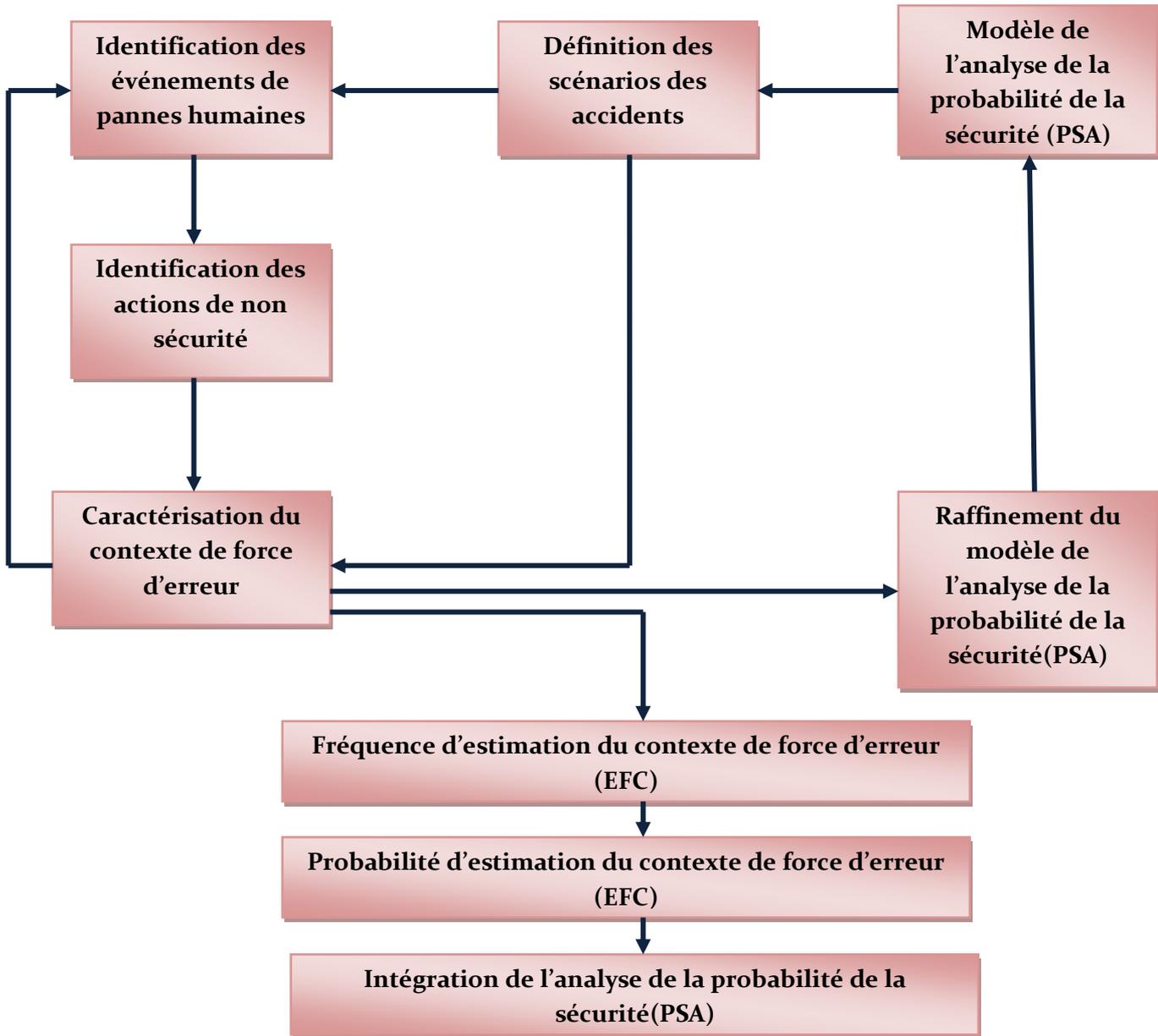


Figure. 14 Le processus de réalisation de la méthode ATHEANA [KIM I S. 2001]

5.6 Méthode d'Analyse Préliminaire des Conséquences de l'Infiabilité Humaine «APRECIH»

La méthode APRECIH (Analyse Préliminaire des Conséquences de l'Infiabilité Humaine) a été développée par [VANDERHAEGEN F. et al 1998], c'est une méthode d'analyse de la fiabilité humaine qui a pour but d'étudier les conséquences, sur le système Homme-machine, des erreurs des opérateurs. L'analyse se décompose de 4 étapes :

- *Analyse fonctionnelle du système Homme-machine* : Cette étape vise à identifier les fonctions du système et à distinguer celles allouées à l'opérateur humain et celles allouées à la machine. Les fonctions humaines sont exprimées en termes de tâches à réaliser dépendantes du contexte. Ainsi pour les auteurs de cette méthode, une fonction est réalisée par un ensemble de tâches T_i ,
- *Analyse procédurale et contextuelle* : Cette étape consiste à identifier, pour chaque fonction, les contextes associés, C_i , et les tâches, T_i , à réaliser dans ces contextes. Il s'agit d'une étape importante et originale. En effet, la prise en compte du contexte est primordiale et permet d'élargir le spectre d'analyse et d'appréhender des contextes hors du fonctionnement normal. La tâche est alors associée à un ensemble d'actions A_i à exécuter,
- *Analyse des tâches* : Cette étape vise à définir les états possibles des tâches et à analyser les causes des tâches erronées. Il s'agit de la réalisation d'un arbre d'événements. Chaque nœud correspond à une action, à chaque nœud sont associées deux branches. La première correspond à l'exécution avec succès de l'action et la seconde à l'échec,
- *Analyse des conséquences* : Cette étape vise à estimer l'impact des erreurs sur l'état du système Homme-machine. Les auteurs proposent une estimation qualitative sur une échelle de gravité de 0 à 3.

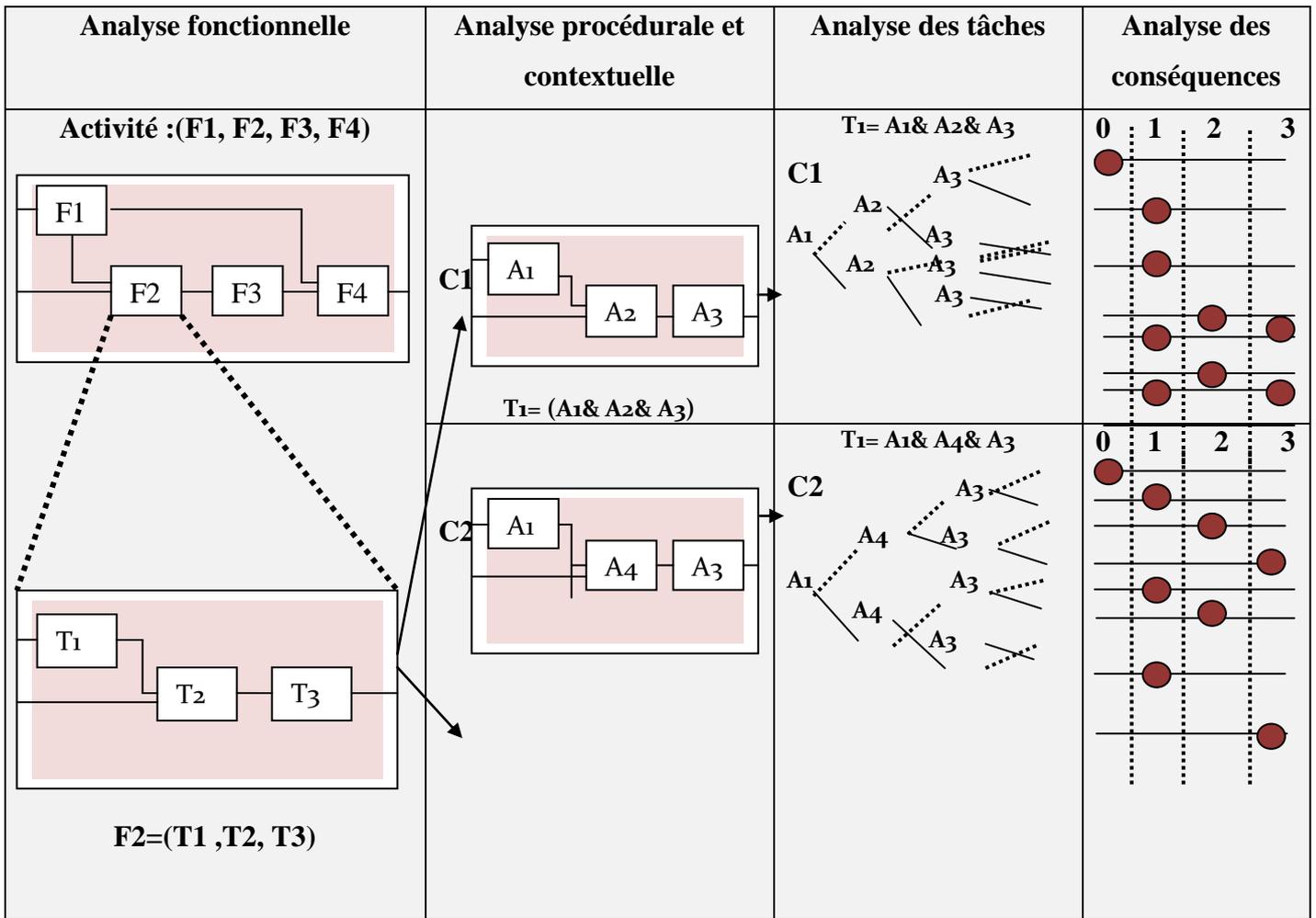


Figure. 15 Démarche d'analyse de la fiabilité humaine dans APRECIH [VANDERHAEGEN F. 1999]

5.7 Méthode d'Analyse de la Fiabilité et Ergonomie Opérationnelle «MAFERGO»

La méthode MAFERGO (Méthode d'Analyse de la Fiabilité et Ergonomie Opérationnelle) a été développée par [FADIER E. et al 1998], elle permet l'étude et l'analyse de la fiabilité opérationnelle en combinant les aspects de l'ergonomie et ceux de la fiabilité technique.

La méthode « M.A.F.E.R.G.O » a permis à l'échelle pratique d'assurer des résultats représentatifs, pourvu qu'elle confirme bien que face aux aléas et/ou dysfonctionnements, les opérateurs sont responsables et conscients de leur rôle [AYADI D. et al 2007].

L'analyse se décompose de 5 étapes :

- *L'analyse structuro-fonctionnelle* : vise à décrire le fonctionnement normale du système existant par l'utilisation des méthodes descriptives (diagrammes blocs, graphes de fluence) et par la description des tâches prescrites et une première analyse des activités réelles,
- *L'analyse opérationnelle* : vise à décrire les modes d'exploitation et de fonctionnement du système, ainsi que le taux de disponibilité des composants techniques, en les mettant en relation avec l'analyse de la planification spatio-temporelle des tâches (exigences, contraintes),
- *L'identification des dysfonctionnements* : est menée par Arbre d'Evénements et A.M.D.E (Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets), ainsi que l'analyse des conséquences de ces dysfonctionnements sur l'activité des opérateurs,
- *L'analyse causale des dysfonctionnements* : menée par Arbre de Défaillances (AD) permet de définir le degré de fragilité du système ainsi que les scénarios d'événements générateurs de contraintes pour l'opérateur,
- *Les propositions d'améliorations* : sont centrées sur l'amélioration de la fiabilité et de la disponibilité, ainsi que sur l'amélioration du couplage homme x tâches

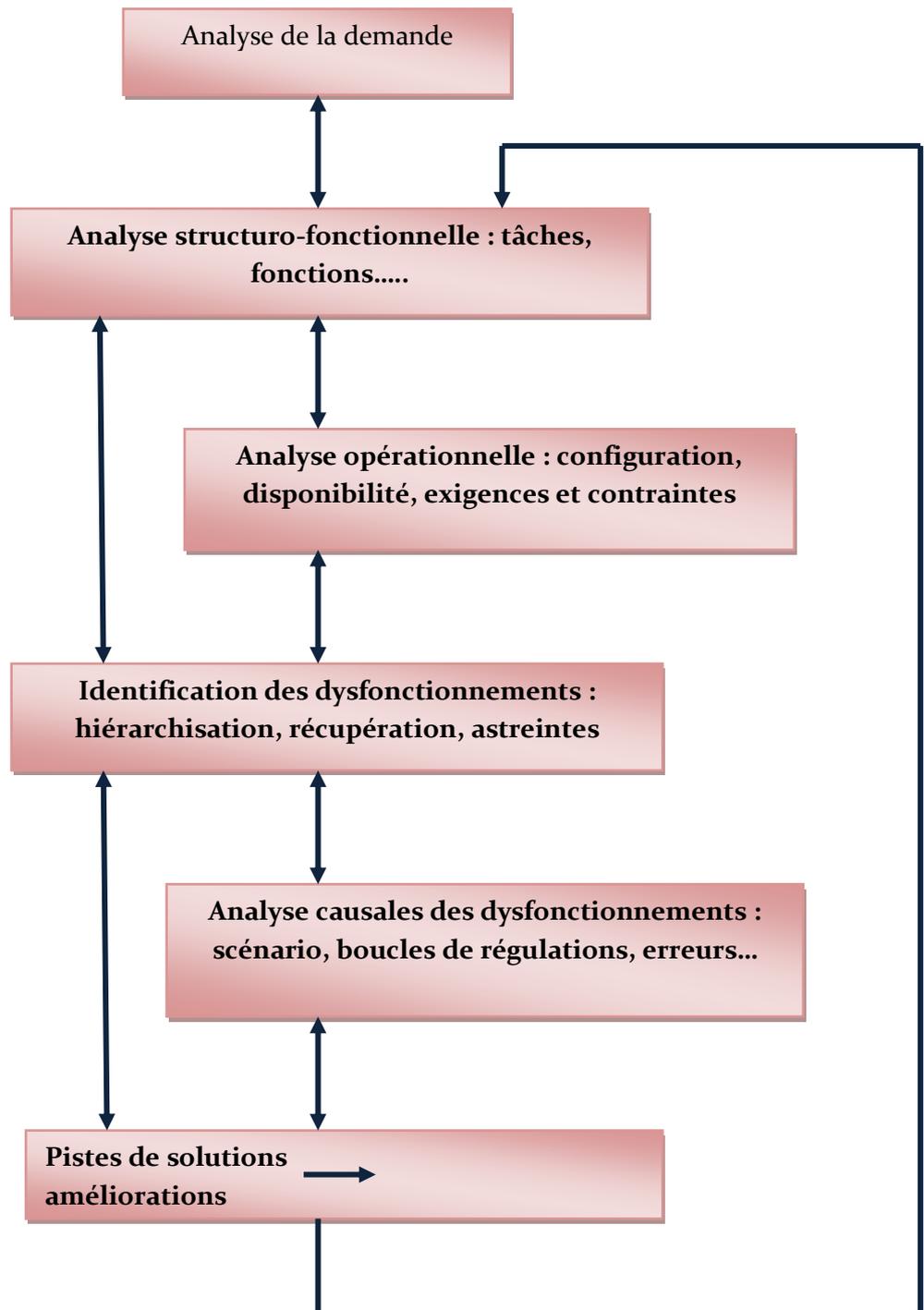


Figure. 16 Les étapes de MAFERGO [FADIER E. 1998]

Les premières applications ont permis d'acquérir une expertise en matière d'assistance à l'analyse, à l'évaluation et à l'optimisation de la fiabilité opérationnelle de systèmes existants; et de formaliser et de valider les principes et méthodes utilisés dans ce cadre afin de disposer d'un outil opérationnel, validé, diffusable et communicable.

Dans les différentes applications on peut considérer que la démarche MAFERGO a permis de fournir, pour un système de travail servant de situation de référence, non seulement des données structuro-fonctionnelles du système, mais surtout, des données de fonctionnement opérationnel, relatives en particulier aux activités réelles mises en œuvre [FADIER E. et al 1998].

5.8 Méthode d'analyse de la Fiabilité Humaine, Organisationnelle et Technique «FHORTE©»

La méthode FHORTE© (Fiabilité Humaine, ORganisationnelle et Technique) est développée grâce à la recherche et à l'investissement de cinq partenaires [SNCF ; CETIM (Centre d'Etudes Techniques des Industries Mécaniques) ; IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) ; NORM (société de conseil spécialisée dans l'ingénierie des facteurs humains) ; CETOP (société d'ingénierie spécialisée dans la sûreté de fonctionnement et le management des risques)]. Ayant la volonté et l'ambition de définir une approche intégrée du management des risques, couvrant les aspects techniques, organisationnels et humains.

Cette méthode permet de s'adosser sur les analyses de sûreté de fonctionnement et les enrichir par des outils lui permettant d'enquêter sur la gestion, l'organisation et les jeux sociaux autour des règles et procédures. Elle doit pouvoir balayer les trois grands types de risque : technique, organisationnel et humain et ce, depuis l'analyse préliminaire du risque jusqu'à la mise en place d'indicateurs de suivi des facteurs de performance, en passant par l'analyse des règles du jeu organisationnel.

L'analyse se décompose de 8 étapes :

- *La prise de connaissance des aspects formels de l'entreprise,*
- *Evolution de l'entreprise dans son environnement : cette étape consiste à connaître les facteurs qui pèsent sur son activité, qui la contraignent et qui déterminent des conditions incontournables d'accès à l'objectif visé.*

- *Analyse fonctionnelle des processus de base* : Cette analyse permet de comprendre les processus de base qui animent l'activité. Les logiques d'actions formelles de l'entreprise seront représentées. A ce stade, il s'agit d'identifier le(s) processus manquant(s) ou défaillant(s) au regard de la maîtrise des risques,
- *Identification des risques sur lesquels l'entreprise doit impérativement avoir installé des barrières techniques, organisationnelles ou humaines* : cette étape consiste à évaluer la criticité des processus à risques. Dans le cadre d'une démarche de sécurité, la présence de barrières à minima redondantes pour couvrir et protéger les erreurs intervenant sur des tâches ou fonctions importantes pour la sécurité est nécessaire.
- *Elaboration d'une enquête qui étudie la dimension informelle de l'organisation* : il s'agit de récupérer une description du fonctionnement informel de l'organisation, en insistant sur les processus qui comportent des risques,
- *Analyse des forces et faiblesses de l'organisation* : cette étape consiste à examiner le contenu des entretiens et observations, à partir d'une liste de facteurs socio-organisationnels qui jouent un rôle crucial dans un fonctionnement d'entreprise optimal et plus spécifiquement dans la maîtrise des risques.
- *Action d'amélioration* : Cette partie peut être découpée en deux étapes. Tout d'abord, il est nécessaire de rechercher et de bâtir, à partir de l'analyse des forces et faiblesses, des indicateurs pertinents de suivi de l'évolution de la performance dans la maîtrise des risques. Enfin, imaginer des solutions et proposer des actions d'améliorations réalistes, acceptables pour l'entreprise et acceptées par les acteurs.
- *Application du principe de Deming* : La dernière étape permet d'appliquer le principe de Deming et d'effectuer une boucle de validation des objectifs, et mettre à jour les limites et les investigations supplémentaires utiles à l'amélioration des performances sécurité [GAUFRETEAU P. et al 2000].

Conclusion

Le souci de la fiabilité existe depuis fort long temps, probablement depuis que l'homme a conçu et forgé ses premiers outils. Il a constaté que pour tout système industriel il est nécessaire de faire recours plus au moins grands aux concepts et aux techniques permettant d'assurer la fiabilité.

L'étude de la fiabilité peut être abordée selon différents créneaux et selon le concept de base à prendre en considération : le système, l'environnement...l'opérateur. Ainsi, les opérateurs font partie intégrante du système de travail, leurs comportements modifient les conditions d'utilisations des systèmes. L'écart entre le comportement prévu et le comportement réalisé est due essentiellement aux différentes situations qui peuvent modifier ce qui est prévu tel que : variabilité et complexité, absence d'information, stress...

En effet, la fiabilité humaine mérite une attention particulière, pourvu que l'opérateur soit considéré au cœur du système de travail, il est doublement concerné, donc il est primordial d'appliquer des méthodes pour quantifier son comportement.

Par ailleurs, il existe deux approches de modélisations du comportement de l'opérateur, l'approche de première génération basée sur l'identification de la tâche réalisée par l'opérateur, et sur l'évaluation des erreurs réalisées ; l'approche de deuxième génération basée sur le comportement cognitif de l'opérateur.

Ce chapitre a présenté les différentes caractéristiques à considérer pour l'étude de la fiabilité. L'analyse de la fiabilité doit être effectuée selon une méthodologie et s'appuyer sur des méthodes.

Le chapitre suivant s'attachera à présenter la composante principale à prendre en considération pour aboutir à la fiabilité c'est l'analyse du risque, ces méthodes, ces modèles associées qu'elles soient d'origines techniques ou humaines.

Chapitre 2:

METHODES ET MODELES D'ANALYSE DU RISQUE

Sommaire

INTRODUCTION	53
1. Notion de risque	53
1.1. Définition du risque	53
1.2. Risque et dangers	56
1.3. Risque et sécurité	57
1.4. Risque acceptable et risque majeur	58
2. Typologie du risque	61
2.1. Les risques de l'entreprise	62
2.1.1 Les risques différenciés par origine	62
2.1.2 Les risques différenciés par conséquence.....	63
2.1.3 Les risques différenciés par leur niveau d'assurabilité	64
2.1.4 Les risques différenciés par leur domaine d'activité	64
2.2. Les risques professionnels	64
2.2.1 Les risques mécaniques	65
2.2.2 Les risques physiques.....	65
2.2.3 Les risques dus aux manutentions	65
2.2.4 Les risques chimiques	66
2.2.5 Les risques biologiques	66
2.2.6 Les risques de transport de matières dangereuses	67
2.2. Les risques nucléaires	67

3. Analyse du risque	68
3.1. Identification des risques	69
3.2. Evaluation des risques	71
3.3. Traitement des risques	74
3.4. Suivi et capitalisation des risques.....	76
4. Méthode d'analyse et d'évaluation du risque	76
4.1. Méthode d'analyse du système en fonctionnement normal	77
4.1.1 Méthode diagramme bloc.....	77
4.1.2 Méthode graphe de fluence	78
4.2. Méthode d'analyse du système en fonctionnement dégradé	78
4.2.1 Méthode d'analyse préliminaire des dangers(APD).....	79
4.2.2 Méthode d'analyse des modes de défaillances et de leurs effets(AMDE).....	80
4.2.3 Méthode d'analyse des effets des erreurs des logiciels (AEEL).....	81
4.2.4 Méthode de diagramme de succès (MDS).....	81
4.2.5 Méthode de l'arbre de défaillance (AD)	82
4.2.6 Méthode de la table de vérité (MTV)	83
4.2.7 Méthode des combinaisons des pannes résumées (MCPR)	83
4.2.8 Méthode de l'arbre des conséquences (MACQ).....	84
4.2.9 Méthode du diagramme causes-conséquences (MDCC).....	86
4.2.10 Méthode de l'espace des états (MEE).....	86
4.3. Méthode d'analyse du système de conception et suivi de projet	88
4.3.1 Méthode Structured Analysis Design Technique (SADT)	88
4.3.2 Méthode MERISE	89
CONCLUSION	91

Introduction

Le risque occupe une place importante dans la société. Le mot "risque" est quotidiennement employé par tout un chacun. Il est employé : dans le milieu économique, financier, social, juridique, moral, médical, militaire [EWALD F. 1999].

La gestion de ces risques constitue un ensemble de concepts, de démarches et d'outils destinés à identifier et à contrôler les risques qui pèsent sur la vie de l'entreprise afin de les réduire et de rechercher la meilleure couverture possible.

Ce chapitre a pour objectif de présenter la problématique du risque, dans le contexte des systèmes Homme-machine. Dans une première partie, nous décrivons les concepts de base de l'analyse du risque. La seconde partie est consacrée à l'identification des différents types de risques et leurs relations avec les acteurs au sein de l'entreprise. Dans la troisième partie, nous déterminons les différentes méthodes et techniques de l'analyse du risque.

1. Notion de risque

L'incertitude est une donnée intrinsèque à la vie de toute organisation. Aussi l'un des principaux défis pour la direction réside dans la détermination d'un degré d'incertitude acceptable afin d'optimiser la création de valeur, objectif considéré comme le postulat de base dans le concept d'analyse de risques. L'incertitude est source de risques et d'opportunités, susceptibles de créer ou de détruire de la valeur. La notion de risque est liée au concept de variabilité ou de dispersion. C'est une mesure de l'écart d'un résultat donné par rapport au résultat souhaité. Cette approche est focalisée sur la probabilité d'occurrence appliquée à une variable déterminant un événement à partir d'un seuil.

1.1 Définition du risque

Bien que l'analyse des risques et leur mode de management soient au cœur de nombreux travaux de recherche, le risque demeure un concept difficile à définir.

[Le PETIT ROBERT 1988] définit un risque comme un : « danger éventuel plus ou moins prévisible ».

Nombreuses sont les propositions de définition du risque :

[**LAURENCE W W. 1976**], considère le risque comme étant : « une mesure de la probabilité et de la gravité d'événements dommageables » ;

[**ROWE W D. 1977**] considère que : « le risque consiste dans la réalisation d'un événement redouté, aux conséquences négatives » ;

[**CHARBONNIER J. 1982**] suppose que : « un risque est un péril mesurable, visant les biens ou activités précis, aux conséquences économiques dommageables » ;

[**VILLEMEUR A. 1988**] définit le risque comme : « la mesure du danger. En combinant par multiplication les deux dimensions du danger : sa probabilité et sa gravité » ;

[**LEROY A. 1992**] définit le risque comme : « une entité à deux dimensions probabilité d'une part et conséquence(s) d'autre part, mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences » ;

[**POUMADERE M. 1995**], avance que : « les risques constituent une menace pour les êtres humains et ce à quoi ils sont attachés ».

Afin d'approfondir la définition du risque, il est intéressant d'explorer le champ lexical de ce mot. Ainsi, deux aspects du risque se dégagent :

- L'aspect redouté du risque : Le risque renvoie à la notion de danger, de péril, d'inconvénient auquel un objet ou un individu est exposé. Il s'agit de la conséquence, redoutée, d'un événement ou d'une action,
 - L'aspect incertain du risque : Le risque est associé à son caractère éventuel pouvant être le fruit du hasard. Le risque appartient au domaine du possible, du probable
- [**GOGUELIN P. 1988**].

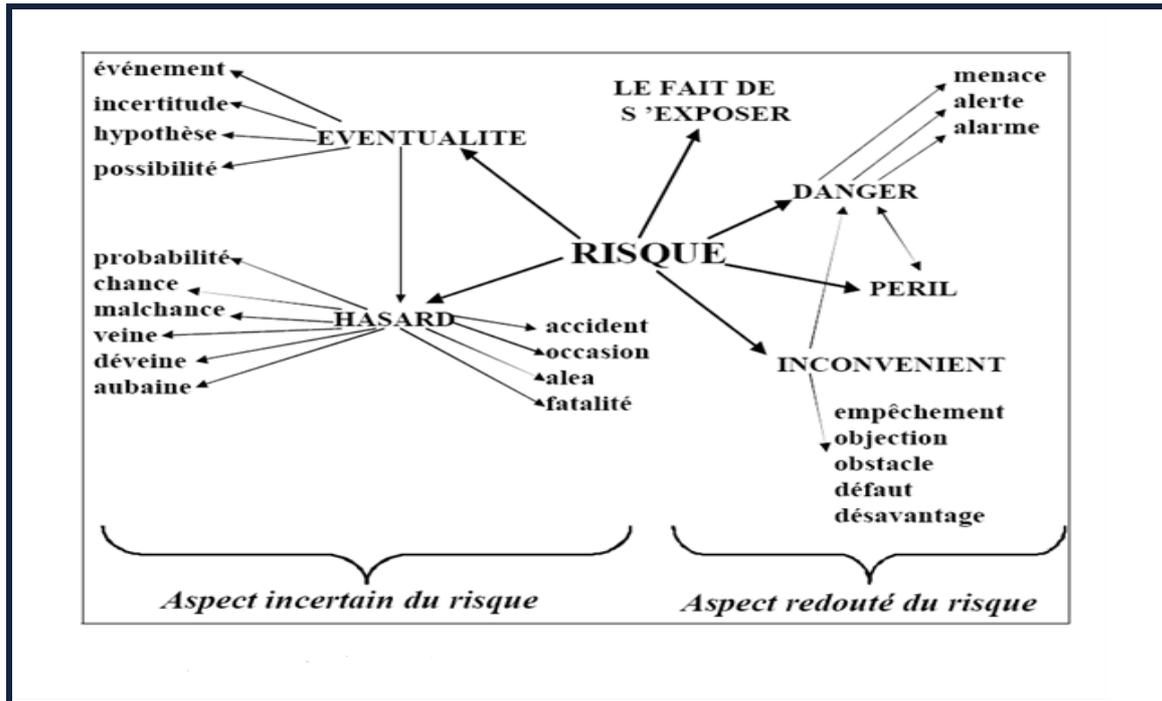


Figure. 17 Champ lexical du risque [GOGUELIN P. 1988]

Ainsi, le risque est toujours consécutif à la présence d'un danger, il existe dès qu'un opérateur, face à une situation, à un produit peut subir des dommages physiques ou psychiques.

Selon le Cabinet PEA Consulting, un risque est la conjonction de quatre ingrédients dans un environnement ou l'homme est souvent mentionné comme « la source » principale.

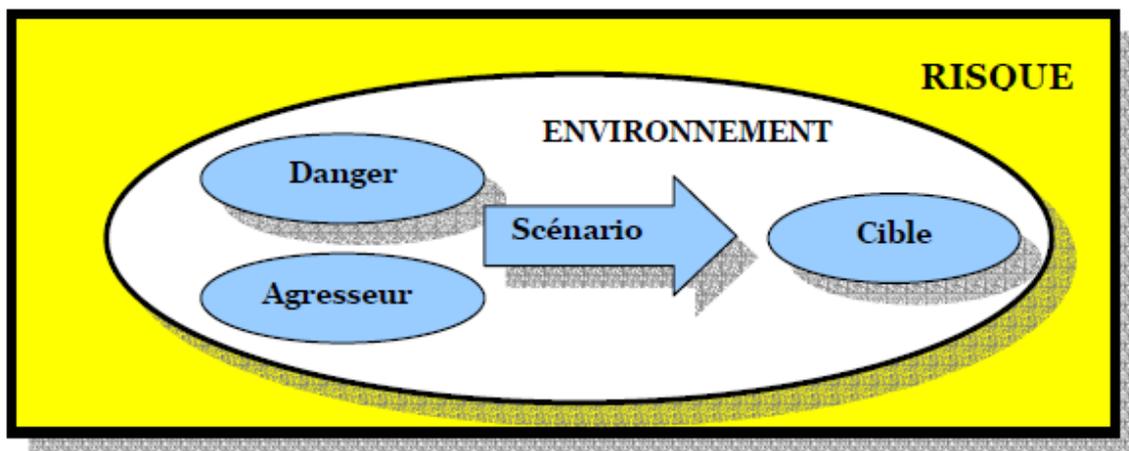


Figure. 18 Ingrédients du risque

A chaque risque sont associés des « facteurs de risque », caractéristiques dont la présence accroît la probabilité d'occurrence du risque, mais sans en constituer une cause nécessaire et suffisante. C'est ce que savent depuis longtemps les assureurs, ce qui explique que les primes d'assurance ne soient pas égales pour tous.

Constituer un danger en risque, c'est donc considérer qu'il n'a pas une cause simple, nécessaire ou suffisante, mais une multiplicité de causes probables, de « facteurs de risque ».

Ainsi, il n'est même pas nécessaire que le lien entre un risque et l'un de ces facteurs soit compris. En fait, le nombre de facteurs de risque théoriquement envisageables pour un risque donné est incalculable, il croît directement en rapport avec notre capacité à recueillir et traiter des informations chiffrées [NGABI S. 2006].

1.2 Risque et dangers

Qu'il s'agisse du domaine des technologies (sûreté de fonctionnement, management environnemental, gestion de projet, etc.), de l'économie (aide à la décision, choix des investissements, etc.) ou de tout autre domaine, risque et danger sont parfois source de confusion quant à leur définition est différente. [Le PETIT ROBERT 1988] définit un danger comme « ce qui menace ou compromet la sûreté, l'existence d'une personne ou d'une chose ». Un danger est une situation qui a en elle un certain potentiel à causer des dommages aux personnes et aux biens [FUMEY M. 2001].

Le terme de danger peut être utilisé en tant que notion générale regroupant trois concepts fondamentaux : le phénomène dangereux - définit comme étant Source potentielle de dommage – [LEVESON N. 1995], la situation dangereuse - définit comme étant la situation dans laquelle des personnes, des biens ou l'environnement sont exposés à un ou plusieurs phénomènes dangereux -, et l'événement dommageable- définit comme étant l'événement déclencheur qui fait passer de la situation au dommage- [ISO/CEI GUIDE 51 -1999]. L'étude d'un accident peut alors être menée comme une étude globale faisant appel à ces trois événements, parfois qualifiée d'analyse du danger, sachant que son but est de fournir une base pour l'analyse du risque [GUIOCHET J. 2003].

Dans le langage courant, le risque est souvent définit comme étant l'événement ou la situation qui produit les dangers. Le Risque est considéré comme l'éventualité d'un événement ne dépendant pas exclusivement de la volonté des parties et pouvant causer la perte d'un objet ou

tout autre dommage ; En d'autres termes, un risque est une évaluation du danger. Il implique éventualité et hasard, possibilité ou probabilité, certitude ou incertitude. Le terme risque est donc ambigu car il évoque à la fois le type de conséquences (ou dommages) et la probabilité de survenue de celles-ci [FUMEY M. 2001].

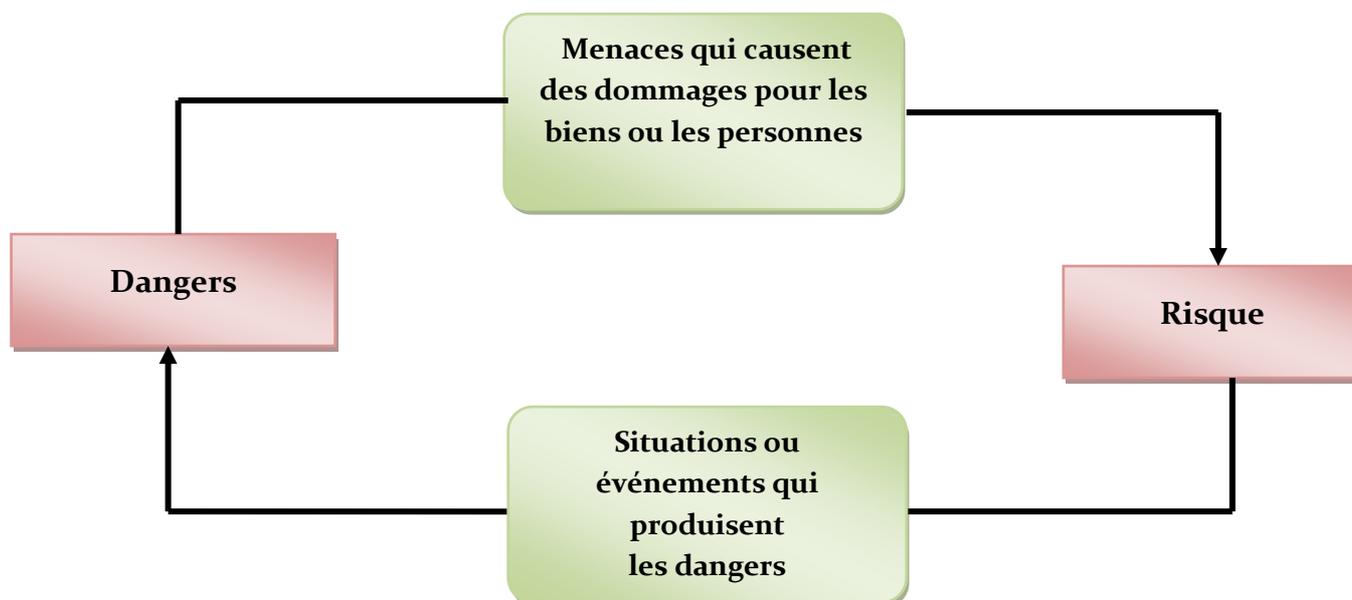


Figure. 19 Champ connexe entre dangers et risque

1.3 Risque et sécurité

La prise en compte de la sécurité évolue tout au long du cycle de vie des processus industriels, dès leurs conceptions. [GEIBEN B. et al 1998] définit la sécurité comme : « l'ensemble des mesures de prévention et de réaction mises en œuvre pour faire face à une situation d'exposition résultant de risques accidentels, qu'ils soient le fait de l'homme, de la machine ou de la nature ».

[ISO/CEI GUIDE 51 -1999] considère la sécurité comme étant : « absence de risque inacceptable ». Le risque acceptable est, par conséquent, le résultat d'un équilibre entre l'idéal de la sécurité absolue, les exigences auxquelles doit répondre le système concerné, et des facteurs comme le bénéfice, le coût effectif, les règles et les conventions de la société concernée. La sécurité, dans cette optique, est donc un concept lié à une connaissance du niveau de risque accepté. Il est important de noter que même si certaines études de risque et

de sécurité se recoupent, ces deux notions sont bien distinctes au sens où l'une s'intéresse à la continuité du service délivré et l'autre à la notion de dommage. Il est tout à fait possible d'envisager une solution très fiable mais avec un niveau de sécurité très bas, et vice versa.

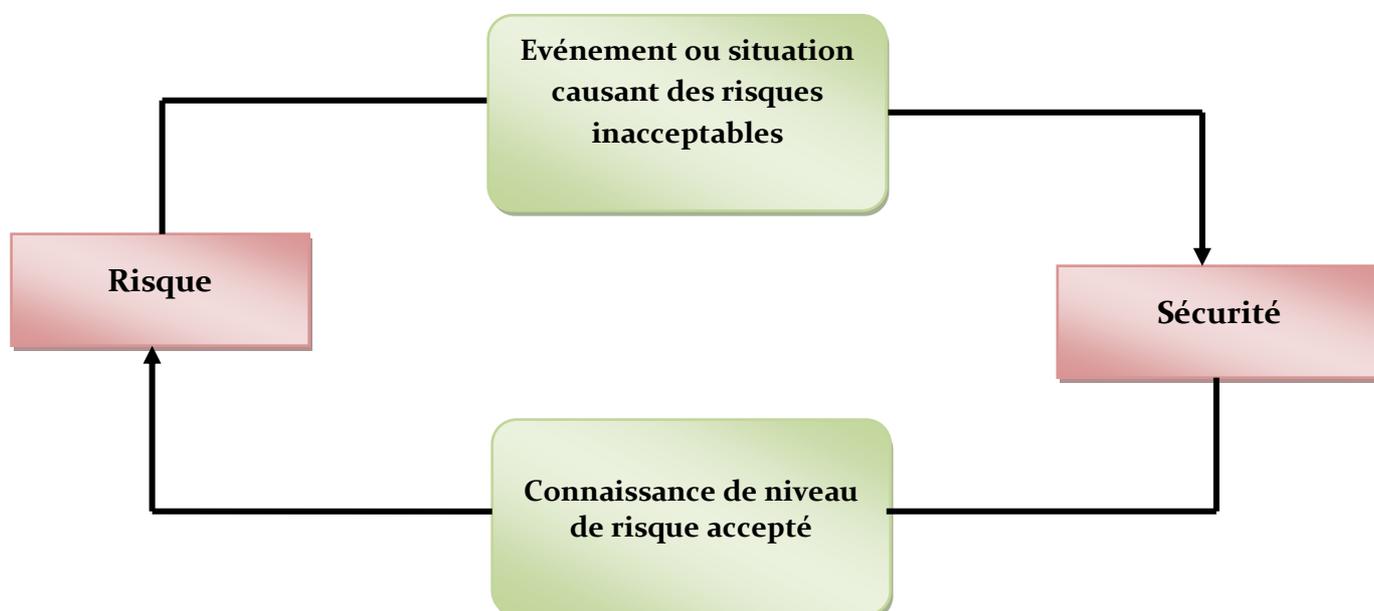


Figure. 20 Champ connexe entre sécurité et risque

1.4 Risque acceptable et risque majeur

La notion de risque est essentielle pour caractériser la confiance attribuée à un système. En effet, si on admet souvent comme potentiels des dommages sévères, seule leur faible probabilité d'occurrence nous les fait accepter. La notion de risque acceptable selon [ISO/CEI Guide 51 -1999] est : « un risque accepté dans un contexte donné basé sur des valeurs courantes de notre société ». Notons que l'acceptabilité concerne le risque et non la gravité du dommage ou sa probabilité d'occurrences considérées séparément.

Cette définition souligne également le fait que l'acceptabilité dépend des valeurs courantes souvent fondées sur des données associées à des phénomènes naturels. La définition précise par ailleurs que l'acceptabilité est fonction du contexte. Ce contexte peut tout d'abord caractériser l'état d'un savoir sur des pratiques ou sur une technologie de mise en œuvre [GUIOCHET J. 2003].

Ainsi, on peut considérer un risque est acceptable d'une part parce qu'il se situe dans une limite comparable avec d'autres systèmes, mais surtout parce que la société est prête à

l'accepter au regard des bénéfices qu'elle peut en tirer., même après avoir déterminé qu'un risque n'était pas acceptable, et qu'il est impossible de le réduire pour des raisons techniques ou économiques, il est toujours possible de décider que l'on prendra le risque en raison du contexte. Le niveau du risque acceptable est alors modifié (et non le niveau du risque lui-même). Pour exprimer le fait qu'un risque non acceptable au départ, puisse être pris par la suite, comme risque acceptable [BOHOLM A. 1998].

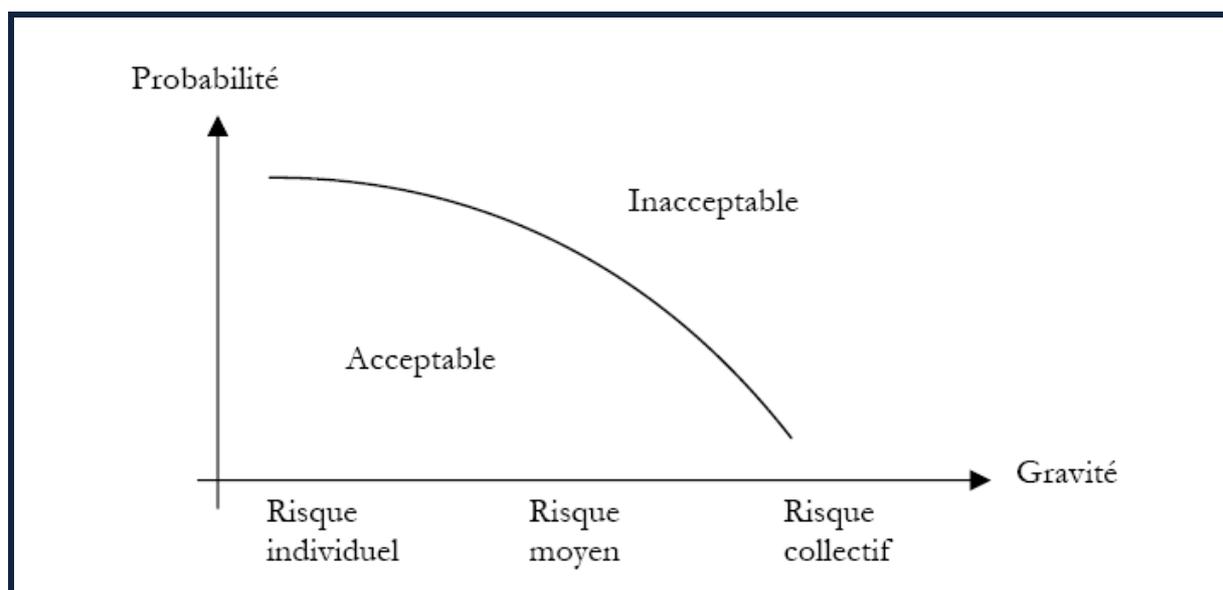


Figure. 21 Perception du risque acceptable

Le risque majeur appelé aussi risque collectif se caractérise par une faible fréquence et une forte gravité, tel que :

- Une faible fréquence : l'homme et la société peuvent être d'autant plus enclins à l'ignorer que les catastrophes sont peu fréquentes,
- Une gravité élevée : nombreuses victimes, dommages importants aux biens et à l'environnement.

Un événement aléatoire potentiellement dangereux (aléa) n'est un risque majeur que s'il produit des effets sur une zone où des enjeux humains, économiques ou environnementaux sont présents (vulnérabilité). L'événement peut être plus ou moins rapide (cinétique).

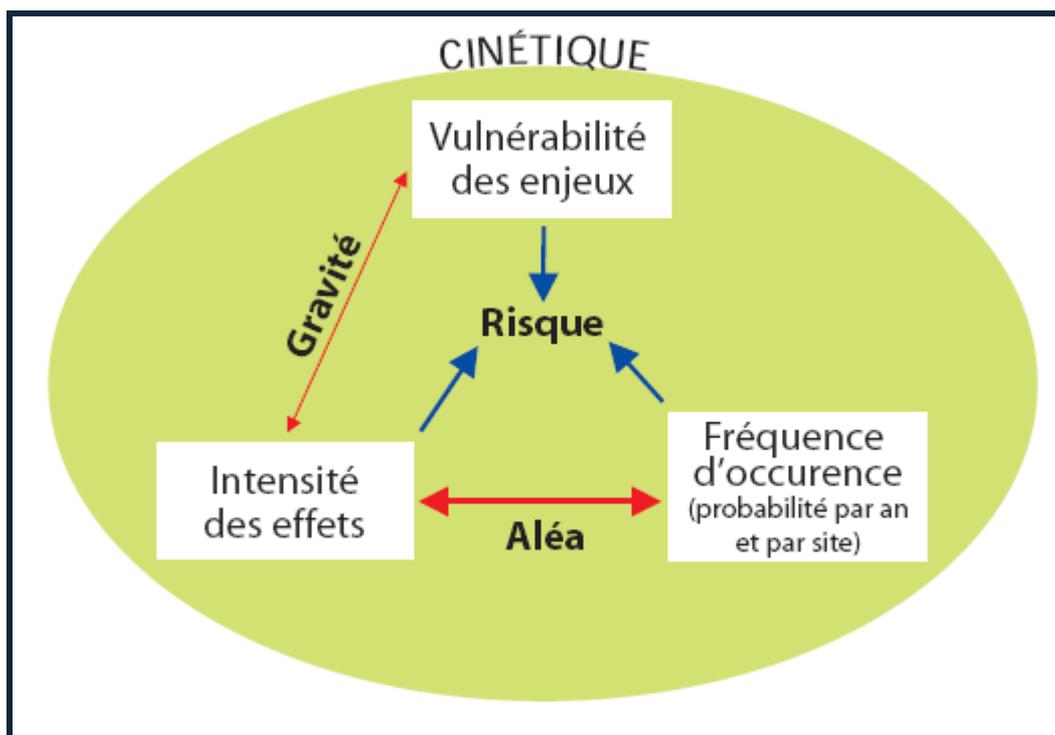


Figure. 22 Perception du risque majeur

Ainsi, la Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques [DPPR. 1990] du Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement définit le risque majeur comme : « la confrontation d'un aléa (probabilité d'un événement qui peut affecter le système considéré) avec des enjeux (personnes biens, équipements, environnement menacés par l'aléa et susceptibles de subir des préjudices ou des dommages) ». En effet, un événement ne mène à un état potentiellement dangereux que s'il s'applique à une zone où des enjeux humains, économiques ou environnementaux sont en présence.

Ainsi, le risque tel qu'il soit est toujours consécutif à la présence d'un événement de dommage ou un phénomène dangereux, ce qui diffère c'est le degré de gravité entre les deux types de risque cité précédemment et qui donne une plus grande priorité au risque majeurs par rapport au risque acceptable.

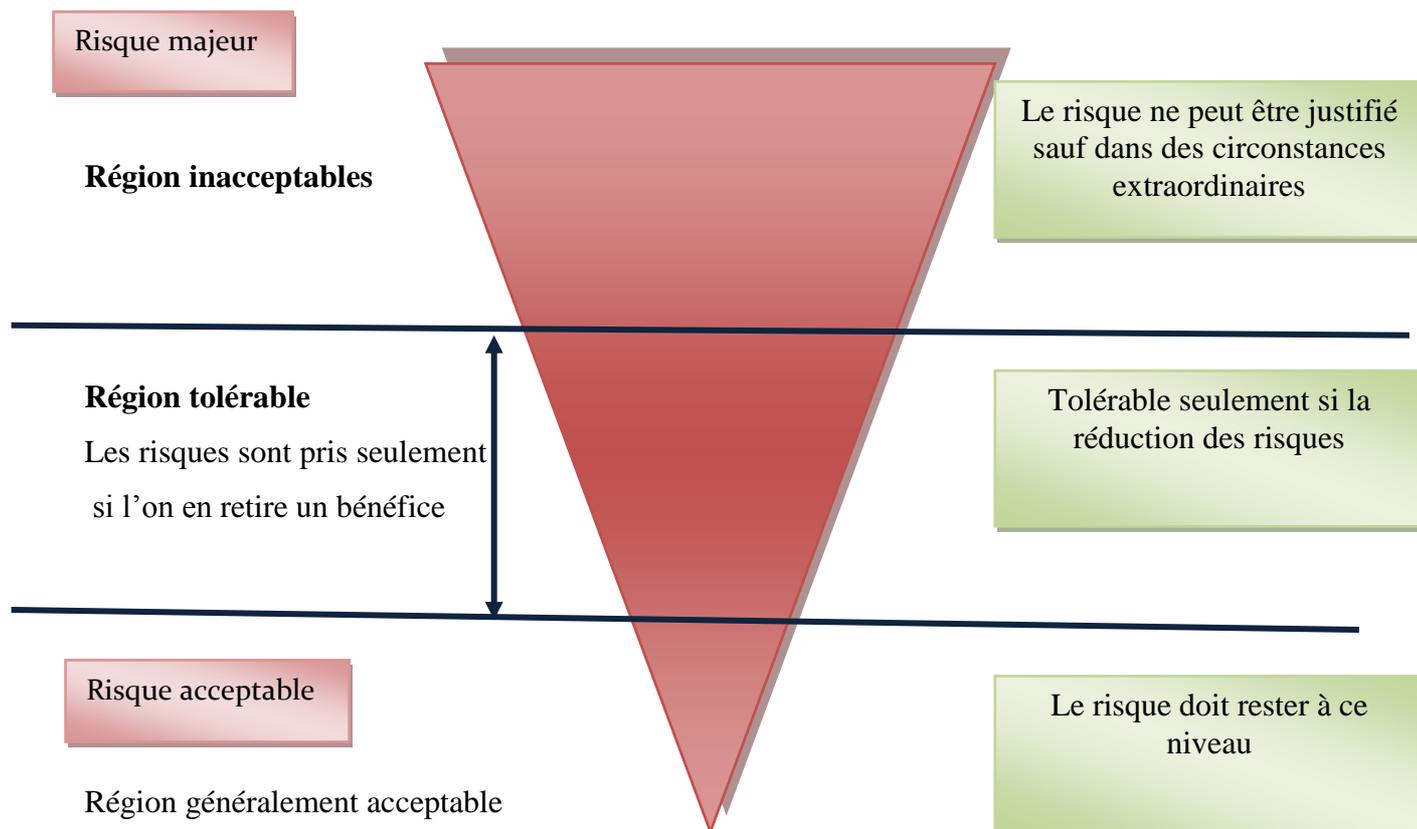


Figure. 23 Champ connexe entre risque majeur et risque acceptable

2. Typologie du risque

Toute activité humaine, quels que soient sa nature et le lieu où elle s'exerce, présente des dangers pour l'homme, qui se présente sous forme de risque.

Le risque permet d'identifier l'éventualité d'un événement futur, susceptible de causer généralement un dommage, une altération, il mesure principalement la probabilité de l'existence d'une situation dangereuse pouvant conduire à un événement grave. Ainsi, en fonction de l'origine des nuisances, de leurs natures et de leurs existences, on distingue plusieurs familles de risque selon le type de classification adoptée [MARGOSSIAN N. 2003].

Dans ce qui suit, on va présenter une classification des risques parmi plusieurs autres classifications.

2.1 Les risques de l'entreprise

Les risques de l'entreprise peuvent être caractérisés par leur nature, leur source ou origine ou, leurs effets sur les systèmes cibles, leurs conséquences et leur niveau d'assurabilité. Ainsi, qu'il s'agisse de risques environnementaux, industriels, commerciaux, stratégiques, sociaux ou financiers, chaque type de risque peut être caractérisé par ces paramètres.

Les risques de l'entreprise définis par la suite sont différenciés par nature, origine, conséquence, assurabilité et domaine d'activité.

2.1.1 Les risques différenciés par origine

L'entreprise évolue dans un environnement vaste, complexe et mouvant, source de multiples facteurs aggravants pour les risques de l'entreprise. Le développement des pôles industriels et la prise de conscience du non existence du "risque nul" contraignent le gestionnaire de risques à ne plus faire abstraction des interactions existant entre l'entreprise, la population et l'environnement [FUMEY M. 2001].

L'origine des risques peut être :

- Interne à l'entreprise tel que lié aux différentes technologies adoptées, ou encore lié aux facteurs humains,
- Externe à l'entreprise lorsqu'ils sont le fait d'acteurs qui ont un lien de travail ou de proximité avec l'entreprise. Aussi, l'environnement de l'entreprise peut être une source de risques.

L'environnement de l'entreprise peut être décomposé en un ensemble d'entités/sphères élémentaires :

- La sphère économique comprend les aléas du marché, l'ouverture des marchés, la concurrence, l'espionnage industriel et le pouvoir de la distribution sur la production ;
- La sphère financière comprend principalement la variation des marchés monétaires ;
- La sphère de la clientèle regroupe le risque commercial lié au caractère volatile de la demande, le risque des dommages causés aux tiers et le risque crédit ou de non solvabilité de la clientèle ;

-La sphère sociétale comprend les risques liés : aux décisions législatives ou réglementaires, au pouvoir des juges, à la défense de l'environnement, à la société [DAVID L. et al 1997].

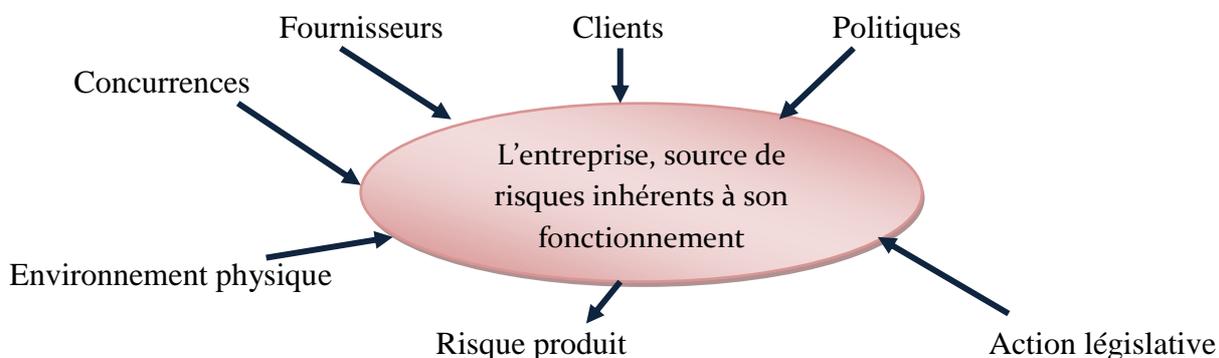


Figure 24 Risque et origine [MARMUSE C. et al 1989]

2.1.2 Les risques différenciés par conséquence

La réalisation du risque est une source de dommages pour l'entreprise il peut se traduire par des conséquences multiples. Nous identifions trois types de conséquences : conséquences financières ; conséquences juridiques et conséquences sociales :

- Conséquences financières : Les risques ont tous d'éventuelles conséquences financières. Il peut s'agir de pertes directes ou indirectes. Le risque affectant les biens de l'entreprise se traduit de manière indirecte par des pertes financières.

- Conséquences juridiques : L'entreprise peut être à l'origine de préjudice et donc être exposée à des poursuites judiciaires. Selon la nature des faits, on distingue les affaires civiles des affaires pénales.

- Conséquences sociales : La réalisation d'un risque est susceptible d'avoir des conséquences sur les employés de l'entreprise. C'est le cas des risques affectant les personnes (dommages corporels, accidents affectant les employés, perte de ressource humaine clé, chômage par suite d'un arrêt d'exploitation, etc.), mais également des risques sociaux liés aux ressources humaines de l'entreprise (mouvement social, actes de malveillance,...) [MARMUSE C. et al 1989].

2.1.3 Les risques différenciés par leur niveau d'assurabilité

L'assurance raisonne à partir de la notion d'assurabilité d'un risque qui est défini comme suit « l'assurabilité du risque [...] s'articule autour de quatre idées : le risque assurable est un risque pur, mutualisable, statistiquement prévisible, et sans hasard moral » [DAVID L. et al 1997]. Un risque n'est pas assurable s'il n'y a pas d'aléa. En effet, il est inconcevable d'assurer un risque qui fatalement se réalisera. Le fondement du métier d'assureur est de mutualiser les risques et de payer les sinistres avec les primes versées par tous, sachant qu'une proportion réduite des assurés aura un sinistre. L'estimation du coût pour l'assureur et de la prime de l'assuré repose sur les statistiques issues de la sinistralité existante [FUMEY M. 2001].

2.1.4 Les risques différenciés par domaine d'activité

La nature des risques est différente selon le domaine d'activité de l'entreprise. Le risque peut donc être différencié selon qu'il concerne les produits de l'entreprise, les projets de l'entreprise:

-Les risques produits : sont d'abord ceux qui relèvent de la sûreté de fonctionnement du produit : ils touchent les utilisateurs du produit et son environnement [VOLLOT JL. et al 1996].

-Les risques projets : sont définis comme étant : « la possibilité que se produise un événement, généralement défavorable, ayant des conséquences sur le coût ou le délai d'une opération et qui se traduit mathématiquement par un degré de dispersion des valeurs possibles autour de la valeur probable quantifiant l'événement et une probabilité pour que la valeur finale reste dans les limites de l'acceptable » [COURTOT H. 1998].

2.2 Les risques professionnels

La mécanisation des fabrications, l'utilisation de nombreux produits chimiques, la diversification des produits des entreprises ont accru la fréquence et la gravité des accidents et des maladies ayant pour origine le milieu professionnel. Les risques professionnels font partie des dangers les plus importants qui guettent les hommes de notre époque.

Le risque professionnel peut être défini comme étant : « tout phénomène, tout événement qui apparaît en milieu de travail et qui présente un danger pour l'homme ».

Il existe différents moyens pour regrouper et classer les risques professionnels, [MARGOSSIAN N. 2003] à proposer une classification en fonction de la nature et de l'origine du risque :

2.2.1 Les risques mécaniques

La norme [NF EN 292-16 2004] définit les risques mécaniques comme étant : « l'ensemble des facteurs physiques qui peuvent être à l'origine d'une blessure par l'action mécanique d'éléments de machine, d'outils, de pièces, ou de matériaux solides ou de fluides projetés ».

Les risques mécaniques sont nombreux et variés, ils sont présents partout, dans toutes les activités humaines. Ils ont pour origine les déplacements des corps qui par suite de leurs mouvements, possédant une énergie susceptible d'agresser les hommes. On peut regrouper les risques mécaniques en plusieurs familles, en fonction de la nature des atteintes au corps humain tel que (les risques de choc, les risques d'écrasement, les risques d'entraînement, les risques de coupures /piqûres/ sectionnement, les risques de projection de solides et de liquide...) [MARGOSSIAN N. 2003].

2.2.2 Les risques physiques

Les risques physiques regroupent les risques ayant pour origine des phénomènes physiques variés, souvent très différents les uns des autres et faisant appel à des mesures de prévention distincte.

Les risques physiques peuvent être classés en plusieurs familles, en fonction de la nature des atteintes au corps humain tel que (les risques dus aux vibrations, les risques de surdité, les risques électrique, les risques dus aux rayonnements ionisants, les risques dus aux rayonnements non ionisants...) [MARGOSSIAN N. 2003].

2.2.3 Les risques dus aux manutentions

Les manutentions sont à l'origine de nombreux risques qui se traduisent par des accidents et des maladies professionnels. La manutention peut être définie comme étant : « de petits déplacements d'objets, de produit, de matériaux ou de marchandises, déplacement en hauteur ou en distance ».

Ces opérations de manutentions peuvent être faites manuellement ou au moyen de systèmes, installations et équipements mécanisés, automatisés [MARGOSSIAN N. 2003].

2.2.4 Les risques chimiques

Les risques chimiques constituent une famille particulièrement importante tant au niveau professionnel qu'à celui de l'environnement. Ils ont comme origine la présence de substances et de préparations dangereuses qui conduisent à des intoxications et des incendies- explosions. Dans le domaine des risques professionnels, les produits chimiques interviennent relativement peu dans les accidents de travail, par contre plus de la moitié des maladies professionnelles leurs est due.

Les risques chimiques présentent deux grandes familles de risques tel que (les risques d'intoxication accidentelle ou chronique et les risques d'incendies- explosions dus aux réactions chimiques dangereuses) [MARGOSSIAN N. 2003].

2.2.5 Les risques biologiques

Les risques biologiques sont les infections ayant pour origines les micro-organismes pathogènes rencontrés en milieu de travail. De nombreuses activités professionnelles exposent les salariés aux microbes.

Parmi les risques biologiques, on peut citer les risques sanitaires qui sont susceptible d'atteindre l'homme ou l'environnement.

Le risque sanitaire peut être différencié en fonction du degré d'incertitude scientifique tel que :

- Le risque identifié, dont la preuve est établie (cas du saturnisme ou de l'amiante) ;
 - Le risque controversé, pour lequel le débat scientifique n'a pas encore abouti à un consensus ;
 - Le risque émergent pour lequel le débat scientifique en est à ses prémises
- [MARGOSSIAN N. 2003].

2.2.6 Les risques de transport de matières dangereuses

Le risque Transport de Matières Dangereuses ou risque TMD se caractérise par un risque d'accident ayant des conséquences aggravées par les effets du produit dangereux transporté (incendie, explosion, pollution des eaux ou des sols, etc). Le TMD peut prendre la forme soit :

- le transport de matière dangereuse à l'interne c'est-à-dire dans l'entreprise,
- le transport de matière dangereuse à l'externe concerne essentiellement les voies routières et ferroviaires ainsi que les voies d'eau et les voies aériennes.

Le risque d'accident est accru par le développement des infrastructures de transports, par la hausse de la capacité de transport et l'augmentation de la vitesse. Le transport par voie d'eau se caractérise surtout par des déversements présentant des risques de pollution tels que les marées noires [FUMEY M. 2001].

2.3 Les risques nucléaires

Le risque nucléaire concerne le risque d'accident d'une centrale nucléaire, mais également les pollutions ou contaminations liées au fonctionnement des centrales nucléaires.

La réalisation du risque nucléaire peut entraîner une dégradation de l'environnement se manifestant par une atteinte à la flore (destruction ou pollution), à la faune (mêmes effets que sur l'homme), et aux terres (contamination, produits de consommation pollués, etc.).

L'étude de la typologie des risques est abordée selon différents aspects : les risques de l'entreprise se considère comme des événements aléatoires susceptible d'avoir un impact financier sur le résultat de l'entreprise ; tout ce qui peut affecter le patrimoine ou le personnel de la société et qui ne fait pas partie des événements l'ensemble des aléas qui peuvent survenir dans la vie économique d'une entreprise. Les risques professionnels qui ne se limitent pas seulement aux risques industriels, mais couvrent toutes les situations dangereuses rencontrées dans les activités professionnelles non industrielles. Et enfin les risques nucléaires couvrent l'ensemble des substances naturelles ou artificielles émettant, par suite de désintégration des noyaux de leurs atomes, des rayonnements sous forme de particules ou de rayonnements électromagnétiques [FUMEY M. 2001].

3. Analyse du risque

L'analyse du risque constitue le cœur du processus d'analyse des risques. Dans la terminologie des normes, l'analyse du risque était même parfois considérée comme un processus entier. Bien que menée de diverses façons selon les domaines traités, elle repose toujours sur un processus séquentiel et itératif de même structure [BRENOT J. et al 1994]. Ce processus consiste à intégrer les résultats de l'évaluation des risques avec les données technologiques sociales et économiques, afin de parvenir à une décision [LOUYOT G. 1997]. Ainsi, ces risques couvrent non seulement les accidents à caractère technologiques, mais aussi tous les événements susceptibles de produire un phénomène dangereux. L'analyse des risques techniques était une première tentative pour répondre aux exigences exprimées, afin de résoudre les problèmes techniques. L'analyse du risque basée sur des concepts purement techniques souffre de plusieurs insuffisances. D'où dans une analyse du risque, on doit prendre en considération tous les acteurs susceptibles de produire le risque [AZZABI L. et al 2007].

L'analyse du risque se décompose en différentes étapes :

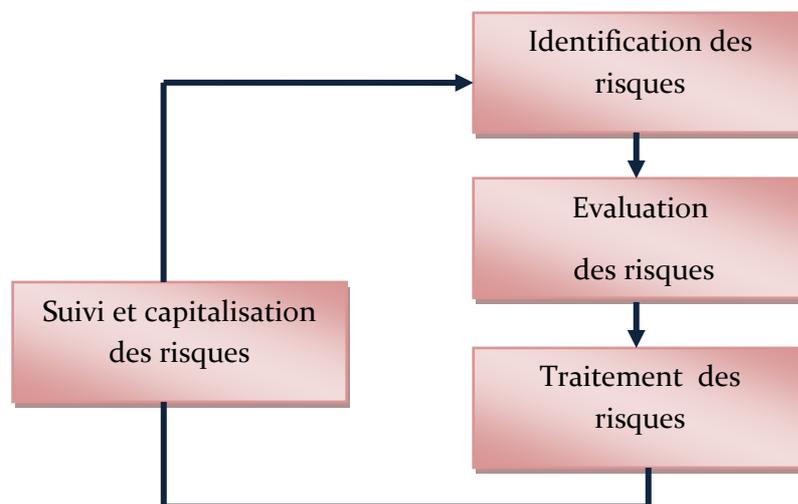


Figure. 25 Les différentes étapes d'analyse du risque.

3.1 Identification des risques

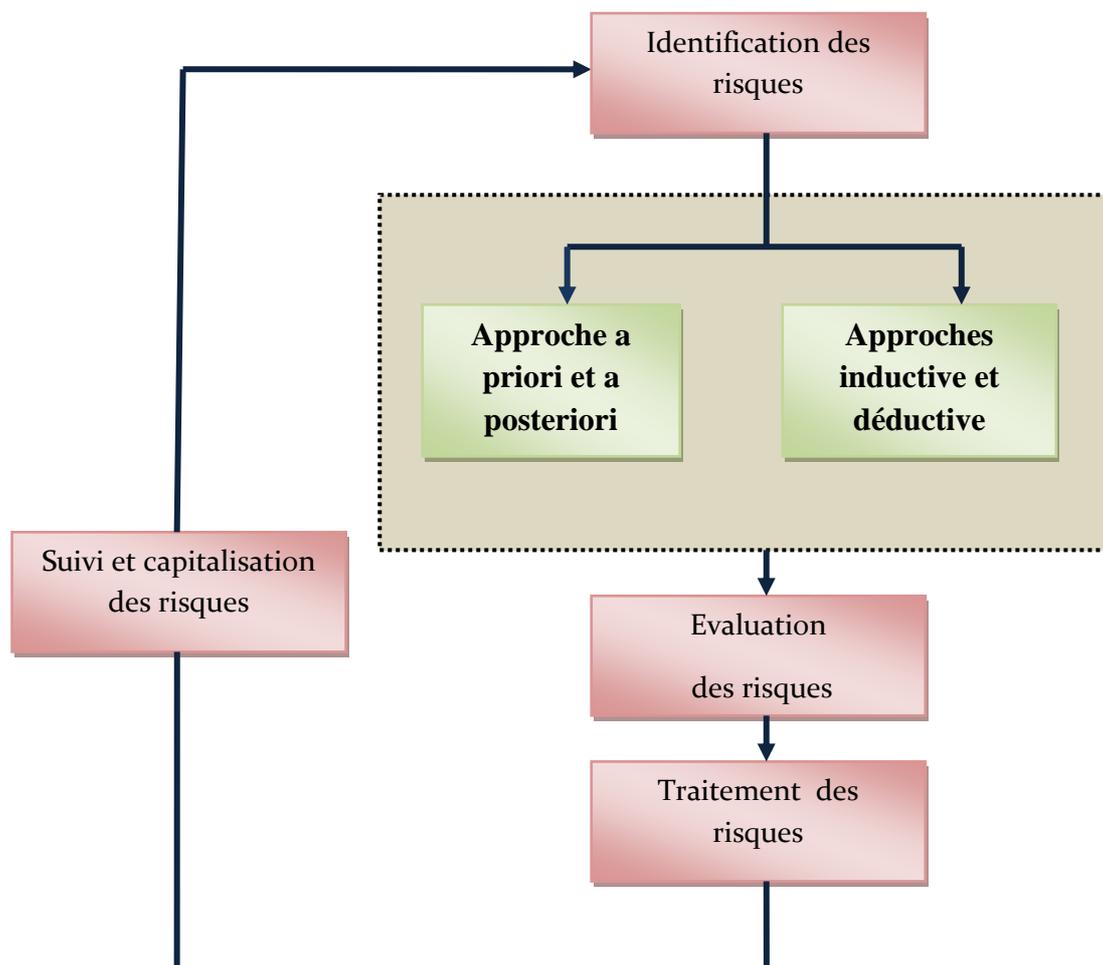


Figure. 26 Identification des risques

L'identification des risques constitue la première phase de l'analyse des risques ; identifier les risques consiste à mettre en évidence les menaces ou vulnérabilités auxquelles l'entité considérée est confrontée, ainsi que les enchaînements des événements pouvant conduire à l'événement non souhaité de plus forte gravité [ABRAMOVICI M. 1996].

Identifier les risques suppose de multiplier, au plus tôt, les "vues" sur l'entité considérée, à travers la détermination de leurs causes et de leurs effets, de façon qu'ils représentent une transition d'un état "cause" vers un état "effet" [LIGERON S A. 1999].

Les techniques utilisées pour l'identification permettent soit de partir de phénomènes dangereux, et d'en déduire des situations et des événements dommageables, soit de partir des

dommages et des événements dommageables et de retrouver les situations puis les phénomènes dangereux. Ainsi, ces techniques peuvent être classées en deux approches :

- **Approche a priori et a posteriori** : Cette approche nécessite de représenter la survenance des risques comme l'aboutissement d'un processus logique sur lequel l'homme peut intervenir [ABRAMOVICI M. 1996]. Les méthodes (a priori et a posteriori) sont complémentaires et leurs utilisations conjointes sont fréquentes ; Les méthodes d'identification a posteriori sont utilisées lors de l'analyse d'accidents. Elles furent les premières employées par la sûreté de fonctionnement : « l'apprentissage par la panne ou par l'accident a été, pendant des millénaires, le premier moyen disponible pour mieux maîtriser la fiabilité et la sécurité » [VILLEMEUR A. 1988]. Elles doivent permettre d'établir les causes de l'accident et rendre ainsi possible des actions de prévention.

L'identification des risques a priori consiste à analyser l'entité considérée par rapport aux conséquences de la survenance d'événements non souhaités initiateurs, afin d'évaluer le risque associé à l'événement non souhaité final [ABRAMOVICI M. 1996].

-**Approches inductive et déductive** : Lors d'une recherche par approche déductive, les risques sont identifiés à partir des effets non souhaités. L'approche déductive peut être menée à l'infini. En pratique, l'analyse est achevée lorsque les configurations causales sont jugées suffisantes. A l'inverse, l'analyse inductive ou descendante est une démarche cause-effet. Cette approche va du particulier au général, de l'observation à la modélisation, des causes vers les conséquences selon un enchaînement d'événements [BENARD A. et al 1994].

3.2 Evaluation des risques

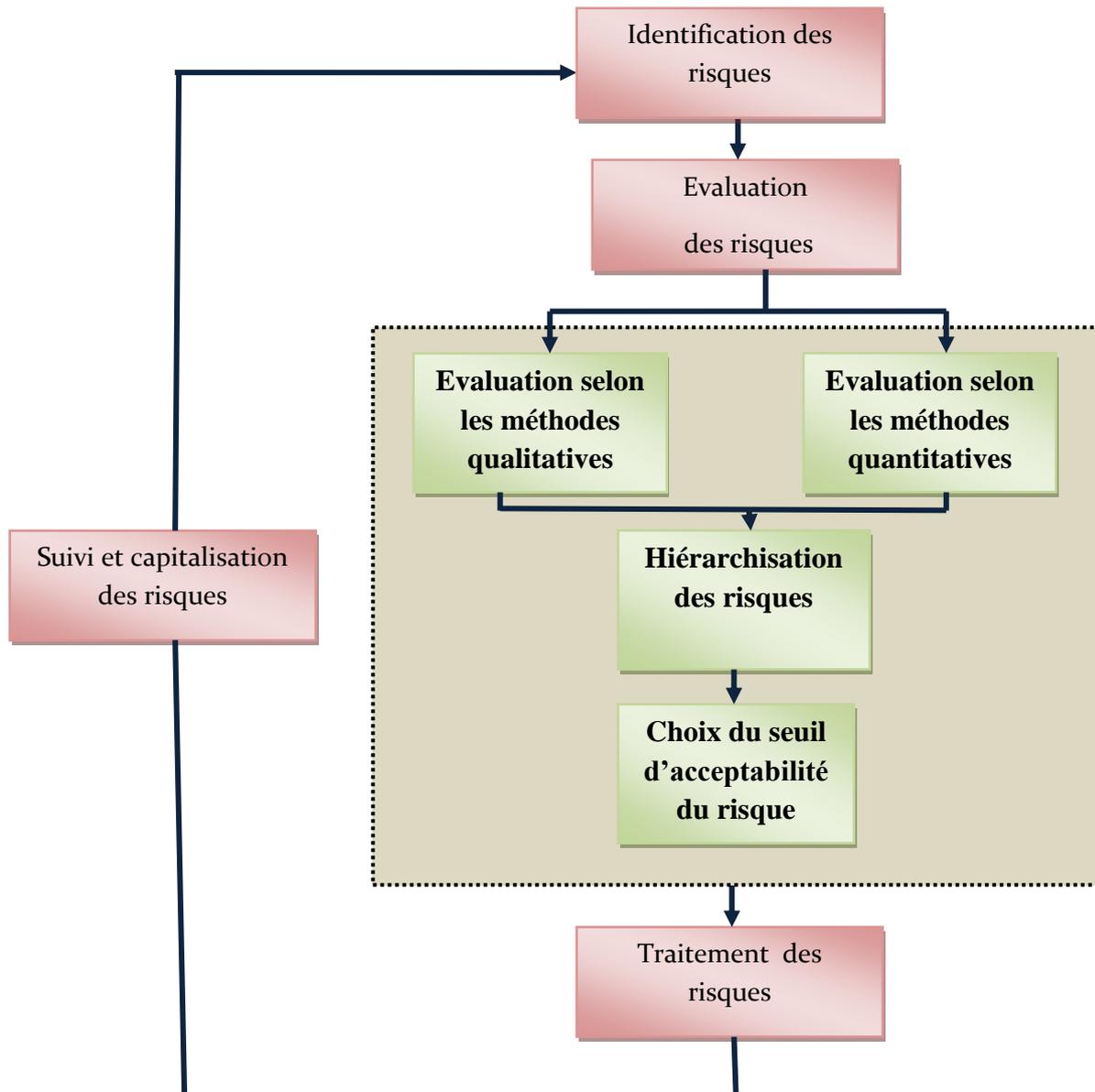


Figure. 27 Evaluation des risques

L'évaluation des risques est la phase fondamentale dans l'analyse des risques. Selon [VILLEMEUR A. 1988], la mesure du risque est définie comme la :« mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences ». Par suite, la mesure de l'occurrence peut correspondre à la probabilité, à la fréquence, mais également au pourcentage, au taux d'apparition de l'événement redouté pour une population donnée. La mesure de l'occurrence s'exprimera par rapport à un nombre

d'actions, d'opérations, de sollicitations, par unité de temps ou pour une distance parcourue. La nature des conséquences est également variée : il pourra s'agir de conséquences physiques, physiologiques, financières,.... Son évaluation s'exprimera en termes de durée d'indisponibilité, de nombre d'objets ou d'individus touchés ou encore de coût des dégâts [POLLET P. 2002].

Le processus d'évaluation des risques varie selon le domaine d'application et la nature des données manipulées. Ce processus se réalise selon quatre étapes :

- **Evaluation selon les méthodes qualitatives :** L'analyse qualitative a pour objectif d'identifier les risques présentant un niveau de gravité important et devant faire l'objet d'une analyse détaillée, à l'aide de méthodes quantitatives. Une étude qualitative est définie comme l'enchaînement des tâches de choix des interviewés, du recueil de l'information et d'analyse et de synthèse de l'information recueillie [FRISCH F. 1999].

- **Evaluation selon les méthodes quantitatives :** La quantification du risque repose sur différents paramètres dont les principaux sont : la mesure d'occurrence ou probabilité d'un événement non souhaité et la mesure de ses conséquences ou gravité. Le risque est restreint à la mesure de gravité ou de sévérité des conséquences de l'événement .La mesure de gravité considère uniquement l'effet, omettant la cause [GARIN H. 1994].

-**hiérarchisation des risques :** Une fois les risques quantifiés selon l'évaluation du danger retenue, les risques sont reportés dans une matrice d'analyse des risques sur laquelle les axes de gravité et probabilité sont divisés en sous ensembles de même valeur. Ils sont ensuite classés (ou hiérarchisés) en fonction des menaces qu'ils représentent. L'ordre établi par la hiérarchisation va conditionner l'ordre de priorité des actions de la phase de traitement des risques [FUMEY M. 2001].

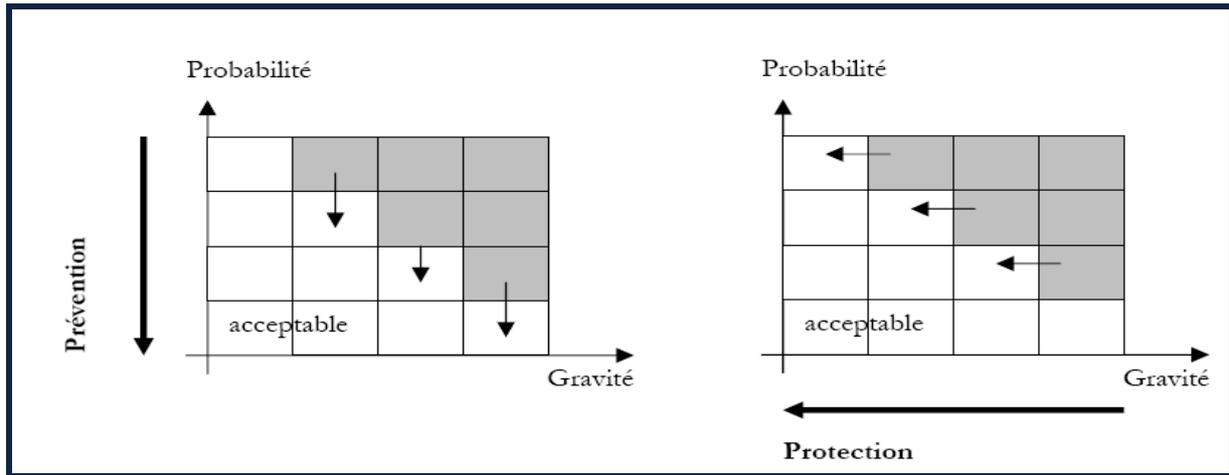


Figure. 28 Matrice de hiérarchisation des risques [FUMEY M. 2001]

- **Choix du seuil d'acceptabilité du risque :** La hiérarchisation des risques aboutit à un classement basé sur différents critères. Ce résultat est utilisé pour juger du niveau de sécurité au regard des objectifs généraux définis au cours de la phase préparatoire.

Ainsi, la difficulté réside dans la définition d'un niveau de sécurité suffisant compte tenu de contingences matérielles et financières pour l'entreprise [FUMEY M. 2001].

3.3 Traitement des risques

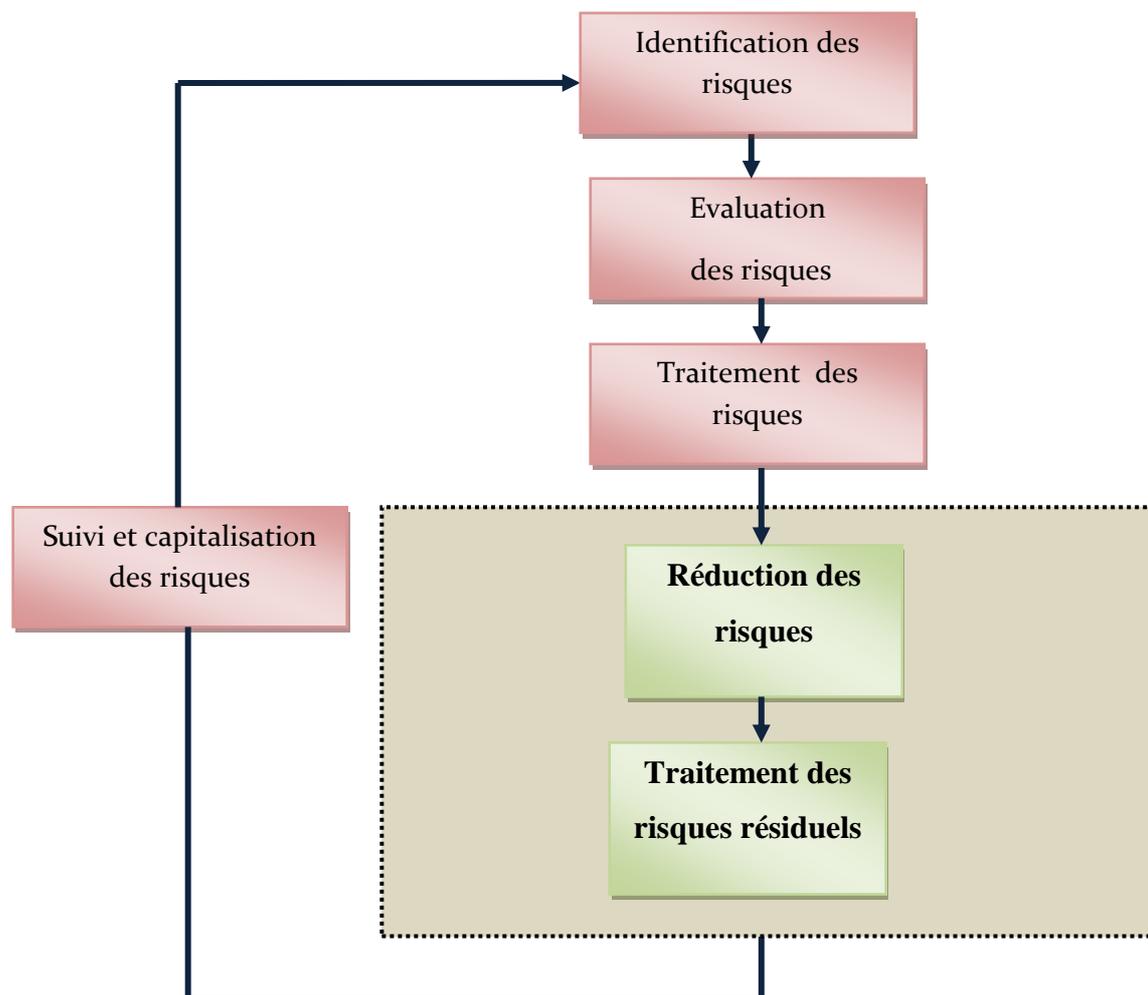


Figure. 29 Traitement des risques

Le traitement des risques est vraisemblablement la phase la plus lourde de responsabilité pour les gestionnaires de risques. L'objectif du traitement des risques est double. Il s'agit d'une part de prévenir et de réduire les risques inacceptables par la mise en place de mesures de prévention ou de protection afin d'atteindre le niveau de sécurité souhaité. D'autre part, il s'agit de traiter les risques résiduels en élaborant des solutions de couverture pour l'entité considérée [FUMEY M. 2001].

Le traitement des risques inacceptables nécessite l'engagement de moyens financiers, humains et techniques. Le processus de traitement se réalise selon deux étapes :

-Réduction des risques : La réduction des risques et de leurs conséquences peut être opérée selon les aspects techniques, organisationnels et juridiques (l'aspect financier étant considéré lors du traitement du risque résiduel). Pour chacun de ces aspects, il convient d'identifier l'ensemble des moyens (prévention, protection, formation, consignes, ...) permettant de ramener les risques à un niveau acceptable et donc supportable [FUMEY M. 2001].

Sur le plan technique, la réduction des risques repose sur la mise en œuvre soit de mesures de prévention visant à réduire la probabilité de survenance d'un risque, soit de mesures de protection visant à diminuer la gravité d'un risque [LOUYOT G. 1997].

Sur le plan organisationnel, la réduction des risques consiste à élaborer différents programmes pour la sécurité et la sûreté de l'entreprise, en fonction de paramètres réglementaires, des risques identifiés et des aspects matériels et humains [COURTOT H. 1998].

Sur le plan juridique, la réduction des conséquences juridiques liées à l'engagement de la responsabilité de l'entreprise ou de ses dirigeants peut se faire selon deux axes, le premier permet de s'assurer du respect des textes réglementaires en vigueur afin de pouvoir apporter à tout moment la preuve du caractère irréprochable du produit ou service ; le deuxième permet de fixer contractuellement des clauses de transfert de risques ou d'abandon de recours sur un cocontractant de l'entreprise (sous-traitant ou fournisseur) [DAVID L. et al 1997].

-Traitement du risque résiduel : L'étape de traitement des risques a abouti à la mise en place de mesures techniques, organisationnelles et juridiques destinées à réduire les risques inacceptables à un niveau plus supportable pour l'entreprise.

En dépit de ces mesures, et partant du constat que le risque nul n'existe pas, l'entreprise demeure sous, la menace du risque résiduel. Les solutions permettant de réduire les effets de ces risques sont : le transfert total ou partiel vers d'autres acteurs économiques ou la conservation par rétention partielle ou totale. Les risques résiduels ne sont pas toujours pris en compte. Ils peuvent être ignorés ou connus mais considérés comme secondaires [BENARD A. et al 1994].

3.4 Suivi et capitalisation des risques

La phase de suivi et de capitalisation traite essentiellement le suivi rigoureux de mise en œuvre des mesures de réductions réalisées au niveau de la phase précédente (traitement des risques) [GARIN H. 1994].

Ainsi, le suivi des mesures de réductions des risques comprend l'analyse des résultats obtenus, l'évaluation des risques diminués et la documentation associée tel que la capitalisation des connaissances sous différentes méthodes et techniques regroupées sous les vocables mémoire d'entreprise, retour d'expérience, management de la technologie, bases de données techniques... [BES M P. 1998].

4. Méthode d'analyse et d'évaluation du risque

Les méthodes d'analyse des risques connaissent un fort développement en nombre, ainsi qu'une spécialisation en fonction de leurs domaines d'application. Le domaine industriel est le plus riche en méthodes de diagnostic, appelé « technique de sûreté de fonctionnement des systèmes industriels », c'est l'étude de la fiabilité, de la sécurité... d'un système donné.

Ces techniques ont principalement été développées dans le domaine du nucléaire, de l'aéronautique, de l'industrie chimique...en d'autres termes, ce sont les industries où les moindres dysfonctionnements ou pannes non prévus peuvent être fatale.

Pour répondre à l'objectif de sûreté de fonctionnement, ces techniques sont appliquées selon le besoin, soit dès la phase de conception puis complétées jusqu'à la fin de vie d'installation, soit encours de la vie d'installation, vu l'importance des conséquences d'un dysfonctionnement, ou d'une panne dans de tel système, donc il faut prévoir dès la conception, le maximum de moyen de sécurité et de réparation, pour répondre aux différents modes de défaillances.

4.1 Méthode d'analyse du système en fonctionnement normale

Les méthodes d'analyse en fonctionnement normal ont généralement pour objet de décrire et de comprendre le système, à la fois sous l'angle structural (frontière de système, principaux sous-systèmes, leurs frontières, leurs interactions et enfin les entrées et les sorties), et sous l'angle fonctionnel (mission globale, fonctions secondaires ainsi que les fonctions annexes, les interactions fonctionnelles, les variables et leurs interactions) [FADIER E. 1990].

Parmi les méthodes d'analyse en fonctionnement normal, tel que:

4.1.1 Méthode de diagramme bloc

La méthode du diagramme bloc permet de décrire un système complexe, en mettant en évidence : au plan fonctionnel, la mission du système, les différentes fonctions, leurs niveaux et leurs interactions ; au plan structural, les frontières du système, les entrées et les sorties, les principaux sous-systèmes et leurs liaisons.

Le principe de la méthode diagramme bloc consiste à représenter graphiquement le système et ses principaux composants, en partant du système global et arrivant aux composants élémentaires par affinements successifs. Pour ce faire, les différentes structures identifiées sont représentées par des « blocs » et leurs interactions par des flèches.

La première étape permet de délimiter les frontières du système et ne s'intéresser qu'aux entrées et sorties sous forme d'une boîte noire.

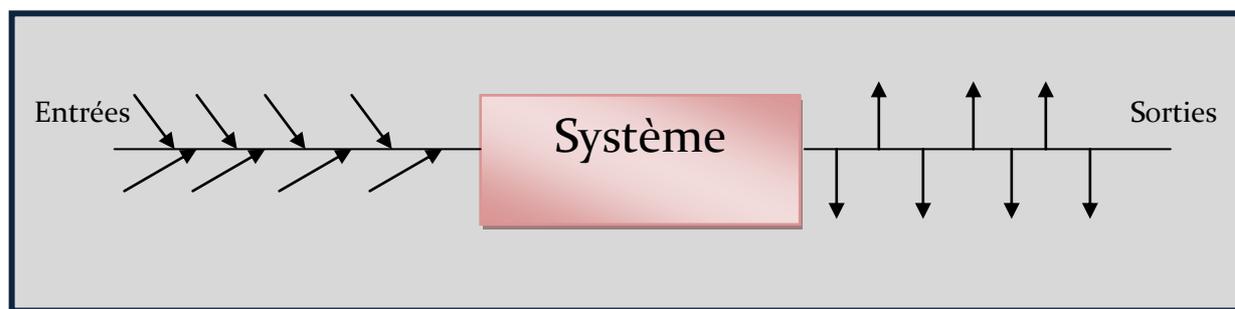


Figure. 30 Système en boîte noire [FADIER E. 1990]

La deuxième étape met l'accent sur les principaux sous systèmes ainsi que leurs principales interactions.

Cette méthode a pour intérêt :

- D'amener rapidement une bonne connaissance de la structure du système analysé (entrées, sorties, frontières, sous-systèmes, composants et leurs interactions) ;
- De décrire à partir des analyses structurales, le système sous forme de diagrammes fonctionnels qui serviront de base pour l'analyse des dysfonctionnements ;
- De concrétiser un bon outil de dialogue entre les différents intervenants [FADIER E. 1990].

4.1.2 Méthode de graphe de fluence

La méthode de graphe de fluence permet de décrire un système à partir des variables et leurs interactions et identifier les interfaces homme-système.

Le principe de la méthode graphe de fluence consiste à une représentation graphique des variables du système et de leurs interactions. En partant d'une variable, il cherche à identifier ses interactions pour remonter au niveau du système global et établit son schéma fonctionnel.

Le graphe de fluence est un diagramme distinguant les variables simples et les variables complexes appelées aussi « variables clés ». Les liaisons causales reliant les variables sont représentées par des flèches [FADIER E. 1990].

4.2 Méthode d'analyse du système en fonctionnement dégradé

Les méthodes d'analyse en fonctionnement dégradé ont pour objectif de connaître d'une part les modes de fonctionnement dégradé du système, c'est-à-dire identifier les différentes configurations qui peuvent affecter sa mission, son intégrité, sa performance et son environnement ; d'autre part, d'éliminer ou encore de réduire la fréquence d'apparition de ces défaillances, ainsi que l'ampleur de leurs conséquences [FADIER E. 1990].

4.2.1 Méthode d'analyse préliminaire des dangers(APD)

La méthode analyse préliminaire des dangers consiste à dialoguer avec des spécialistes du métier ou des utilisateurs, pour identifier les principaux événements redoutés.

C'est une méthode participative au sein de groupes de travail. Il est possible de faire cette analyse très tôt dans le processus de développement. Les deux principaux objectifs de cette méthode sont d'identifier les dangers d'un système industriel et d'évaluer leurs gravités [HAMMER W. 1972].

L'application de la méthode analyse préliminaire des risques consiste à déterminer les caractéristiques des dangers et leurs causes qui sont : les entités dangereuses, les situations dangereuses, les accidents potentiels. Ainsi, l'entité dangereuse doit être soumise à certains événements ou conditions pour entraîner une situation dangereuse, celle-ci doit être associée à un événement ou condition supplémentaire pour se transformer en accident potentiel [LAMBERT H. 1975].

Les résultats de l'analyse sont présentés dans le tableau suivant :

1. système ou fonction	
2. phase	
3. entités dangereuses	
4. événement causant une situation dangereuse	
5. situation dangereuse	
6. événement causant un accident potentiel	
7. accident potentiel	
8. effets ou conséquences	
9. classification par gravité	
10. mesures préventives	
11. application de ces mesures	

Tableau. 1 Grille d'analyse pour l'analyse préliminaire des risques

4.2.2 Méthode d'Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets (AMDE)

L'AMDE est une méthode d'analyse inductive et rigoureuse ayant pour buts d'identifier les défaillances dont les conséquences peuvent affecter le fonctionnement d'un système, de les hiérarchiser selon leurs niveaux de criticité afin de les maîtriser [CABEAU E. 1999].

Cette méthode permet l'évaluation des effets de chaque mode de défaillances ; ainsi que, l'identification des modes de défaillances ayant d'important effet sur la disponibilité, la maintenabilité ou la sécurité des systèmes.

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

L'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) est une extension de l'AMDE. Elle se compose d'une AMDE et d'une analyse de criticité qui permet d'évaluer la gravité des différents modes de défaillance. La criticité est appréciée en tenant compte de la gravité et de la probabilité du mode de défaillance. On définit, généralement, la gravité et la probabilité par une appartenance à une classe de criticité. Le classement des modes de défaillances peut être présenté dans une grille [VILLEMEUR A. 1988].

Probabilité \ Gravité	Très faible	Faible	Moyenne	Forte
Effets mineurs				
Effets significatifs				
Effets critiques				
Effets catastrophiques				

Tableau. 2 Grille d'évaluation de la criticité

L'AMDEC est une méthode relativement simple et facilement accessible ; C'est un outil très puissant, au domaine d'application très large, qui peut être mis en œuvre aussi bien en conception qu'en exploitation. Il offre une analyse systématique et un maximum de garantie d'exhaustivité [PAPADOPOULOS Y. et al 2004].

4.2.3 Méthode d'Analyse des Effets des Erreurs de Logiciels (AEEL)

La méthode analyse des effets des erreurs de logiciel est une méthode prévisionnelle issue de la méthode AMDEC. Le but de cette méthode est de mettre en évidence des points critiques relevés durant les phases de développement d'un logiciel, et de proposer aux personnes chargées des tests de validation, une synthèse de la criticité des modules du logiciel analysé, afin d'affiner leur démarche. Le principe de l'AEEL est d'envisager les opportunités d'erreurs dans des logiciels, puis d'examiner les conséquences de ces erreurs sur tous les modules [DUCEPT O. et al 2002].

4.2.4 Méthode de diagramme de succès (MDS)

Un diagramme de succès est une représentation des dépendances de fiabilité entre les différents composants d'un système. Cette méthode est utilisée pour évaluer les possibilités voire la probabilité de défaillance d'un système. Un diagramme de succès est composé :

- de blocs, qui représentent les composants du système,
- de nœuds, qui définissent la structure du système puisqu'ils correspondent aux relations entre les composants.

La méthode de diagramme de succès présente les aspects d'une méthode de recherche de défaillance d'une part, et d'un moyen de représentation des fonctions et des défaillances d'autres part. Elle est basée sur un calcul de probabilité permettant de calculer la fiabilité (R) du système, sont taux de défaillance (A), et le MTTF (durée moyenne de fonctionnement d'une entité avec la première défaillance).

La méthode de diagramme de succès est utilisée lorsqu'une analyse détaillée des causes de défaillances (et de leurs combinaisons) n'est pas requise et lorsqu'il y a indépendance entre les défaillances et (les réparations) des composants.

Il s'agit d'un graphe unidirectionnel orienté de gauche à droite. S'il existe au moins un chemin qui permet à partir du nœud situé le plus à gauche d'arriver au nœud final situé le plus

à droite sans passer par des blocs défaillants, alors la mission du système sera remplie. [VILLEMEUR A. 1988].

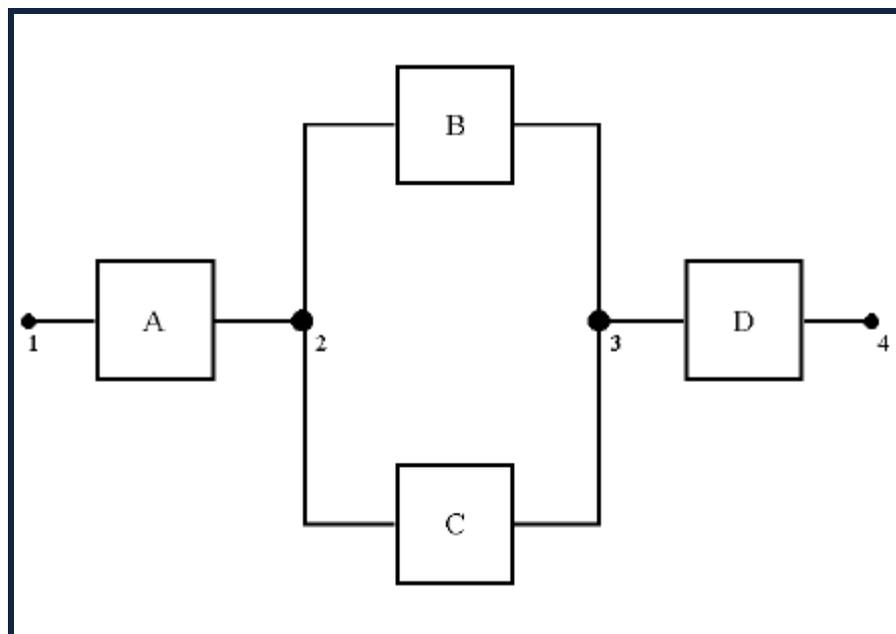


Figure. 31 Graphe de succès [VILLEMEUR A. 1988]

4.2.5 Méthode d'arbre de défaillance (AD)

L'arbre de défaillance part d'un accident qui s'est produit et décrit les enchaînements de causes (défaillances, circonstances, actions, fonctionnements normaux...) qui se sont combinés ce jour-là pour créer l'accident ; c'est une méthode particulièrement utilisée dans l'analyse des accidents du travail.

Ainsi, l'arbre de défaillance représente graphiquement les combinaisons d'événements qui conduisent à la réalisation d'un événement unique, ce dernier constitue l'événement de tête de l'arbre et est, la plupart du temps, un événement indésirable pour le système étudié.

L'arbre de défaillance est formé de niveau successif d'événements tels que, chaque événement est généré à partir des événements du niveau inférieur par l'intermédiaire de divers opérateurs logiques. Ces événements sont généralement des défauts associés à des défaillances de matériels, des erreurs humaines, des défauts de logiciels...pouvant conduire à l'événement indésirable [AYADI D. et al 2008a].

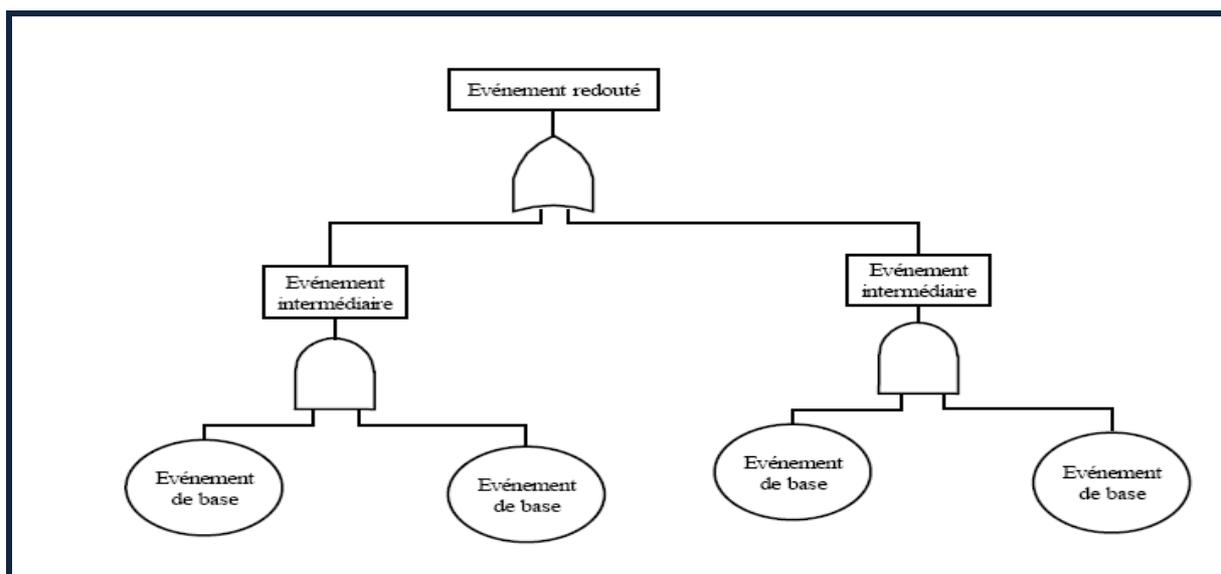


Figure. 32 Arbre des causes ou arbre de défaillance

La méthode arbre des causes ou arbre de défaillances est une méthode permettant une analyse qualitative, par l'identification des coupes minimales, mais également une analyse quantitative, par l'évaluation des probabilités d'occurrence de l'événement redouté.[BERNHARD K. et al 2007].

4.2.6 Méthode de table de vérité (MTV)

La méthode de la table de vérité nécessite l'étude de toutes les combinaisons d'états de fonctionnement et de panne des composants. La méthode de la table de vérité obtenue peut faire l'objet d'une réduction de nature booléenne, on obtient ainsi les combinaisons pertinentes. Cependant, la méthode de la table de vérité n'est plus applicable dès que le nombre de composants est grand [VILLEMEUR A. 1988].

4.2.7 Méthode de combinaison de pannes résumées (MCPR)

La méthode des combinaisons de pannes résumées est justement une méthode permettant de déterminer de manière inductive de telles combinaisons de défaillances, débutant par l'AMDE et se poursuivant par le regroupement des pannes et de leurs combinaisons jusqu'à l'obtention de tous les fonctionnements anormaux des systèmes à analyser ; elle se présente ainsi comme une extension et une généralisation de l'AMDE.

La MCPR, est une méthode purement inductive, analyse en premier lieu les effets des modes de défaillances des composants puis étudie les combinaisons de ces modes de défaillances afin de définir des ensembles de pannes correspondant à des fonctionnements anormaux ou à des événements indésirables pour les systèmes à analyser. La MCPR s'attache donc à extraire seulement les combinaisons significatives sur le plan de la sécurité et se présente alors comme une extension de l'AMDE.

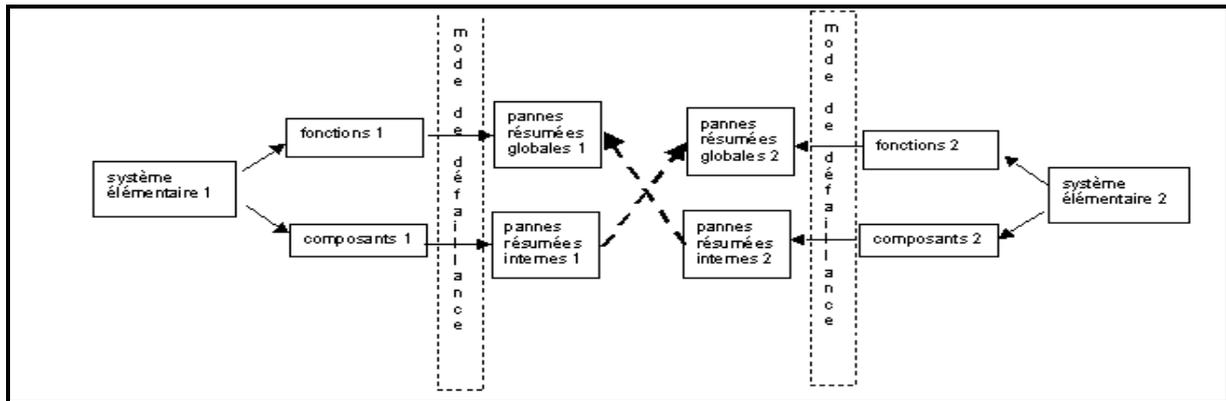


Figure. 33 Démarche de la MCPR

4.2.8 Méthode de l'arbre des conséquences (MACQ)

La méthode de l'arbre des conséquences est une méthode inductive permettant d'élaborer et d'évaluer des séquences d'événements. Elle a surtout été utilisée pour étudier de manière probabiliste les scénarios d'accidents. Cette méthode est généralement employée en liaison avec la méthode de l'arbre de défaillance.

La méthode de l'arbre des conséquences peut être envisagée à partir d'une démarche déductive ou une démarche inductive.

- la démarche déductive est habituellement employée pour l'analyse des séquences accidentelles, les différentes étapes de cette démarche déductive sont représentées comme suit :

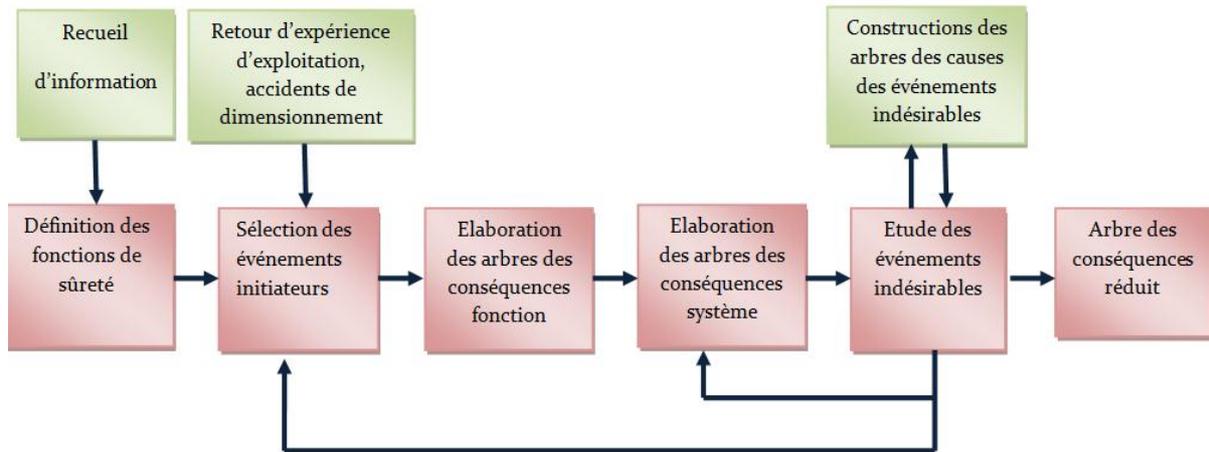


Figure. 34 Elaboration d'un arbre des conséquences selon la démarche déductive

-la démarche inductive est envisageable dans le cadre d'une analyse inductive basée sur la méthode des combinaisons de pannes résumées, les différentes étapes de cette démarche déductive sont représentées comme suit .

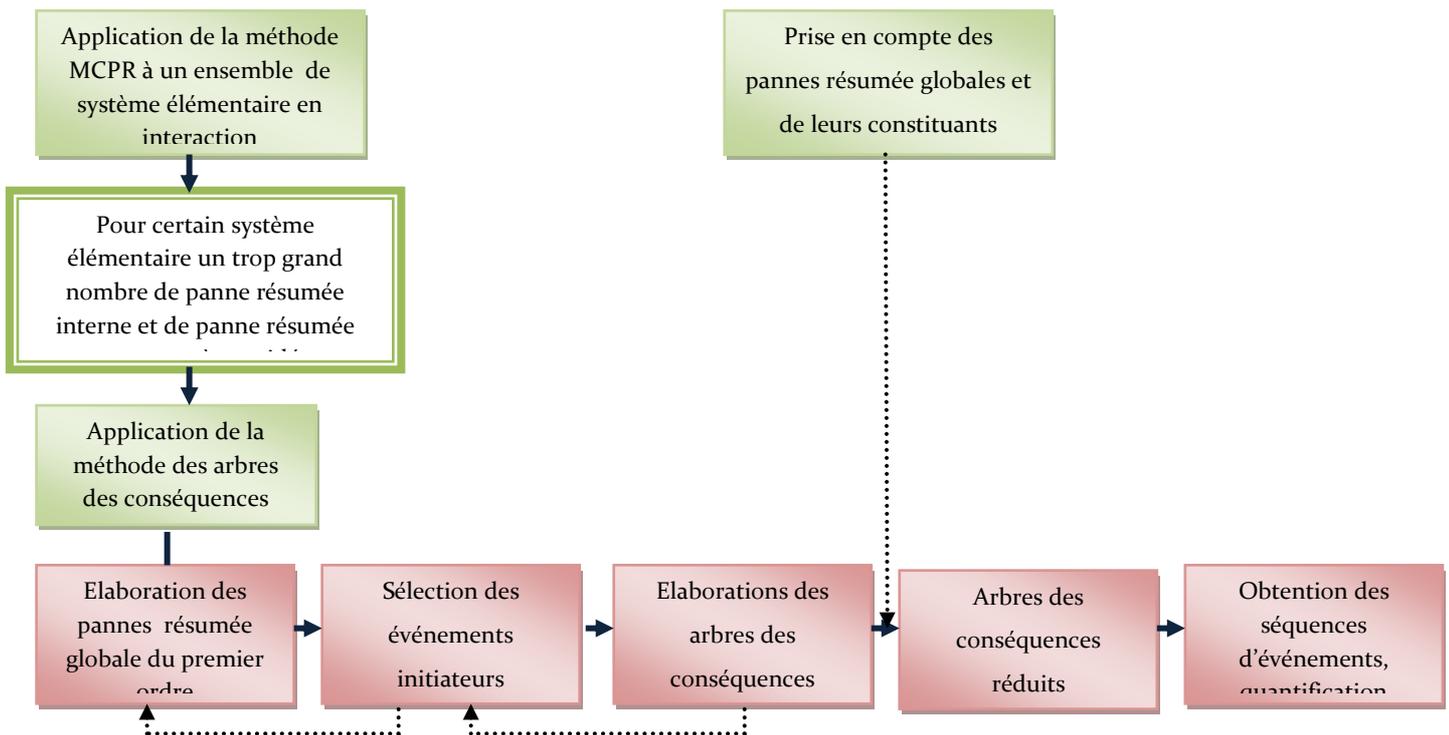


Figure. 35 Elaboration d'un arbre des conséquences selon la démarche inductive

Une fois l'événement initiateur et les événements génériques sont définis, la méthode de l'arbre des conséquences consiste à combiner tous les états possibles de ces événements pour en étudier les conséquences [VILLEMEUR A. 1988].

4.2.9 Méthode de diagramme causes-conséquences (MDCC)

La méthode du diagramme causes- conséquences est une combinaison, d'une part de l'analyse déductive de l'arbre des causes et, d'autre part, de l'analyse inductive de l'arbre des conséquences. La représentation de l'analyse utilise les symboles spécifiques à cette méthode ; on distingue généralement deux parties dans un diagramme causes-conséquences :

-Une partie « causes » représentant les causes d'un ou de plusieurs événements « sommets » des arbres des causes ;

-Une partie « conséquences » représentant l'étendue des conséquences envisageables lorsque se réalisent les événements « sommets », en tenant compte des diverses conditions de fonctionnement ou de défaillance de composant, ou de sous système.

La méthode du diagramme causes- conséquences permet l'analyse de tout événement de tout système quelles que soient sa nature et son importance, ceci et surtout pour les systèmes d'ampleur limitée, dont les fonctionnements anormaux ne sont pas tous identifiés, et qui présente des fonctionnements séquentiels [VILLEMEUR A. 1988].

4.2.10 Méthode de l'espace des états (MEE)

La Méthode de l'espace des états permet quant à elle de tenir compte de l'évolution temporelle des composants. De ce fait, elle est par excellence dédiée aux systèmes à composants réparables. Elle possède des états de fonctionnements capables d'identifier les états où la fonction du système est réalisée, des composants du système pouvant être en panne ; et des états de pannes capables d'identifier les états où la fonction du système n'est plus réalisée, un ou plusieurs composants du système étant en panne.

La Méthode de l'espace des états repose sur l'élaboration d'un graphe dont les places correspondent aux états du système et les arcs correspondent aux transitions entre ces différents états.

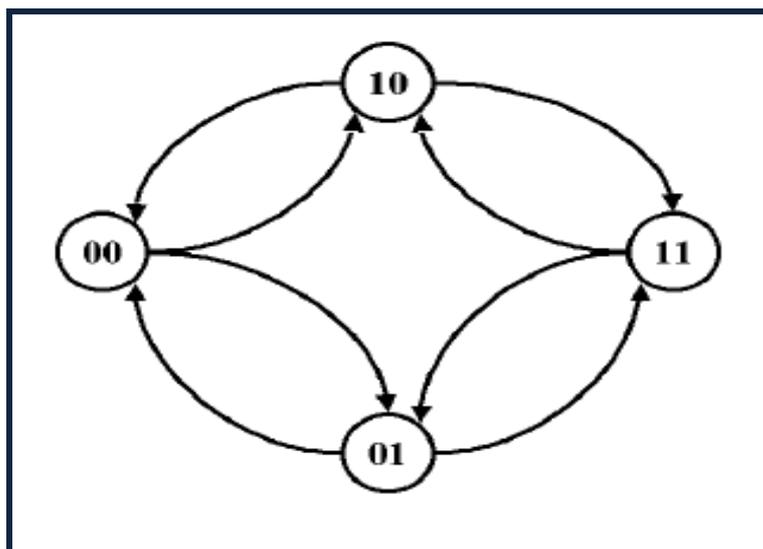


Figure. 36 Graphe d'états pour un système de deux composants

Le fonctionnement d'un système constitué de n composants peut être décrit par un processus $X(t)$ à valeur dans $\{0,1\}^n$ représentant à l'instant t , l'état de marche ou de panne de chacun des composants.

$$X(t) = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

La composante x_i désigne l'état du composant i (0 : en panne, 1 : en état de marche).

La méthode de l'espace des états est dans un premier temps un bon outil de modélisation des processus dynamiques. Elle autorise donc la prise en compte des réparations des composants ou tout autre changement d'état. C'est une méthode qui permet de répertorier l'exhaustivité des états d'un système. Mais cet avantage devient rapidement un handicap lors de l'évaluation quantitative. En effet, à un système comportant n composants binaires – admettant deux états – on associera un graphe de 2^n états. Rapidement cette explosion combinatoire devient critique [LEROY A. et al 1992].

4.3 Méthode d'analyse du système de conception et suivi de projet

Les méthodes d'analyses systémiques de conception et suivi de projets appelée aussi méthodes organisationnelles, permettent d'envisager l'ensemble d'un projet de conception au plan technique comme au plan organisationnel.

Ces méthodes sont faites pour structurer un projet global comme pour assurer un support de communication entre les différents types d'acteurs engagés :

- Guider l'analyste,
- Comprendre le système en cours d'étude, à long terme, dans les différentes étapes de la conception,
- Communiquer dans un même système de description pour avoir un langage commun,
- Diagnostiquer des problèmes à tous les niveaux,
- Définir les besoins et spécifier,
- Documenter, servir d'historique.

4.3.1 Structured Analysis Design Technique (SADT)

La méthode SADT (Structured Analysis Design Technic) est une méthode d'analyse hiérarchique et descendante, fondée sur un formalisme graphique et textuel facile à apprendre. Elle permet d'une part de **modéliser** le problème posé (informatique, automatique ou autre), avant de chercher à en extraire une solution, et d'autre part d'assurer une **communication** efficace entre les différents intervenants concernés par le système à analyser.

La méthode SADT est à l'origine conçue pour s'appliquer à des systèmes automatisés. Elle est cependant suffisamment générale pour être appliquée à des logiciels bien spécifiés.

Le « langage » SADT est composé de diagrammes (datagrammes et actigrammes) obtenus par raffinements successifs et organisés en hiérarchie. [DE MARCOT T. 1979].

-Les actigrammes : Un actigramme est identifié par un *verbe d'action*, il gère des données désignées par des *noms* à partir de directives de contrôle (désignés par des *noms* aussi) en s'appuyant sur les potentialités des mécanismes. Il génère des données en sortie par création ou par modifications des données en entrée.

-Les datagrammes : Un datagramme représente des données créées par des activités Génératrices (en entrée) et consommées par des activités Utilisatrices (en sortie), sous le contrôle d'activité de contrôle. Pour une donnée, les mécanismes expriment le support de stockage (physique ou logique) de la donnée.

Plusieurs modèles SADT correspondant à différents points de vue du système sont souvent établis pour une meilleure compréhension. En particulier, la perception d'un système n'est pas la même pour l'utilisateur, le concepteur ou le programmeur. De la même manière, plusieurs modèles SADT différents peuvent être conçus pour répondre à une même demande [LISSANDRE M. 1990].

4.3.2 Méthode MERISE

MERISE est une méthode de conception, de développement et de réalisation de projets informatiques. Le but de cette méthode est d'arriver à concevoir un système d'information. La méthode MERISE est basée sur la séparation des données et des traitements à effectuer en plusieurs modèles conceptuels et physiques. La séparation des données et des traitements assure une longévité au modèle. En effet, l'agencement des données n'a pas à être souvent remanié, tandis que les traitements le sont plus fréquemment.

La méthode MERISE conçoit le système d'information comme un « objet artificiel » intermédiaire entre le système opérant et le système de pilotage, et comme un objet qui doit contenir la dynamique de ces deux derniers systèmes. Elle permet ainsi, de séparer dans un système, les données et les traitements relatifs à ces données, et de structurer en trois niveaux la description formelle d'un système d'information.

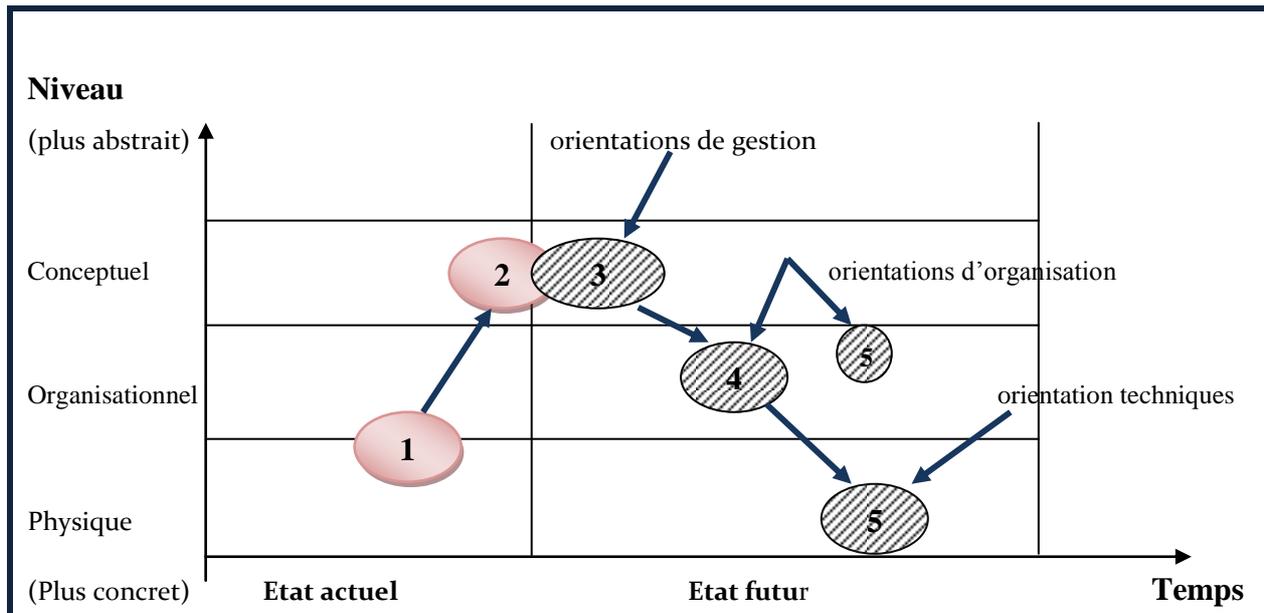


Figure. 37 Structuration des données de traitement selon la méthode MERISE

-**Niveau conceptuel** : c'est le niveau 1, il est utilisé pour le modèle conceptuel de traitement (MCT) et le modèle conceptuel des données (MCD) ;

-**Niveau organisationnel** : c'est le niveau 2, il est utilisé pour le modèle organisationnel de traitement (MOT) et le modèle organisationnel des données (MOD) ;

- **Niveau physique** : c'est le niveau 3, il est utilisé pour le modèle physique de traitement (MPT) et le modèle physique des données (MPD).

La méthode MERISE permet de décrire et de définir des objets concrets ou abstraits ; des associations entre ces objets et des propriétés qui caractérisent individu et relation [PIERREVAL H. 1990].

Conclusion

L'incertitude est une donnée intrinsèque à la vie de toute organisation. Aussi l'un des principaux défis pour la direction réside dans la détermination d'un degré d'incertitude acceptable afin d'optimiser la création de valeur, objectif considéré comme le postulat de base dans le concept de management des risques. L'incertitude est source de risques et d'opportunités, susceptibles de créer ou de détruire de la valeur. Le management des risques offre la possibilité d'apporter une réponse efficace aux risques et à l'opportunité associée aux incertitudes.

Le risque quelque soit sa nature et ou son origine est ainsi au cœur des préoccupations de la société et des entreprises. La maîtrise des risques est indispensable au développement du capital est fait confiance entre l'entreprise et les acteurs de la vie économique et sociale. Face à ces mutations, il est nécessaire d'intégrer la gestion des risques aux processus de management de la qualité au sein de l'entreprise.

Par suite, les discours sur les risques ont toujours tendance à proliférer, en même temps que la discipline du management des risques industriels s'institutionnalise. A chaque catastrophe reviennent les débats entre divers champs dont on a d'ailleurs de plus en plus de mal à cerner les contours, de ceux qui prônent une application du principe de précaution sans que l'on sache nécessairement tout à fait comment l'opérationnaliser, aux autres qui défendent l'argument selon lequel « le risque de zéro défaut n'existe pas ».

Ce chapitre a présenté la problématique du risque ainsi que sa typologie, dans le contexte du management de la qualité. L'analyse du risque doit être effectuée selon une méthodologie et s'appuyer sur des méthodes de sûreté de fonctionnement.

Le chapitre suivant s'attachera à présenter l'aide à la décision face aux risques, tous en tenant compte des différentes approches d'aide à la décision adoptées et plus particulièrement l'approche multicritère d'aide à la décision.

Chapitre 3:

LA DECISION MULTICRITERE

Sommaire

INTRODUCTION	96
1. Aide à la décision	96
1.1. Définition de l'aide à la décision	96
1.2. La problématique de la décision	98
1.3. Le processus de décision	101
1.4. Démarche de modélisation	102
2. Analyse multicritère d'aide à la décision.....	103
2.1. Définition de l'aide multicritère à la décision	103
2.2. Contexte et cadre de l'aide multicritère à la décision.....	106
2.3. Démarche de l'aide multicritère à la décision	107
3. Les méthodes de l'analyse multicritère d'aide à la décision ...	110
3.1. Les méthodes de l'approche unique de synthèse	110
3.1.1 Technique for order preference by similarly to ideal solution (TOPSIS) ...	110
3.1.2 Simple multi-attribute rating technique (SMART)	113
3.1.3 Multiple Attribute Value Theory (MAVT).....	113
3.1.4 Multiple Attribute Utility Theory (MAUT)	115
3.1.5 Utility Theory Additive (UTA)	116
3.1.6 Analytic Hierarchy Process (AHP).....	117

3.1.7 La méthode EVAMIX	120
3.2. Les méthodes de surclassement de synthèse	120
3.2.1 Les méthodes PROMETHEE	121
3.2.2 Les méthodes ELECTRE	125
3.2.3 Les méthodes basées sur la fiabilité (MACBETH)	129
3.3. Les méthodes interactives	132
3.4. Procédure de choix d'une méthode d'aide à la décision multicritère	133
3.4.1 Caractérisation des inputs.....	134
3.4.2 Caractérisation des outputs	135
3.4.3 Caractérisation des méthodes d'aides à la décision multicritère selon les inputs et les outputs	136
4. Les méthodes d'optimisation mathématiques multicritères ...	137
4.1. La méthode de critère globale	137
4.2. La programmation mathématique à objectifs multiples	138
4.3. ϵ - Constraint Method.....	138
4.4. Le compromise programming(CP)	139
4.5. Le goal programming(GP).....	139
4.5.1 Le goal programming pondéré	141
4.5.2 Le goal programming lexicographique	141
4.5.3 Le goal programming minmax	142
4.5.4 Le goal programming incluant des fonctions de satisfactions	143
4.5.5 Le goal programming avec intervalle	146
4.5.6 Le goal programming flou	148
4.5.7 Le goal programming interactive	149
4.6. Procédure de choix d'une méthode d'optimisation mathématique ...	150

5. Critiques des méthodes d'aides à la décision multicritères et d'optimisation mathématique multicritère	150
5.1. Avantages et inconvénients des méthodes d'aides à la décision multicritère	151
5.2. Avantages et inconvénients des méthodes d'optimisation mathématique multicritère.....	153
5.3. Comparaison entre des méthodes d'aides à la décision multicritère et les d'optimisation mathématique multicritère.....	154
CONCLUSION.....	155

Introduction

Le comportement face au risque a fait l'objet de nombreuses recherches se référant à divers ancrages théoriques relevant des théories managériales, psychologiques, sociologiques ou encore anthropologiques. L'intérêt croissant pour cet objet d'étude tant de la part des praticiens que des chercheurs se justifie entre autres par la valorisation accrue du comportement risqué dans les économies occidentales considéré le plus souvent comme associé à des rendements élevés [**RAUFASTE É. et al 1999**].

Bien que le degré de risque assumé (comportement) soit plus ou moins élevé en fonction du degré de risque perçu, le comportement ou encore la prise de décision face au risque ne reflète pas systématiquement la perception du risque [**STELA R. et al 2007**].

On présente, dans ce chapitre, un panorama des méthodes d'analyse d'aide à la décision, et plus particulièrement les méthodes d'agrégation multicritère les plus utilisées pour l'aide à la décision face aux risques.

1. Aide à la décision

Il est courant, dans une étude d'aide à la décision, de devoir tenir compte de plusieurs points de vue pour comparer l'attractivité relative des différentes actions susceptibles de résoudre le problème de décision considéré.

L'aide à la décision utilise des techniques et des méthodologies issues du domaine des mathématiques appliquées telles que l'optimisation, les statistiques, la théorie de la décision ainsi que des théories de domaines moins formels telles que l'analyse des organisations et les sciences cognitives.

1.1 Définition de l'aide à la décision

[**ROY B. 1990 a**] définit l'aide à la décision comme : « l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à prescrire, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution

du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part. »

Ainsi définie, l'aide à la décision ne relève que de façon très partielle de la recherche d'une vérité. Les théories ou, plus simplement, les méthodologies, les concepts, les modèles, les techniques sur lesquels elle s'appuie ont, le plus souvent, une ambition différente : raisonner le changement que prépare un processus de décision de façon à accroître sa cohérence avec les objectifs et le système de valeurs de celui pour qui ou au nom de qui l'aide à la décision s'exerce [CHAKHAR S. 2006].

En effet, [MARTEL JJ. 1998] soutient le fait qu'une activité d'aide à la décision "implique un minimum d'insertion dans le processus de décision : elle se fait essentiellement avec les acteurs du processus dans l'établissement d'une véritable relation d'aide". Pour [ROY B. 1992], un problème de décision n'est pas un objet qui préexiste ; La formulation qu'on en donne ne peut pas, en général, être totalement objective et ne peut être envisagée indépendamment des rapports entre l'individu et la réalité. Il ajoute qu'il est normal que cette formulation évolue au fur et à mesure de l'avancement dans le processus de décision.

Dans ce sens, [LANDRY M. 1998] remarque que le succès d'une démarche d'aide à la décision dans une organisation nécessite la compréhension de l'ensemble du processus de décision dans lequel s'insère cette aide, ce qui implique une capacité d'appréhender adéquatement le problème qui justifie l'origine et qui alimente par la suite ce processus.

Par suite, l'aide à la décision est considérée par [ROY B. et al 1993] comme une science prenant appui sur trois postulats principaux :

-Postulat de la réalité du premier ordre : les principaux aspects de la réalité sur lesquels l'aide à la décision prend appui se rapportent à des objets de connaissance, objets qui peuvent être regardés comme des données et comme suffisamment stables pour que la référence puisse être faite à l'état exact ou à la valeur exacte de telle ou telle de leurs caractéristiques, valeur jugée significative d'un aspect de la réalité ;

-Postulat du décideur : toute décision est le fait d'un décideur : acteur bien identifié, doté de pleins pouvoirs, agissant en vertu d'un système de préférences rationnel au sens d'un certain corps d'axiomes excluant l'ambiguïté et l'incomparabilité, que l'aide à la décision n'a pas pour objet de modifier ;

-Postulat de l'optimum : dans toute situation devant entraîner décision, il existe au moins une décision optimale, décision pour laquelle il est possible d'établir objectivement qu'il n'en existe pas de strictement meilleure et ceci demeurant neutre vis à vis du processus de décision [ZARATE P. 2005].

A partir de ces définitions, on peut dire que toute activité d'aide à la décision fait intervenir un décideur. Celui-ci, est un intervenant principal à qui s'adresse l'aide à la décision et occupant une place centrale dans le processus de décision.

1.2 La problématique de la décision

La problématique de décision peut être perçue comme étant une orientation de l'investigation qu'on adopte pour un problème de décision donné. Elle exprime les termes dans lesquels le décideur pose le problème et traduit le type de la prescription qu'il souhaite obtenir. [ROY B. 1985] distingue quatre problématiques, ètout problème de décision multicritère doit se ramener nécessairement à l'une d'entre elles :

-**Problématique de choix ($P. \alpha$):** Elle consiste à sélectionner un sous ensemble aussi restreint que possible de l'ensemble des actions A , contenant les meilleures actions. L'idéal est d'obtenir une seule et meilleure action. Mais à cause de la nature conflictuelle des critères, il est préférable de fournir au décideur quelques actions qui représentent différentes variantes de la "meilleure action". Évidement, le résultat final peut être raffiné en utilisant de l'information additionnelle ou avec une analyse plus approfondie [E COSTA C A. 1996].

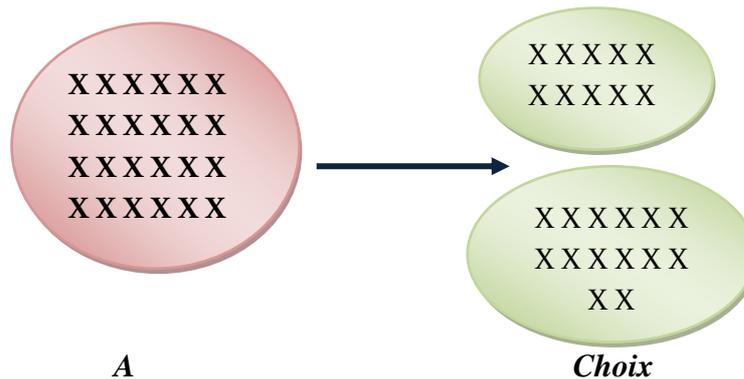


Figure. 38 Problématique de choix [MOUSSEAU V. 1993]

-Problématique de tri ($P.\beta$) : Elle consiste à affecter chaque action à un ensemble de catégories prédéfinies. Cette formulation est adéquate lorsque le problème de décision consiste à examiner chaque action indépendamment des autres (en tenant compte que des caractéristiques intrinsèques de chaque action) dans le but de proposer une recommandation parmi un ensemble des recommandations spécifiées en avance. Chaque recommandation peut être associée avec une catégorie. Le problème de décision est alors vu comme trier les actions potentielles aux différentes catégories définies en termes de normes prédéfinies. La procédure de tri doit être définie de telle sorte que chaque action est affectée à une et seule catégorie. Formellement, une prescription consiste à une partition de A [MOUSSEAU V. 1993].

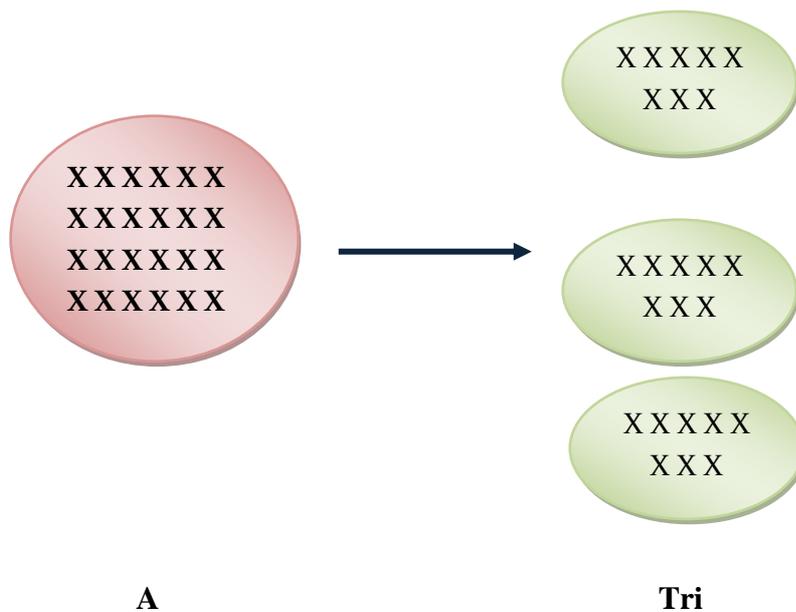


Figure. 39 Problématique de Tri [MOUSSEAU V. 1993]

-Problématique de rangement ($P.\gamma$) : Elle consiste à ranger les différentes actions en allant de la meilleure action à la moins bonne. Cette problématique est intéressante lorsque les actions sont à différencier selon leur intérêt relatif. L'idéal est d'obtenir un ordre complet. Cependant, à cause de la nature conflictuelle des critères, à l'imprécision, à l'existence de systèmes de valeurs différents, il est souvent plus réaliste de présenter au décideur un ordre

partiel. Il est à noter qu'en pratique, le rangement peut être nécessaire seulement pour les actions les plus intéressantes. Formellement, la prescription est un ordre partiel, une relation transitive définie sur A (ou un sous ensemble de A) [MOUSSEAU V. 1993].

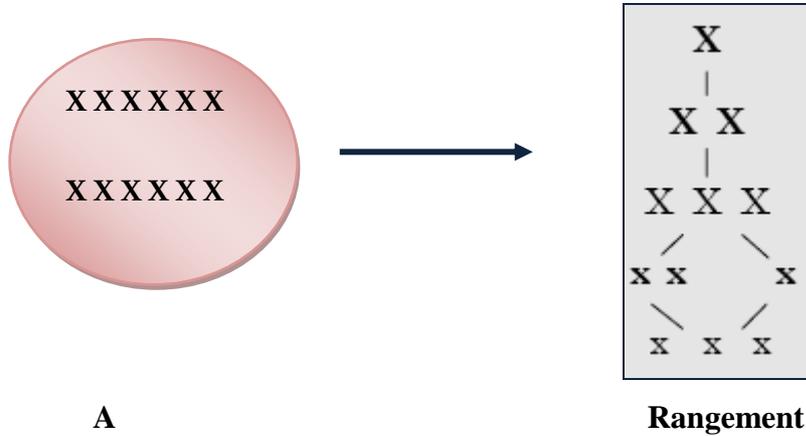


Figure. 40 Problématique de Rangement [MOUSSEAU V. 1993]

-Problématique de description (P. 5) : Elle consiste simplement à décrire les actions et leurs conséquences et non pas à les comparer comme c'est le cas avec les trois autres problématiques précédentes. Ici, il n'existe pas une prescription et la procédure d'investigation est cognitive [ROY B. 1985].

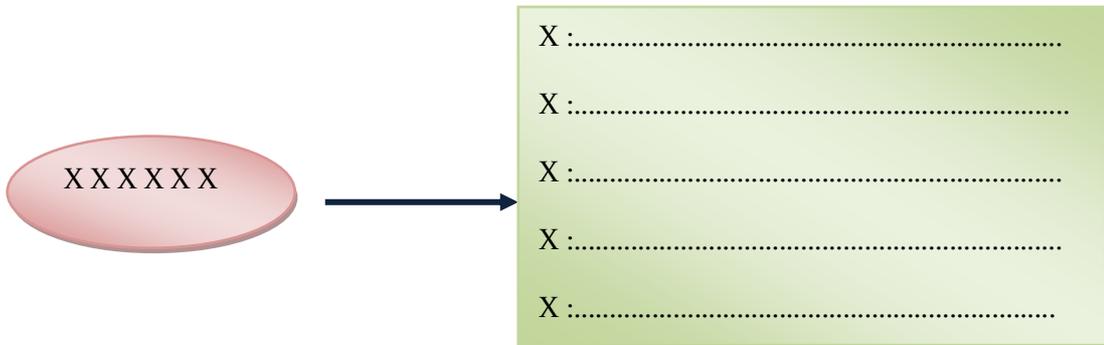


Figure. 41 Problématique de Description

Problématique	Procédure d'investigation	Prescription	Résultat	Objectif
$(P.\alpha)$	Sélection	Sous ensemble de A	Un choix ou une procédure de sélection	sélectionner un sous ensemble aussi restreint que possible de A contenant les meilleures actions.
$(P.\beta)$	Segmentation	Partition de A	Un tri ou une procédure d'affectation	Affecter chaque action de A à une et une seule des catégories définies selon de normes préétablies.
$(P.\gamma)$	Classement	Ordre partiel sur A	Un rangement ou une procédure de classement	Ordonner les actions de A de la meilleure à la moins bonne.
$(P.\delta)$	Cognitive	Aucune prescription	Une description ou une procédure cognitive	Décrire les actions et leurs conséquences.

Tableau. 3 Les différentes problématiques de décision [ROY B. 1985]

1.3 Le processus de décision

[SIMON HA. 1960] décrit le processus de décision comme l'enchaînement des trois phases :

- *Phase de compréhension*: analyse de la situation et du problème ;
- *Phase de modélisation*: formulation du problème (mise en évidence des écarts entre la situation actuelle et la situation objectée) et description des solutions potentielles ;
- *Phase de sélection*: choix d'une solution en fonction de critères concrets (objectifs, normes,...) ou abstraits (intuition, motivation,...), appréhendés par le décideur avec ou sans le soutien d'outils et de techniques d'aide à la décision;

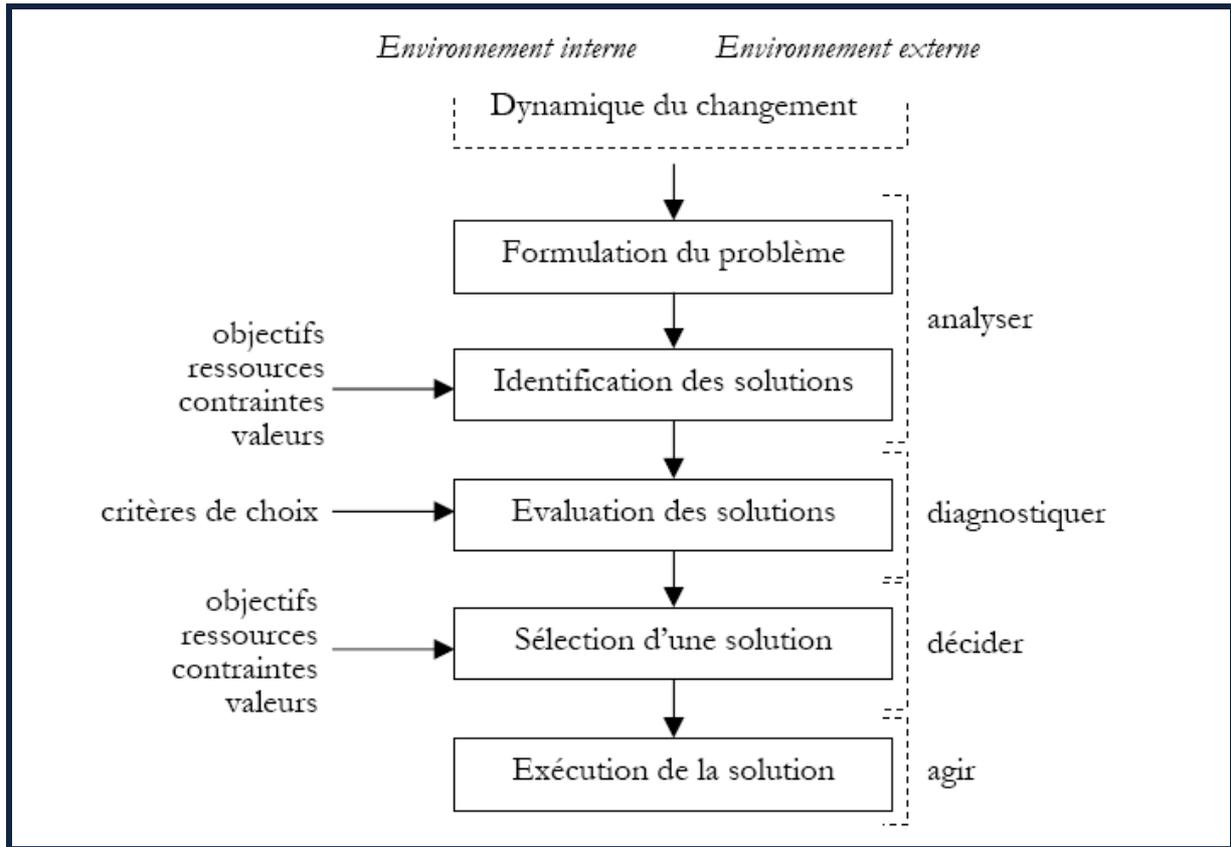


Figure. 42 Processus de décision [DARBELET M. et al 1996]

1.4 Démarche de modélisation

Une prescription est l'aboutissement d'un raisonnement qui permet de construire une préférence globale à partir des performances d'une famille de critères et en appréhendant le système de préférence des intervenants pour qui s'exerce l'aide à la décision. Cette construction fait référence à la phase de modélisation du problème décisionnel. Un modèle d'aide à la décision peut être élaboré de diverses façons. Il existe trois démarches dont la différence principale porte sur leur manière d'aborder la réalité [ROY B. 1992]:

- *démarche descriptive* : vise à décrire et à expliquer le problème décisionnel, à partir du système de préférences des intervenants, qu'il s'agit d'appréhender de la manière la plus fidèle possible, sans le perturber [BOUYSSOU D. 1990];
- *démarche axiomatique* : sur la base d'un système d'axiomes « caractérisant le comportement rationnel en matière de décision », il existe un ensemble de principes et de

règles à suivre prescrit aux intervenants pour modéliser le problème décisionnel [MOUSSEAU V. 1993] ;

- *démarche constructive* : élabore le modèle d'aide à la décision à partir de « la partie stable de la perception du problème » qu'ont les intervenants et en ayant recours à des concepts et des modes de représentation permettant d'enrichir cette perception [BOUYSSOU D. 1990].

Démarches descriptive et constructive sont opposées dans l'attitude adoptée pour modéliser les préférences. L'approche descriptive considère l'existence d'un système de préférences réelles et objectives que le décideur peut appréhender sans perturber, alors que l'approche constructive considère que le système de préférence est conflictuel, peu structuré et surtout appelé à évoluer au cours du processus d'aide à la décision [FUMEY M. 2001].

2. Analyse multicritère d'aide à la décision

La détermination de la “meilleure” action (optimale, de meilleur compromis...) constitue un défi intellectuel perpétuel en sciences et en génie. L'aide multicritère à la décision s'est alors développée pour offrir à la fois une démarche et des outils de solutions à des problèmes décisionnels complexes [KEENEY R L. 1992]. Ainsi, l'analyse multicritère est aujourd'hui considérée comme l'une des branches les plus importantes de la recherche opérationnelle et des théories de la décision.

2.1 Définition de l'aide multicritère à la décision

Techniquement, l'aide multicritère à la décision est développée pour traiter plusieurs classes de problèmes de décision (choix, tri, description, rangement...) tout en considérant plusieurs critères (attributs), souvent conflictuels et non commensurables, tout en cherchant à modéliser au mieux les préférences et les valeurs du ou des décideurs [POHEKAR SD. et al 2006].

[VINCKE PH. 1994] définit l'aide multicritère à la décision comme étant : « L'aide multicritère à la décision vise, comme son nom l'indique, à fournir à un décideur des outils lui permettant de progresser dans la résolution du problème de décision ou plusieurs points de vue, souvent contradictoires, doivent être pris en compte ».

[MAYSTRE LY. 1994] considère que l'aide multicritère à la décision est une analyse ayant pour but d'explicitier une famille cohérente de **critères** permettant d'appréhender les différentes **conséquences** d'une **action**.

Ainsi, **un critère** permet d'évaluer et de comparer des actions potentielles selon un objectif bien défini. A chaque critère est associée une donnée descriptive unique. Un critère g est une fonction à valeurs réelles définie sur A permettant de déterminer le résultat de la comparaison de toute paire d'action relativement à un objectif associé, de sorte que :

$$\forall a, b \in A, g(a) > g(b) \Rightarrow a P_g b$$

Où P_g est l'expression des préférences partielles de a par rapport à b relativement au critère g .

A chaque critère g est associée une échelle de mesure E_g représentant les valeurs possibles que peut prendre le critère [VANDERPOOTEN D. 1988]. A toute action est associé un vecteur performance traduisant l'image de l'action a dans l'espace des critères:

[MOUSSEAU V. 1993]

$$\forall a \in A, (g_1(a), g_2(a) \dots \dots \dots g_n(a))$$

Il existe plusieurs types de critères :

-Le vrai critère: Nous parlons de vrai critère lorsque l'action qui reçoit la meilleure note sera préférée à l'autre. Il n'y a indifférence que si les deux notes sont égales.

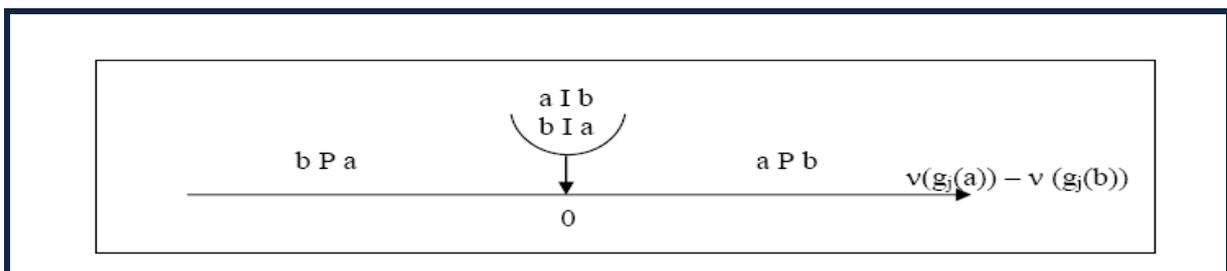


Figure. 43 Préférence entre les actions a et b selon le vrai critère

-Le quasi-critère: Nous parlons de quasi-critère lorsqu'il y a une plage d'indifférence $[-q, q]$. Il y a indifférence entre les actions a et b lorsque l'écart de leur évaluation tombe dans la plage $[-q, q]$.

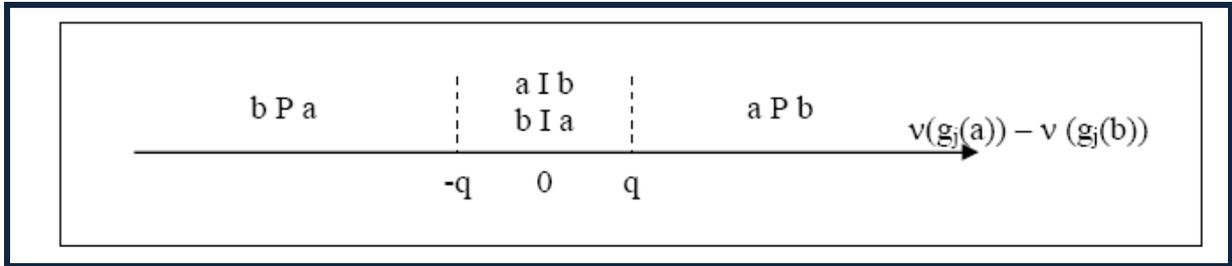


Figure. 44 Préférence entre les actions a et b selon le quasi -critère

-Le pré-critère : Un pré-critère est un vrai critère auquel on a introduit une plage de préférence faible.

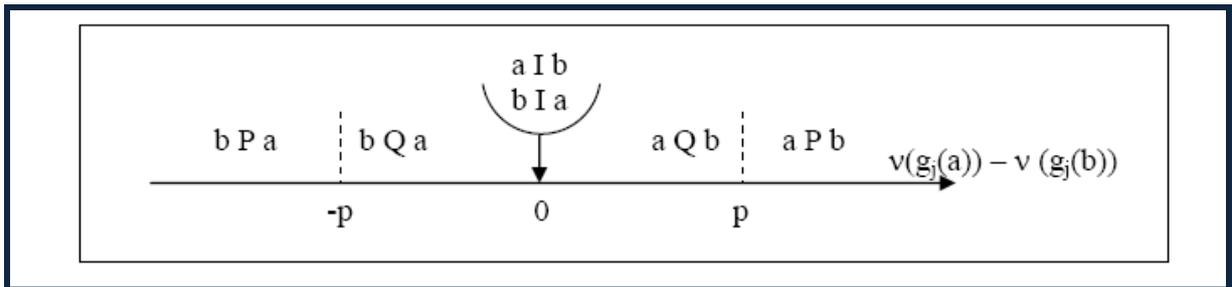


Figure. 45 Préférence entre les actions a et b selon le pré-critère

Une conséquence d'une action est tout effet ou tout attribut de cette action susceptible d'interférer avec les objectifs ou le système de valeurs d'un acteur du processus de décision en tant qu'élément primaire à partir duquel il élabore, justifie ou transforme ses préférences. Dans un contexte d'aide à la décision à référence spatiale, les conséquences peuvent être ponctuelles ou dispersées. La dispersion peut être uniforme ou non. Les conséquences peuvent aussi varier au cours du temps [ROY B. 1985].

Le terme action est un terme générique qui désigne l'objet sur lequel se porte la décision. Les éléments d'information qu'un décideur attend de l'aide multicritère à la décision peuvent, selon le problème posé, concerner les alternatives, les solutions, qu'il peut respectivement

envisager d'exécuter, de retenir ou de traiter en priorité à plus ou moins longue échéance selon la situation considérée. Le terme action potentielle (ou réalisable) désigne aussi bien les "actions réelles", déjà réalisées ou susceptibles de l'être, que les « actions fictives », non réalisées ou traduisant une solution non encore entièrement élaborée [ROY B. et al 1993].

L'analyse multicritère ou les méthodes d'aide à la décision multicritères désignent généralement un ensemble de méthodes permettant d'agrèger plusieurs critères avec l'objectif de sélectionner une ou plusieurs actions, options ou solutions.

De plus l'analyse multicritère vise à fournir des outils de résolution de problème de décision où plusieurs objectifs, qui permettront souvent de progresser dans la contradictoires, doivent être pris en compte [VINCKE P. 1994].

A la différence d'un problème uni-critère à résoudre, le problème multicritère n'a pas de solution unique mais des solutions de meilleurs compromis. L'argument réaliste selon lequel la réalité étant multidimensionnelle, il est naturel que l'on prenne en compte plusieurs points de vue pour aider à la décision et donc qu'on utilise des méthodes multicritères, ne peut à lui seul justifier d'adopter une démarche multicritère pour aider à la décision.

2.2 Contexte et cadre de l'aide multicritère à la décision

Jusqu'à récemment, nombre de décision étaient menées sous l'égide du paradigme de la recherche opérationnelle classique qui pose comme principe la recherche d'une décision optimale maximisant une fonction économique. La recherche opérationnelle classique consiste ainsi à aboutir à un problème de maximisation sous contraintes dont la solution optimale représente le meilleur choix.

Or, dans la réalité les actions peuvent être complémentaires et partielles, de nouvelles idées apparaissent souvent en cours d'études modifiant ainsi l'ensemble des actions potentielles, et enfin, la décision étant un processus humain, des préférences ne peuvent pas être toujours énoncées. L'approche classique des problèmes de décision, c'est-à-dire l'optimisation d'une unique fonction économique, montre certaines faiblesses auxquelles les méthodes multicritères semblent pallier [AZZABI L. et al 2010].

Dans le domaine industriel, l'utilisation de l'analyse multicritère est particulièrement intéressante dans le sens où le type de raisonnement utilisé dans la démarche de « diagnostic de la situation industrielle » repose essentiellement sur l'expérience des décideurs liée à la résolution de cas rencontrés dans la pratique.

Ainsi, l'analyse multicritère a comme principale caractéristique qu'elle formalise (ou modélise) la préparation des décisions. Tout d'abord, elle améliore la transparence du processus de décision. Ensuite, elle définit, précise et met en évidence la responsabilité du décideur [E COSTA J. et al 1994].

[ROY B. 1998] caractérise le paradigme multicritère comme un « nouveau schéma de pensée pour comprendre ou agir sur un système », en considérant que :

- plusieurs critères sont à l'œuvre pour conduire le système ou guider son évolution,
- ces critères sont, au moins localement, conflictuels,
- les compromis ou arbitrages ont pour objet de conférer aux critères des valeurs compatibles avec une certaine forme d'équilibre et, s'il y a succession, cela tient au caractère transitoire de l'équilibre atteint.

2.3 Démarche de l'aide multicritère à la décision

Il existe différentes démarches pour faire face à la situation de décision multicritère. Chacune met l'accent sur certains aspects aux dépens d'autres et, par conséquent, chacune a ses avantages et ses inconvénients.

-l'approche du "haut vers le bas" (top down) : selon [KENNEY RL. 1992] cette approche consiste à construire une structure hiérarchique ayant à son premier niveau l'objectif global qui est "éclaté" en sous-sous-objectifs jusqu'à ce que l'on atteigne un niveau mesurable que l'on qualifie d'attributs.

En plus, [KENNEY RL. 1992] associe de manière explicite chaque attribut avec un objectif fondamental, où les attributs peuvent être nommés descripteurs, les niveaux d'impacts destinés à être utilisés pour décrire les impacts plausibles des actions potentielles par rapport à chaque point de vue.

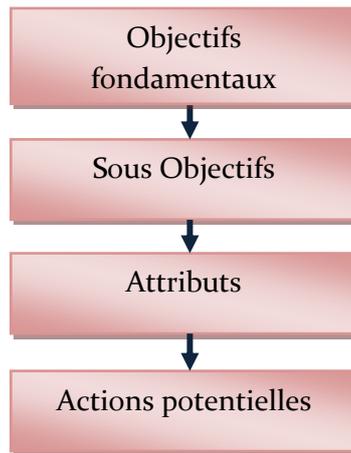


Figure. 46 Démarche top-down d'analyse multicritère [KENNEY RL. 1992]

-l'approche du "bas vers le haut" (bottom-up) : selon [ROY B. 1990 b] cette approche consiste à identifier toutes les conséquences pouvant résulter de la mise en œuvre des actions, que l'on structure en dimensions puis en axes de signification autour desquels sont construits les critères.

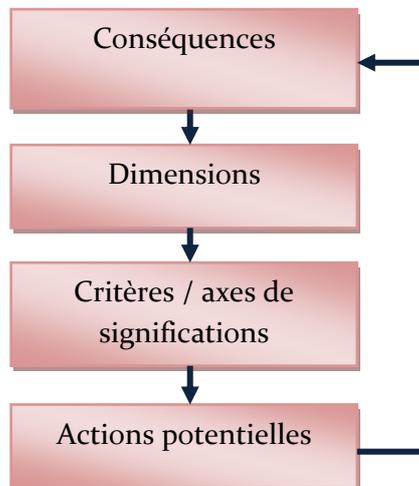


Figure. 47 Démarche bottom-up d'analyse multicritère [ROY B. 1990 a]

-l'approche "intermédiaire" : [LAARIBI A. 2000] a proposé une approche intermédiaire comme suit : partant d'une situation de décision quelconque (perception d'un problème de décision), il y a lieu de tenter de dégager au départ les objectifs qu'on cherche à atteindre. En tenant compte de ces objectifs, un faisceau de points de vue pourrait se dégager, exprimant en quelque sorte des classes de critères.

Aussi, les objectifs permettraient de définir des actions (globales) ou des scénarios (ensemble des actions fragmentées), tandis que la famille de points de vue se traduit généralement par un ensemble de critères qui permettraient de procéder à une évaluation des actions ou des scénarios.

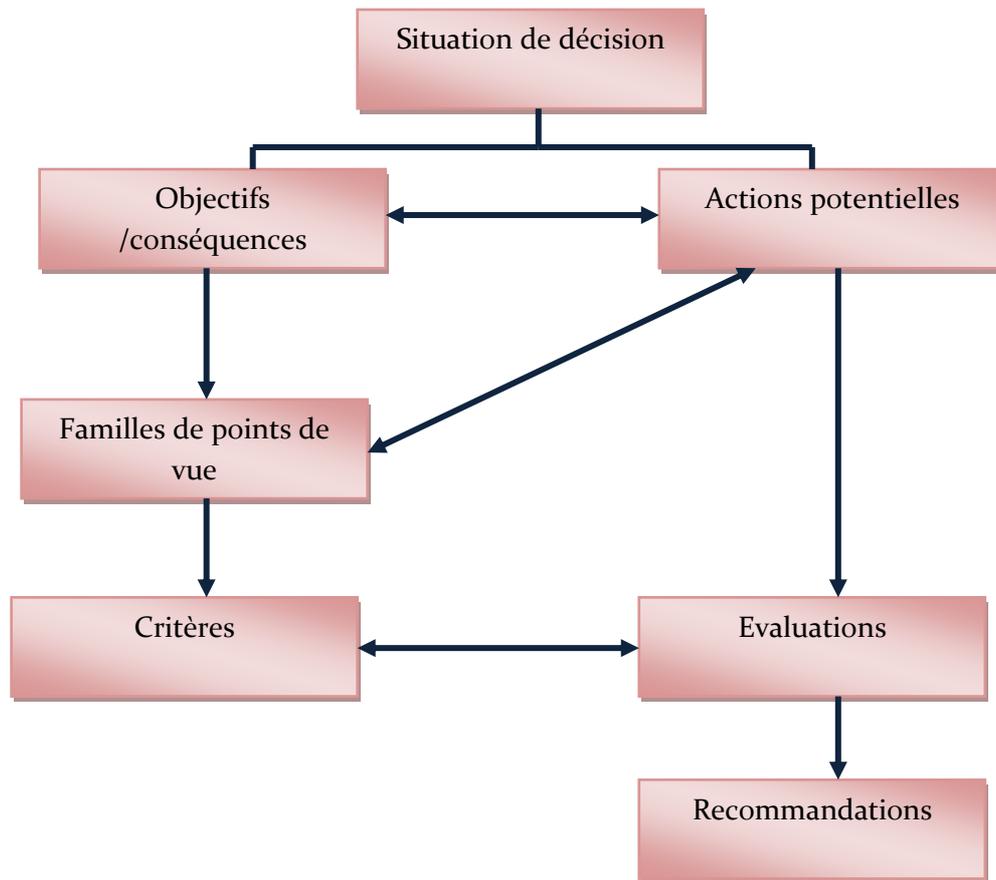


Figure. 48 Démarche intermédiaire d'analyse multicritère [LAARIBI A. 2000]

3. Les méthodes de l'analyse multicritère d'aide à la décision

Les méthodes d'analyse multicritère sont des outils d'aides à la décision développées depuis les années 1960. De nombreuses méthodes ont été proposées afin de permettre aux décideurs de faire un bon «choix ». Pour certain expert du domaine, ce choix existe dans l'esprit du décideur, et le processus d'aide à la décision doit le faire ressortir pour d'autres, le processus d'aide à la décision doit créer ce choix.

Ainsi, un ou plusieurs décideurs sont face à un problème, et disposent pour cela de plusieurs solutions, le décideur prend en compte plusieurs critères pour juger ces actions. Mais aucune action ne se dégage du lot, de plus les critères sur les quels sont jugés ces actions sont conflictuels [CAILLET R. 2003].

Les méthodes d'analyse multicritère ou, plus exactement, les méthodes d'aide multicritère à la décision sont des techniques qui permettent d'intégrer tout type de critères, ces procédures semblent mieux permettre de se diriger vers un judicieux compromis plutôt qu'un optimum souvent désuet [BEN MENA S. 2000].

3.1 Les méthodes de l'approche du critère unique de synthèse

Dans cette approche, d'inspiration américaine, les préférences locales (au niveau de chaque attribut) sont agrégées en une fonction (de valeur, d'utilité) unique qu'il s'agit ensuite d'optimiser. Les travaux relatifs aux méthodes multicritères appartenant à cette approche étudient les conditions d'agrégation, les formes particulières de la fonction agrégeant et les méthodes de construction de ces fonctions (aussi bien au niveau local que global).

3.1.1 Technique for order preference by similiary to ideal solution (TOPSIS)

La méthode TOPSIS est une méthode de prise de décision multicritère développée par HWANG et YOON en 1981. Le concept de base de cette méthode est que, l'alternative choisie doit avoir la plus courte distance à l'alternative idéale (la meilleure sur tous les critères), et la plus grande distance à l'alternative négative idéale (qui dégrade tous les critères) [MÉNDEZ M.

et al 2006]. Il s'agit de réduire le nombre de scénarios de désambiguïsation en écartant les scénarios dominés et de classer les scénarios efficaces selon leurs scores globaux calculés [GUMUS AT. 2008]. Pour illustrer le fait que TOPSIS considère à la fois la distance à l'idéale et à l'anti idéale, il suffit d'examiner la figure si dessous :

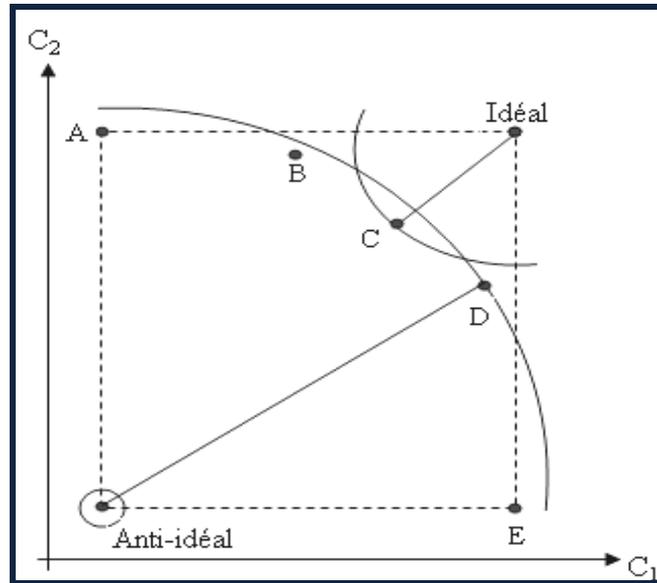


Figure. 49 Illustration des distances à l'idéal et à l'anti-idéal [MÉNDEZ M. et al 2006]

Sur cette figure cinq alternatives A, B, C, D, E deux critères C1 et C2, et les points idéal et anti-idéal sont représentés. En utilisant la distance euclidienne habituelle avec des poids égaux, on constate que C est le point le plus proche de l'idéal, alors que D est le plus éloigné de l'anti-idéal. TOPSIS résout ce dilemme du choix entre idéal et anti idéal en utilisant pour chaque alternative les distances pondérées à l'idéal et à l'anti idéal. [POMEROL JC. et al 1993].

L'ordre de préférence des alternatives peut être obtenu des séries de comparaisons de ces distances relatives. Le critère dit de nature 'entrée' ou 'coût' signifie que, les éléments qui ont les valeurs minimales sont préférés. Le critère dit de nature 'sortie' ou 'bénéfice' signifie que, les éléments qui ont les valeurs maximales sont préférés. Un critère est nommé 'objectif' lorsqu'on peut assigner des valeurs numériques pour l'alternative considérée. Un critère est dit 'subjectif' lorsqu'on ne peut pas quantifier par des valeurs numériques [WANGA JW. et al 2008].

Les étapes de la méthode TOPSIS sont comme suit :

-Etape 1 : Normaliser les performances

$$E' = \frac{g_j(a_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m [g_j(a_i)]^2}}$$

Avec: i (les actions a_i) = 1, 2, , m ;

j (les critères) = 1, 2, , n ;

$g_j(a_i)$ Correspondent aux valeurs déterministes des actions i pour le critère j .

-Etape 2 : Calculer le produit des performances normalisées par les coefficients d'importance relative des attributs :

$$e''_{ij} = \pi_j \times e'_{ij}$$

Avec: π_j est le poids du $j^{\text{ème}}$ critère

-Etape 3 : Déterminer les profils idéal (α^*) et anti-idéal (α_*).

$$\alpha^* = \{\max_i e''_{ij}, i=1, 2, \dots, m \text{ et } j=1, 2, \dots, n\};$$

$$\alpha^* = \{e^*_j, j=1, 2, \dots, n\} = \{e^*_1, e^*_2, \dots, e^*_n\};$$

$$e^*_j = \max_i \{e''_{ij}\}.$$

$$\alpha_* = \{\min_i e''_{ij}, i=1, 2, \dots, m \text{ et } j=1, 2, \dots, n\};$$

$$\alpha_* = \{e_{j*}, j=1, 2, \dots, n\} = \{e_{1*}, e_{2*}, \dots, e_{n*}\};$$

$$e_{j*} = \min_i \{e''_{ij}\}.$$

-Etape 4 : Calculer la distance euclidienne par rapport aux profils (α^*) et (α_*).

$$D^*_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (e''_{ij} - e^*_j)^2},$$

$$D_{i*} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (e''_{ij} - e_{j*})^2},$$

-Etape 5: Calculer un coefficient de mesure du rapprochement au profil idéal.

$$C^*_i = \frac{D^*_i}{D^*_i + D_{i*}}$$

$$\forall: 0 \leq C^*_i \leq 0$$

-Etape 6: Ranger les actions en fonction des valeurs décroissantes de C^*_i [YANG T. et al 2007].

3.1.2 Simple multi-attribue rating technique (SMART)

La méthode SMART développée par EDWARDS en 1971 consiste à utiliser la forme additive pour l'agrégation des évaluations sur les différents critères. Ceci a été justifié par le fait qu'on obtient d'aussi bonnes approximations avec la forme additive qu'avec d'autres formes non linéaires qui sont plus complexes. La méthode SMART se présente comme suit :

-Etape 1 : Mettre les critères selon l'ordre décroissant d'importance ;

-Etape 2 : Déterminer le poids de chaque critère ;

-Etape 3 : Normaliser les coefficients d'importance relative entre 0 et 1 : faire la somme des coefficients d'importance et diviser chaque poids par cette somme.

-Etape 4 : Mesurer la localisation de chaque action sur chaque critère ($u_j(a_i)$) . Les évaluations des actions se font sur une échelle variant de 0 (minimum plausible) à 100 (maximum plausible).

-Etape 5 : Déterminer la valeur de chaque action selon la somme pondérée suivante :

$$u_j(a_i) = \sum_{j=1}^n \pi_j u_j(a_i)$$

$$\forall: i(\text{les actions } a_i) = 1, 2, \dots, m$$

-Etape 6 : Classer les actions selon l'ordre décroissant de $u_j(a_i)$ [EDWARDS W. 1971].

3.1.3 Multiple attribute value theory (MAVT)

La méthode MAVT développée par KEENEY et RAIFA en 1976 repose sur l'idée fondamentale suivante : tout décideur essaie inconsciemment (ou implicitement) de maximiser une fonction $V = [g_1, \dots, g_n]$ qui agrège tous les attributs. La particularité de la méthode MAVT réside dans l'idée de construction d'une fonction de valeur partielle pour chaque attribut. La meilleure action sur un attribut aura une valeur partielle (par rapport à l'attribut étudié) égale à 1 et la pire des actions aura une valeur partielle égale 0. En posant des questions au décideur, nous construisons les fonctions de valeur partielle. Nous

construisons ensuite, et ce en fonction des caractéristiques des préférences du décideur, la fonction de valeur V . La méthode MAVT s'applique dans un contexte caractérisé par un ensemble d'actions explicite, une articulation a priori des préférences et un univers déterministe (les évaluations des actions par rapport à chaque attribut sont certaines) [FARQUHAR P. 1984].

Les étapes de la méthode MAVT sont comme suit :

-Etape 1 : Évaluer chacune des actions selon chaque critère (construire la matrice de décision: tableau multicritère).

	g_1	g_j		g_n
a_1

a_i	..	$g_j(a_i)$

a_m
	$v_1(g_1)$	$v_j(g_j)$..	$v_n(g_n)$

Tableau. 4 Matrice de décision

-Etape 2 : Construire des fonctions de valeur partielle pour chaque critère (traduire le tableau multicritère en utilisant les valeurs).

	$v_1(g_1)$	$v_j(g_j)$		$v_n(g_n)$
a_1

a_i	..	$v_j(g_j(a_i))$

Tableau. 5 Matrice des fonctions de valeur partielle

-**Etape 3** : Établir les poids des critères.

-**Etape 4** : Calculer l'évaluation globale pour chaque action en utilisant une forme d'agrégation appropriée $v [g_1(a_i), \dots, g_n(a_i)] = f\{v_1[g_1(a_i)], \dots, v_n[g_n(a_i)]\}$.

-**Etape 5** : Déterminer la meilleure action (l'action qui maximise la valeur v : celle qui a le plus grand score).

-**Etape 6** : Faire des analyses de sensibilité [GUITOUNI A. 2000].

3.1.4 Multiple attribute utility theory (MAUT)

La méthode MAUT développée par KEENEY et RAIFA en 1976 peut être utilisée pour résoudre les problèmes de choix ou de rangement multicritère sur un ensemble A d'actions. Elle construit une fonction d'utilité à partir d'un pré ordre défini par l'utilisateur sur un sous-ensemble A' d'actions de référence. La procédure, basée sur un principe de régression ordinale, consiste à résoudre un programme linéaire. L'utilisateur peut modifier d'une façon interactive les fonctions d'utilité dans les limites fournies par une analyse de sensibilité du problème de régression ordinale. Pour effectuer ces modifications, l'utilisateur est aidé par une interface graphique très conviviale. La fonction d'utilité acceptée par l'utilisateur sert alors à définir un pré ordre sur l'ensemble A des actions [JIMENEZ A. et al 2007].

MAUT est convenable pour incorporer des préférences des risques d'incertitudes dans les problèmes de décisions multicritères à partir d'une manière conséquente. [LØKEN E. et al 2008]

La méthode MAUT repose sur la même idée que la méthode MAVT. En revanche, elle s'applique dans le cas où les évaluations des actions par rapport aux attributs sont imprégnées d'incertitude (aléatoire). L'idée est assez simple, le décideur doit associer une utilité à chacune des actions considérées.

Pour ce faire, il va considérer séparément ces critères, et observer quelle utilité dégage chaque critère pour l'action considérée. En effet, l'utilité $V_A(x_1, x_2, \dots, x_n)$, associée à l'action A , évaluée sur les critères $1, 2, \dots, n$, peut se décomposer sous la forme :

$V_A(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n (x_i)$, ($V_i(x_i)$ étant l'utilité générée au vu du critère i , si l'action considérée à la performance x_i), à condition que les critères considérés soient indépendants [ANANDA J. et al 2005].

3.1.5 Utility Theory Additive (UTA)

La méthode UTA développée par JACQUET-LAGREZE ET SISKOS en 1982 se base sur l'idée suivante : nous supposons que le décideur connaît bien un sous-ensemble d'actions A' ($A' \subset A$). Nous cherchons à estimer la fonction d'utilité (ayant une forme additive) en s'approchant le plus possible des jugements portés par le décideur sur le sous-ensemble A' . Pour ce faire, on sélectionne un sous-ensemble A' d'actions et on demande ensuite au décideur de :

- Classer les actions de A' ,
- Donner les critères significatifs $1, 2, \dots, j, \dots, n$;
- Donner les évaluations des actions de A' par rapport aux critères $1, 2, \dots, j, \dots, n$ (matrice des jugements), cette étape consiste à déterminer la fonction d'utilité totale qui colle le mieux avec les données (classement des actions et la matrice des jugements).

La fonction d'utilité obtenue peut être considérée comme une estimation, à un terme d'erreur près, de la vraie fonction d'utilité :

$$U(a_i) = \sum_{j=1}^n U'_j(e_{ij}) + \sigma(a_i)$$

Où : $U'_j(e_{ij})$ désigne l'utilité de l'évaluation i sur le critère j , et $\sigma(a_i)$ désigne l'erreur associée à l'estimation de $U_j(a_i)$.

La méthode UTA s'applique en procédant comme suit :

-Étape 1 : Déterminer les évaluations extrêmes e^*_j et e_j^* et écrire les valeurs des actions de A' selon l'expression de $U(a_i)$.

-Étape 2 : Écrire la contrainte de normalisation des poids des critères

$$\sum_{j=1}^n U'(e^*_j) = 1$$

-Etape 3 : Diviser, pour chaque critère j , l'intervalle $[e_j^*, e_j^*]$ en α_j intervalles notés

$[e_j^l, e_j^{l+1}]$, avec $e_j^l = e_j^* + \frac{l-1}{\alpha_j} (e_j^* - e_j^*)$, $l=1, 2, \dots, \alpha_j$.

-Etape 4 : Appliquer la transformation ci-après

$U'_j(e_j^{l+1}) - U'_j(e_j^l) > 0, \forall j, l$ où $[e_j^l, e_j^{l+1}]$ est un intervalle de valeurs de g_j ce qui revient à dire que les fonctions d'utilité partielle sont monotones.

-Etape 5 : Déterminer les valeurs $U'_j(e_j^l)$. Dans la méthode UTA, on détermine les $U'_j(e_j^l)$ et on effectue des interpolations linéaires entre ces points. En d'autres termes, si

$Z_j \in [e_j^l, e_j^{l+1}]$, on aura $U'_j(Z_j) = U'_j(e_j^l) + \frac{Z_j - e_j^l}{e_j^{l+1} - e_j^l} [U'_j(e_j^{l+1}) - U'_j(e_j^l)]$

-Etape 6 : Formuler le problème sous la forme d'un programme linéaire en se basant sur l'ensemble A .

-Etape 7 : Résoudre le programme linéaire et appliquer la fonction d'utilité obtenue à l'ensemble des actions de A [BEUTHE M. et al 2000].

3.1.6 Analytic Hierarchy Process (AHP)

AHP est une des méthodes de prise de décision multicritères développée par SAATY en 1980. C'est une méthodologie systématique, flexible et simple, utilisée fréquemment par les chercheurs et les praticiens afin de comparer plusieurs objectives ou alternatives. L'application de la méthode AHP se fait à 2 niveaux : la structure hiérarchique et l'évaluation. Les décideurs peuvent rassembler les critères qualitatifs et quantitatifs dans la structure hiérarchique [SAATY T. 2007]. La méthode intègre l'opinion et l'évaluation des experts, et décompose le problème de décision à multicritères en un système des hiérarchies, en descendant dans la hiérarchie de grands aux petits éléments [AYADI D. et al 2009]. La structure hiérarchique de la méthode AHP reflète la tendance naturelle de l'esprit de l'homme ; Cette structure hiérarchique, clarifie le problème et permet la contribution de chaque élément à la décision finale [HUA Z. et al 2008]. L'objectif se situe au niveau le plus haut de la hiérarchie. Les critères et les sous critères, étant les éléments qui influencent l'objectif, se trouvent dans les niveaux intermédiaires de la hiérarchie. Les alternatives sont le niveau le plus bas de l'hiérarchie [AYADI D. et al 2008 b]. Cette méthode part des matrices de comparaison binaires pour arriver après quelques étapes à évaluer un vecteur de poids. La méthode AHP consiste à représenter un problème de décision par une structure hiérarchique

reflétant les interactions entre les divers éléments du problème, à procéder ensuite à des comparaisons par paires des éléments de la hiérarchie, et enfin à déterminer les priorités des actions. [AYADI D. et al 2008b] La méthode AHP s'applique en procédant comme suit :

-Etape 1 : Décomposer le problème en une hiérarchie d'éléments inter-reliés. Au sommet de la hiérarchie, on trouve l'objectif, et dans les niveaux inférieurs, les éléments contribuant à atteindre cet objectif. Le dernier niveau est celui des actions.

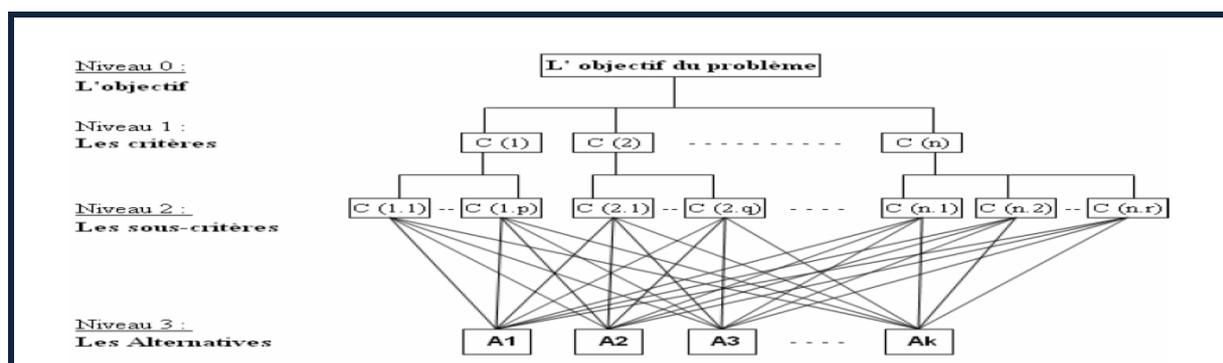


Figure. 50 La structure hiérarchique

-Etape 2 : Procéder à des comparaisons par paires des éléments de chaque niveau hiérarchique par rapport à un élément du niveau hiérarchique supérieur. Cette étape permet de construire des matrices de comparaisons. Les valeurs de ces matrices sont obtenues par la transformation des jugements en valeurs numériques selon l'échelle de Saaty (Echelle de comparaisons binaires) [SAATY T. 2003], tout en respectant le principe de réciprocité :

Degré d'importance	Définition
1	Importance égale des deux éléments
3	Faible importance d'un élément par rapport à un autre.
5	Importance forte ou déterminante d'un élément par rapport à un autre.
7	Importance attestée d'un élément par rapport à un autre.
9	Importance absolue d'un élément par rapport à un autre.
2,4,6,8	Valeurs intermédiaires entre deux appréciations voisines
réciprocité	Si l'élément i se voit attribuer l'un des chiffres précédents lorsqu'elle est comparée à l'élément j, ce dernier aura donc la valeur inverse lorsqu'on le compare à i.

Tableau. 6 Échelle de Saaty de la méthode AHP

-Etape 3 : Déterminer l'importance relative des éléments en calculant les vecteurs propres correspondants aux valeurs propres maximales des matrices de comparaisons.

-Etape 4 : Vérifier la cohérence des jugements à travers l'indice de cohérence *IC*, et le ratio de cohérence *RC*.

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

Où : λ_{\max} est la valeur propre maximale correspondant à la matrice des comparaisons par paires et n est le nombre d'éléments comparés.

On calcule le ratio de cohérence *RC* définit par :

$$RC = 100 \times \frac{IC}{ACI}$$

Où *ACI* est l'indice de cohérence moyen

Dimension de la matrice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cohérence aléatoire ACI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Tableau. 7 Indice de cohérence moyen

Une valeur de RC inférieure à 10% est généralement acceptable, sinon, les comparaisons par paires doivent être révisées pour réduire les incohérences.

-Etape 5 : Établir la performance relative de chacune des actions.

$$Pk(e_i^{k-1}) = \sum_{j=1}^{nk-1} P_{k-1}(e_j^{k-1}) \times P_k\left(\frac{e_{ik}}{e_i^{k-1}}\right); \text{ Avec } \sum_{j=1}^{nk} Pk(e_j^k)=1$$

Où : $nk - 1$ est le nombre d'éléments du niveau hiérarchique $k - 1$, et $Pk(e_i^k)$ est la priorité accordée à l'élément e_i au niveau hiérarchique k [AYADI D. et al 2008 a].

3.1.7 La méthode EVALUATION of MIXed Criteria (EVAMIX)

La méthode EVAMIX développée par VOOGD en 1983 représente les évaluations ordinales et cardinales. Afin d'évaluer une action par rapport à une autre, on calcule deux indices de dominance, le premier pour les évaluations ordinales et le second pour les évaluations cardinales. Ces deux indices sont par la suite normalisés puis combinés pour donner une mesure globale de la dominance. Enfin, un score global par action est calculé, ce qui permettra de classer les actions.

-Etape 1 : Calculer les indices de dominance (de l'action i par rapport à l'action k) α_{ik} et β_{ik} respectivement pour les attributs ordinaux (O) et cardinaux (C).

$$\begin{cases} \alpha_{ik} = \sqrt[p]{\sum_{j \in O} [\pi_j \cdot v(e_{ij}, e_{kj})]^p} \\ \beta_{ik} = \sqrt[p]{\sum_{j \in C} [\pi_j \cdot v(e_{ij}, e_{kj})]^p} \end{cases}, \text{ avec } v(e_{ij}, e_{kj}) = \begin{cases} 1, \text{ si } e_{ij} > e_{kj} \\ 0, \text{ si } e_{ij} \approx e_{kj} \\ -1, \text{ si } e_{ij} < e_{kj} \end{cases}$$

-Etape 2 : Normaliser les indices de la manière suivante :

$$\begin{cases} \delta_{ik} = \frac{\alpha_{ik}}{\sum_i \sum_k |\alpha_{ik}|} \\ \mu_{ik} = \frac{\beta_{ik}}{\sum_i \sum_k |\beta_{ik}|} \end{cases}$$

-Etape 3 : Calculer la dominance D_{ik} globale de l'action i par rapport à l'action k . C'est simplement la somme pondérée des indices de dominance normalisés.

$$D_{ik} = \delta_{ik} \cdot \sum_{j \in O} \pi_j + \mu_{ik} \sum_{j \in C} \pi_j$$

-Etape 4 : Calculer le score global par action comme suit :

$$D_i = \sum_{k=1; k \neq i}^n D_{ik}$$

Où n est le nombre d'actions, et D_i permet de ranger les actions [VOOGD H. 1983]

3.2. Les méthodes de surclassement de synthèse

Cette approche consiste à prendre appui sur une règle apportant une réponse synthétique, exhaustive et définitive au problème de l'agrégation des performances. Elle prend la forme d'un ensemble de conditions conduisant à accepter ou à rejeter un surclassement au niveau global [SIMON HA. 1960]. Cette approche vise à caractériser les surclassements qu'il est possible d'établir de façon suffisamment solide. Elle conduit à des acceptations de

l'incomparabilité et n'ayant pas nécessairement des propriétés remarquables de transitivité [AZZABI L. et al 2008 c].

3.2.1 La méthode Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation (PROMETHEE)

Les méthodes PROMETHEE développées par [BRANS JP. et al 1986] sont des méthodes d'analyse multicritère de surclassement. Elles permettent de définir des relations de surclassement, d'indifférence et d'incomparabilité entre deux scénarios du meilleur au moins bon. Pour chaque scénario, une note et un poids sont attribués à chaque critère, afin d'évaluer l'indice de préférence d'un scénario sur l'autre. Cet indice est ensuite utilisé pour calculer l'attractivité d'un scénario sur l'autre, définie comme différence entre la dominance des scénarios par rapport à tous les autres, et la soumission de ce scénario par rapport à tous les autres.

Les méthodes PROMETHEE sont utilisées dans de nombreux cas de recherche opérationnelle, et plus récemment dans la prise de décision en matière environnementale [SIMON U. et al 2004]. L'objectif des méthodes d'analyse multicritère PROMETHEE est de construire via un système de préférences floues, un classement des alternatives des meilleures aux moins bonnes.

Les méthodes PROMETHEE se basent sur une extension de la notion de critère par l'introduction d'une fonction exprimant la préférence du décideur pour une action a_i par rapport à une autre action a_k . Pour chaque critère, le décideur est appelé à choisir une des six formes de courbes représentées ci-dessous. Les paramètres relatifs à chaque courbe représentent des seuils d'indifférence et/ou de préférence [ALBADVI A. et al 2007].

La fonction type I est généralement employée lorsque les données présentent un caractère discret tel un classement ordinal ou encore une valeur de type tout ou rien.

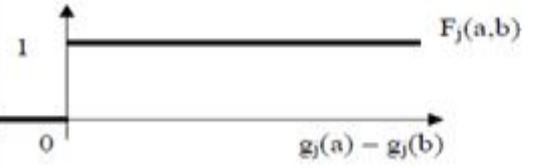
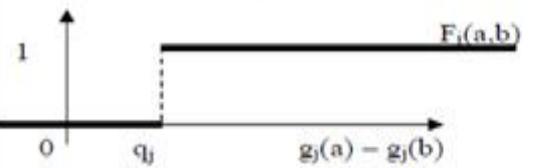
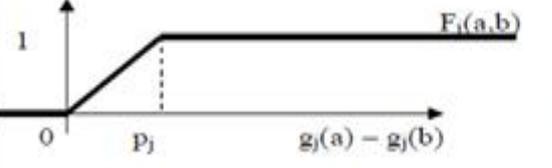
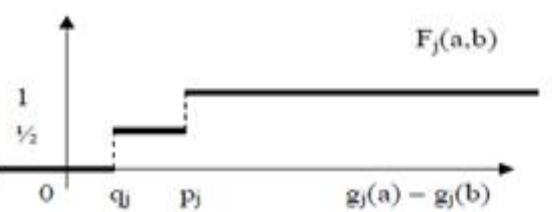
La fonction type II est employée lorsque les seuils d'indifférence sont clairement apparents dans les données du problème posé.

La fonction type III est généralement employée lorsque les données sont telles que les écarts entre elles présentent un caractère continu, ou encore lorsque toutes les valeurs intermédiaires entre les valeurs maximales et minimales de ces écarts sont possibles.

La fonction type IV est parfois employée lorsqu'on peut affirmer qu'un candidat n'est à la fois ni strictement préféré à un autre, ni indifférent [AZZABI L. et al 2009 b]. Ce candidat caractérisé par un écart donné par rapport à un autre se verra attribuer 1/2 point.

La fonction type V est employée lorsque les seuils d'indifférence et de préférence stricte sont clairement apparents dans les données du problème multicritère posé [AZZABI L. et al 2009 a].

La fonction type VI (distribution gaussienne) est la fonction la plus employée dans les applications pratiques et est particulièrement indiquée en cas d'un nombre de candidats suffisamment élevé. Dans ce cas il convient de calculer l'écart type σ de cette distribution [AZZABI L. et al 2008a].

<p><i>1^{ère} forme : Vrai-critère</i></p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Préférence stricte immédiate. • Pas de paramètres à déterminer. $F_j(a,b) = \begin{cases} 1 & \text{si } g_j(a) > g_j(b) \\ 0 & \text{si } g_j(a) \leq g_j(b) \end{cases}$
<p><i>2^{ème} forme : Quasi-critère</i></p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Il existe un seuil d'indifférence (quasi-critère) qui doit être fixé. $F_j(a,b) = \begin{cases} 1 & \text{si } g_j(a) - g_j(b) > q_j \\ 0 & \text{si } g_j(a) - g_j(b) \leq q_j \end{cases}$
<p><i>3^{ème} forme : Pré-critère</i></p> 	<ul style="list-style-type: none"> • La préférence croit jusqu'à un seuil de préférence qui doit être fixé. $F_j(a,b) = \begin{cases} 1 & \text{si } g_j(a) - g_j(b) > p_j \\ \frac{g_j(a) - g_j(b)}{p_j} & \text{si } 0 < g_j(a) - g_j(b) \leq p_j \\ 0 & \text{si } g_j(a) - g_j(b) \leq 0 \end{cases}$
<p><i>4^{ème} forme : Pseudo-critère 1</i></p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Il existe un seuil d'indifférence et un seuil de préférence à fixer (pseudo-critère); entre les deux, la préférence est moyenne. $F_j(a,b) = \begin{cases} 1 & \text{si } g_j(a) - g_j(b) > p_j \\ 1/2 & \text{si } q_j < g_j(a) - g_j(b) \leq p_j \\ 0 & \text{si } g_j(a) - g_j(b) \leq q_j \end{cases}$

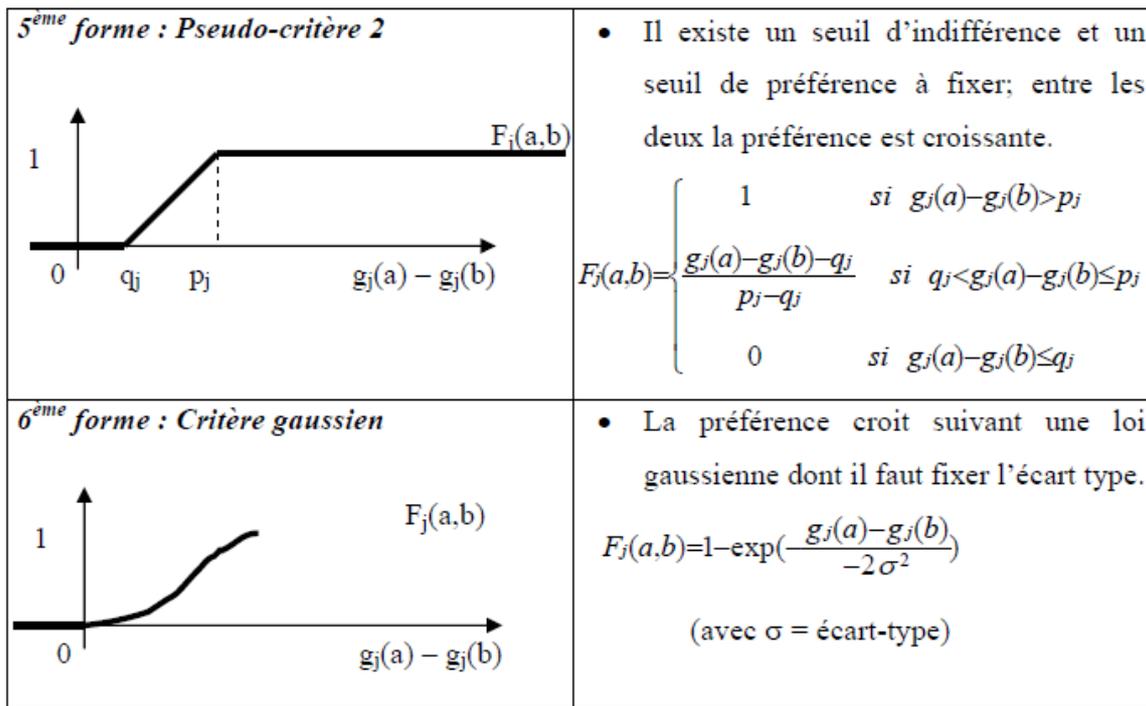


Figure. 51 Différents types de critères [VINCKE P. 1994]

Les Méthodes PROMETHEE I et II se présentent comme suit :

-Etape 1 : On fixe pour chaque critère, une des six formes de courbes proposées dans PROMETHEE ainsi que les paramètres qui lui sont associés.

-Etape 2 : Pour chaque couple d'actions (a_i, a_k); on calcule la préférence globale (degré de surclassement) de la manière suivante :

$$P(a_i, a_k) = \sum_{j=1}^n \pi_j \cdot F_j(a_i, a_k)$$

-Etape 3 : Calculer les flux entrant et sortant pour chaque action a_i .

$\Phi^+(a_i) = \sum_{a_k \in A, a_i \succ a_k} P(a_i, a_k)$, flux positif qui exprime la force de a_i flux sortant.

$\Phi^-(a_i) = \sum_{a_k \in A, a_i \prec a_k} P(a_k, a_i)$, flux négatif qui exprime la faiblesse de a_i flux entrant.

-Etape 4 : Déterminer les 2 pré-ordres totaux et procéder au rangement des actions :

-Le premier pré-ordre total consiste à ranger les actions dans l'ordre décroissant des Φ^+ .

-Le second pré-ordre total consiste à ranger les actions dans l'ordre croissant des Φ^- .

- L'intersection des 2 pré-ordres totaux fournit le pré-ordre partiel de la méthode PROMETHEE I.

- L'intersection des 2 pré-ordres totaux fournit le pré-ordre total de la méthode PROMETHEE II. Cette méthode consiste à ranger les actions selon l'ordre décroissant des scores $\Phi(a_i)$ définis comme suit : $\Phi(a_i) = \Phi^+(a_i) - \Phi^-(a_i)$.
- PROMETHEE III conduit à un ordre d'intervalle.
- PROMETHEE IV est utilisée lorsque l'ensemble des solutions admissibles est un continuum.
- PROMETHEE V cette méthode a été conçue pour des choix multicritères avec contraintes de segmentation [HAMMAMI A. 2003].

Méthodes	Caractéristiques
PROMETHEE I	pré-ordre partiel (préférence stricte, indifférence et incomparabilité).
PROMETHEE II	Pré- ordre complet (indifférence et préférence stricte).
PROMETHEE III	Un ordre d'intervalle.
PROMETHEE IV	L'ensemble des solutions admissibles est un continuum.
PROMETHEE V	Choix multicritères avec contraintes de segmentation.

Tableau. 8 Tableau comparatif des méthodes PROMETHEE [AYADI D. et al 2010]

3.2.2 Les méthodes ÉLimination Et Choix Traduisant la REalité ELECTRE

Ces méthodes ont été développées par [ROY B. et al 1971]. Ils ont ainsi initialisés toute une série de méthodes, dites de surclassement basées sur des comparaisons d'actions deux à deux. Celles-ci demandent peu d'information pour pouvoir être implémentée, de plus cette information est facilement accessible au décideur, elle fournit donc des résultats solides.

-La méthode ELECTRE I : La procédure d'exploitation multicritère ELECTRE I relève de la problématique de choix ($P\alpha$), dans sa version initiale, est fondée sur deux notions de base : l'indice de concordance et l'indice de discordance [ROY B. 1990 b].

La méthode Electre I se présente comme suit :

-Etape 1 : A chaque couple d'actions (a_i, a_k); on associe l'indice de concordance suivant :

$$C(a_i, a_k) = \sum_{j: (s_j \geq s_k)} \pi_j, \quad \text{Avec} \quad \sum_{j=1}^n \pi_j = 1$$

-Etape 2 : A chaque couple d'actions (a_i, a_k); on associe l'indice de discordance suivant :

$$D(a_i, a_k) = \begin{cases} 0, & \text{si } \{j: e_{ij} < e_{kj}\} = \emptyset \\ \frac{1}{E} * \max_{\{j: e_{ij} < e_{kj}\}} |e_{kj} - e_{ij}| & \text{sinon} \end{cases}$$

E est l'étendue de la plus grande échelle associée à l'un des critères.

-Etape 3 : Construire les relations de surclassement : On conclut au surclassement de a_k par a_i si un test de concordance et un test de non discordance sont satisfaits :

$$\text{Si } (C(a_i, a_k) \geq c) \text{ et } D(a_i, a_k) \leq d) \Leftrightarrow a_i S a_k$$

c : est le seuil de concordance

d : est le seuil de discordance [ALMEIDA AT. 2005]

-Etape 4 : Exploiter les relations de surclassement : Cette étape consiste à déterminer le sous-ensemble d'actions N appelé noyau tel que toute action qui n'est pas dans N est surclassée par au moins une action de N et les actions de N sont incomparables entre elles [AZZABI L. et al 2008 b].

-La méthode ELECTRE II : La méthode ELECTRE II relève de la problématique de rangement ($P\gamma$) : elle vise à ranger les actions de la meilleure à la moins bonne.

La méthode ELECTRE II utilise le même indice de concordance que ELECTRE I. Toutefois, on associe trois seuils à cet indice ($0.5 < c_3 < c_2 < c_1 \leq 1$). L'indice de discordance ne change pas non plus dans sa définition (ELECTRE I), mais on le calcule pour chaque critère discordant, et on lui donne 2 seuils (2 seuils par critère : ($0 < d_{j1} < d_{j2} < E_j$)).

La méthode ELECTRE II se présente comme suit :

-Etape 1 : A chaque couple d'actions (a_i, a_k); on associe l'indice de concordance suivant :

$$C(a_i, a_k) = \sum_{j: (e_{ij} \geq e_{kj})} \pi_j, \quad \text{Avec } \sum_{j=1}^n \pi_j = 1$$

-Etape 2 : A chaque couple d'actions (a_i, a_k); on associe l'indice de discordance (par critère) suivant :

$$D(a_i, a_k) = \begin{cases} 0, & \text{si } e_{ij} \geq e_{kj} \\ e_{kj} - e_{ij}, & \text{si } e_{ij} < e_{kj} \end{cases}$$

-Etape 3 : Construire les relations de surclassement :

On conclut au surclassement fort de a_k par a_i ($a_i S^F a_k$) si un test de concordance et un test de non discordance sont satisfaits :

$$si \frac{\sum_{j:\Delta_j > 0} \pi_j}{\sum_{j:\Delta_j < 0} \pi_j} > 1 \text{ et } \begin{cases} si (C(a_i, a_k) \geq c_1) \text{ et } (D(a_i, a_k) \leq d_{j2}, \forall j) \\ ou (C(a_i, a_k) \geq c_2) \text{ et } (D(a_i, a_k) \leq d_{j1}, \forall j) \end{cases} \Rightarrow a_i S^F a_k$$

On conclut au surclassement faible de a_k par a_i ($a_i S^F a_k$) si les tests de concordance et de non discordance suivants sont satisfaits :

$$si \frac{\sum_{j:\Delta_j > 0} \pi_j}{\sum_{j:\Delta_j < 0} \pi_j} > 1 \text{ et si } (C(a_i, a_k) \geq c_3) \text{ et } (D(a_i, a_k) \leq d_{j2}, \forall j) \Rightarrow a_i S^F a_k$$

Si aucun des deux tests précédents n'est satisfait, alors on conclut à l'incomparabilité des actions a_i et a_k ($a_k R a_i$).

-Etape 4 : Exploiter les relations de surclassement :

On établit deux pré-ordres totaux P_1 et P_2 , ainsi qu'un pré-ordre partiel \bar{P} .

Le premier pré-ordre total P_1 est obtenu par « classement direct » en utilisant uniquement les surclassements forts : la première classe est celle des actions non surclassées ; La deuxième classe est celle des actions auxquelles aboutit un chemin de longueur 1, et ainsi de suite [AYADI D. et al 2008 c].

Le second pré-ordre P_2 est obtenu par « classement inverse » : on classe cette fois les actions en fonction de la longueur des chemins qui en sont issus. On utilise ensuite les surclassements faibles pour départager les actions à l'intérieur des classes.

Le pré-ordre \bar{P} est l'intersection de P_1 et P_2 [ROY B. et al 1971].

-La méthode ELECTRE III : La méthode ELECTRE III relève de la problématique de rangement ($P\gamma$). Son originalité réside dans le caractère flou de la relation de surclassement.

Pour chaque couple d'actions (a_i, a_k),

On détermine un degré de crédibilité du surclassement $S(a_i, a_k)$. Ce degré est compris entre 0 et 1 et il est d'autant plus grand que la solidité du surclassement de a_i sur a_k est importante.

La méthode ELECTRE III se distingue des méthodes ELECTRE I et II par l'exploitation de pseudo-critères : on peut alors se trouver dans une situation d'indifférence, de préférence faible ou de préférence stricte lors de la comparaison des écarts de préférence de deux actions selon un critère [PAPADOPOULOS A. et al 2008].

La méthode ELECTRE III se présente comme suit :

-Etape 1 : Calculer les indices de concordance

$$C(a_i, a_k) = \begin{cases} 1, & \text{si } -q_j \leq \Delta_j \\ \frac{\Delta_j + p_j}{p_j - q_j}, & \text{si } -p_j \leq \Delta_j \leq q_j \\ 0, & \text{si } \Delta_j \leq -p_j \end{cases}$$

Avec $\Delta_j = e_{ij} - e_{kj}$ et q_j, p_j sont les seuils de discrimination

-Etape 2 : Calculer les indices de discordance (par critère)

$$D_j(a_i, a_k) = \begin{cases} 0, & \text{si } -P_j \leq \Delta_j \\ \frac{\Delta_j + p_j}{v_j - p_j}, & \text{si } -v_j \leq \Delta_j \leq -P_j \\ 1, & \text{si } \Delta_j \leq -v_j \end{cases}$$

v_j : le seuil de veto du critère j .

-Etape 3 : Déterminer les degrés de crédibilité des surclassements qui permet de déterminer des relations de surclassement valuées $\in [0,1]$, pour toute paire d'actions $(a_i, a_k) : (a_i, a_k)$

$$\sigma(a_i, a_k) = \begin{cases} C(a_i, a_k), & \text{si } D_j(a_i, a_k) \leq C(a_i, a_k) \forall j \\ C(a_i, a_k) \cdot \prod_{j: D_j(a_i, a_k) > C(a_i, a_k)} \frac{1 - D_j(a_i, a_k)}{1 - C(a_i, a_k)}, & \text{si } \exists j: D_j(a_i, a_k) > C(a_i, a_k) \end{cases}$$

-Etape 4 : Exploiter les relations de surclassement à travers un rangement des actions. Pour ce faire, on varie le niveau de signification du degré de crédibilité et on procède à des distillations successives descendantes et ascendantes qui aboutissent à deux rangements (pré-ordre complet). L'intersection de ces deux rangements conduit à un rangement final (généralement partiel) [SHANIAN A. et al 2008].

-La méthode ELECTRE IV : Les conditions d'application d'ELECTRE IV sont identiques à celles d'ELECTRE III à la différence près que cette méthode ne tient pas compte des poids des critères. Cela peut être très utile dans les cas où il n'est pas possible de les déterminer de façon relativement précise, ou lorsque le décideur ne souhaite pas faire une différenciation entre les critères en terme d'importance. Dans ELECTRE IV, on évalue chaque paire d'actions selon chaque critère sans avoir à déterminer un indice de concordance ou un indice de discordance [SHANIAN A. et al 2006].

Il existe d'autres méthodes ELECTRE tel que :

-La méthode ELECTRE Is : La méthode Electre Is est très similaire à la méthode Electre I sauf qu'elle s'applique dans le cas où le problème porte sur des pseudo-critères. L'exploitation de la méthode Electre Is conduit à la détermination d'un noyau. On emploie toujours un indice de concordance mais cette fois appliqué à un critère à seuil. [HAMMAMI A. 2003]

-La méthode ELECTRE TRI: Les propriétés des critères d'ELECTRE TRI comprennent les poids w_k , un seuil de préférence P_k , un seuil d'indifférence S_k , et un seuil de veto Q_k .

Cette procédure d'exploitation portant sur la problématique de tri, mobilise un système de préférences qui n'a pas pour objectif de comparer les actions entre elles, mais à les comparer indépendamment les unes des autres à des actions de référence A_i^* ($i=1,2,\dots,n-1$) [LOURENÇO RP. et al 2004]. Les A_i^* sont des actions limites qui marquent les frontières successives qui séparent les catégories G_1, G_2, \dots, G_k auxquelles on veut affecter les actions A_i qui constituent une famille complètement ordonnée. Chaque alternative de référence A_i^* est définie par son vecteur des jugements $U^* = \{V_1^*, V_2^*, \dots, V_n^*\}$. Ce vecteur est appelé profil de référence ou profil limite [MOUSSEAU V. et al 2000].

3.2.3 Les méthodes basées sur la fiabilité: Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique (MACBETH)

La méthode MACBETH développée par [E COSTA CA. et al 1994] est une méthode multicritère de décision. Elle permet de traduire les jugements sémantiques énoncés par un décideur sur une échelle numérique à travers des comparaisons par des experts de différentes situations.

Le principe de la méthode est d'exploiter une expertise humaine sous forme de comparaisons. Par exemple, si l'expert préfère le choix A au choix B selon le critère i alors $P_i^A > P_i^B$. Cet ordre est transformé en informations quantitatives concernant les expressions de performances ($P_i^A = \dots P_i^B = \dots$). Une démarche similaire est menée pour déterminer les poids W_i de la moyenne pondérée, sur la base de la comparaison de projets particuliers, comme nous le verrons ultérieurement. [CLIVELLE V. et al 2006]

La méthode préconise une procédure structurée en 4 étapes principales schématisées comme suit :

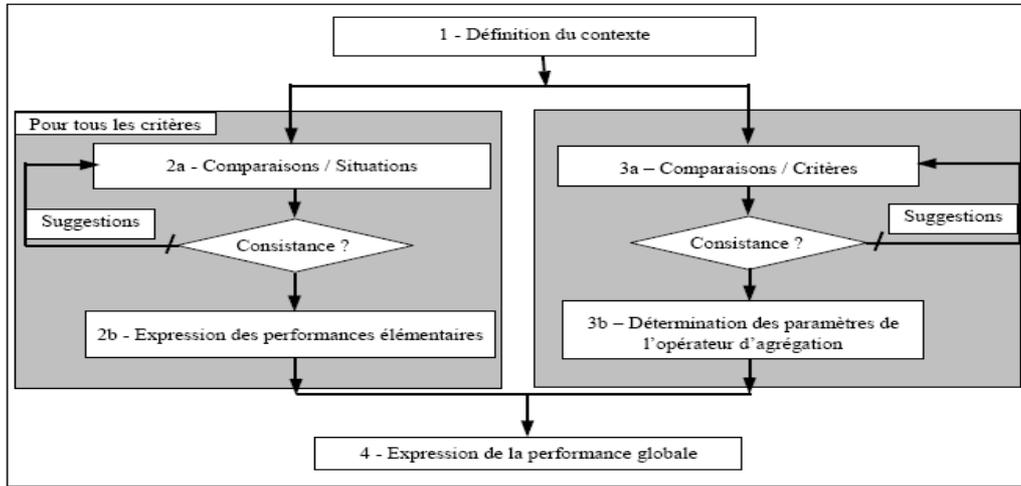


Figure. 52 La procédure MACBETH adaptée par [E COSTA CA. et al 1999]

Après une définition du contexte où sont retenus les critères et les situations envisagées (étape 1), la méthode permet aux experts de définir en parallèle les vecteurs d'expressions élémentaires (étape 2) et les paramètres de l'opérateur d'agrégation (étape 3). Lorsque ces 2 types d'information sont disponibles, MACBETH fournit les expressions de performance correspondantes (étape 4). Les experts peuvent revenir sur leurs comparaisons si des contradictions sont détectées (consistance) ou si les résultats obtenus ne les satisfont pas. [E COSTA CA. et al 2003]. La méthode MACBETH est en effet une procédure interactive qui consiste à demander au décideur de juger verbalement la différence d'attractivité entre deux actions x et y de S (avec x est plus attractive que y) en utilisant les catégories sémantiques suivantes

C_0	Différence d'attractivité est nulle .
C_1	Différence d'attractivité est très faible .
C_2	Différence d'attractivité est faible .
C_3	Différence d'attractivité est modérée .
C_4	Différence d'attractivité est forte .
C_5	Différence d'attractivité est très forte .
C_6	Différence d'attractivité est extrême .

Tableau. 9 Catégorie de jugement

Durant ce processus interactif, une matrice de jugements catégoriques sera construite. Par exemple si le décideur évalue les 6 actions A, B, C, D, E et F selon le critère Qualité, on aura une matrice à l'image de celle présentée ci-dessous.

Supposons que $X = \{A, B, C, D, E, F\}$ et que **J** ait formulé les jugements suivants :

Qualité	A	B	C	D	E	F
A	Nulle	Faible	Faible	Modérée	Modérée	Très forte
B		Nulle	Faible	Modérée	Extrême	Extrême
C			Nulle	Forte	Très forte	Extrême
D				Nulle	Très forte	modérée
E					Nulle	Très forte
F						Nulle

Tableau. 10 Matrice des jugements du décideur par rapport au critère qualité

La méthode MACBETH traite des informations semblables à celles récapitulées à la matrice des jugements ci-dessus. Elle associe un score à chacune des actions et fait en sorte que la différence des scores des actions D et E sont supérieure à la différence des scores des actions B et C. Par ailleurs, étant donnée la relation de préférence P et la matrice des jugements, MACBETH vérifie l'existence d'une échelle numérique Φ sur S qui satisfait les deux conditions suivantes : [HAMMAMI A. 2003]

• **Condition 1 : (Condition ordinale)**

$\forall x, y \in S : \Phi(x) > \Phi(y) \Leftrightarrow x$ est plus attractive que y .

•**Condition 2 : (Condition sémantique)**

$\forall k, k'$ appartenant au tableau des catégories sémantique , et \forall le choix de décideur soit x, y, w, z avec le couple de choix (x, y) qui appartient à C_k (catégories sémantique) et le couple (w, z) qui appartient à $C_{k'}$ (catégories sémantique) avec $k \geq k' + 1$ ce qui signifie que la différence entre l'échelle numérique de x et de y soit supérieur à la différence entre l'échelle numérique de w et de z .

En résumé : $\forall k, k' \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}, \forall x, y, w, z \in S$ avec $(x, y) \in C_k$ et $(w, z) \in C_{k'} : k \geq k' + 1 \Rightarrow \Phi(x) - \Phi(y) > \Phi(w) - \Phi(z)$

Si ces deux conditions ne sont pas satisfaites, alors les jugements sémantiques ne peuvent être représentés sur une échelle (intervalle) numérique. Dans ce cas, on dit que la matrice des jugements est incompatible avec la construction d'une échelle cardinale sur S . Les cas d'incompatibilité seront traités plus en détail au paragraphe intitulé « Traitement des cas d'incompatibilité ».

En revanche, si les conditions (1), (2) sont satisfaites, alors la matrice des jugements est dite consistante [AYADI D. et al 2009].

3.3 Les méthodes interactives

Une méthode interactive consiste en une alternance d'étapes de calculs et d'étapes de dialogues avec le décideur. Les méthodes interactives se distinguent des autres méthodes d'aide à la décision par le fait que le décideur contribue directement à la construction de la solution en intervenant dans la méthode et non seulement dans la définition du problème. Un grand nombre de méthodes interactives ont été proposées dans la littérature. Certaines ont joué un rôle important dans le développement de l'idée de l'interactivité, d'autre nous ont semblé représentatives des différentes voies que l'on peut adopter. Les méthodes interactives se distinguent des autres méthodes d'aide à la décision par le fait que le décideur contribue directement à la construction de la solution en intervenant dans la méthode et seulement dans la définition du problème [VINCKE P. 1976].

3.4. Procédure de choix d'une méthode d'aide à la décision multicritère

D'après l'étude des méthodes d'aide à la décision multicritère présentée aux paragraphes précédentes, nous constatons que ces méthodes se différencient par la façon de modéliser les préférences du décideur, la décision de pondérer ou non les critères ainsi que les attentes du décideur relatives aux résultats de l'application d'une méthode d'aide à la décision multicritère (rangement d'action, possibilité d'avoir des incomparabilité entre actions, ..). En d'autres termes, les méthodes d'aide à la décision multicritère se différencient par les informations utilisées à l'entrée (Input) et les résultats obtenus à la sortie (Output). Ainsi, la définition des inputs et des outputs permet de classer les méthodes d'aide à la décision multicritère, ce qui aidera à la conception d'une procédure de choix d'une méthode d'aide à la décision multicritère. En effet, cette idée est à la base de la classification des méthodes d'aide à la décision multicritère proposée dans [GUITOUNI A. et al 1999] et que nous retenons pour concevoir une procédure de choix d'une méthode d'aide à la décision multicritère. [GUITOUNI A. et al 1999] ont défini 24 inputs et 7 outputs. Ce qui correspond à une matrice de taille (24 x 7).

3.4.1 Caractérisation des inputs

Le tableau ci-dessous résume les différentes caractérisations des inputs proposés par [GUITOUNI A. et al 1999] :

Inputs	Signification
I1	n structures $\{P_j, I_j\}$ ($\{P_j$: relation de préférence stricte, Q_j : relation de préférence faible, I_j : relation d'indifférence}) de pré ordres.
I3	n structures $\{P_j, I_j\}$ de semi ordres et/ou structures $\{P_j, I_j, Q_j\}$ ($\{P_j, I_j, Q_j\} \equiv \{>, \sim, >^f\}$) de pseudo-ordres plus des seuils de veto v_j .
I4	n fonctions d'utilité (u_j) (d'utilité (valeur) partielle) exprimées sur des échelles intervalles.
I10	n structures $\{P_j, I_j\}$ de semi ordres et/ou structures $\{P_j, I_j, Q_j\}$ de pseudo-ordres et une relation de pré ordre complet (f) sur les attributs (critères).
I12	n fonctions d'utilité (u_j) (d'utilité (valeur) partielle) exprimées sur des échelles intervalles et une relation de pré ordre complet (f) sur les attributs.
I16	n structures $\{P_j, I_j\}$ de semi ordres et/ou structures $\{P_j, I_j, Q_j\}$ de pseudo-ordres plus des seuils de veto v_j définies sur des évaluations distributionnelles plus une relation de pré ordre complet (f) sur les attributs.
I17	n structures $\{P_j, I_j\}$ de pré ordres plus un vecteur de coefficients d'importance relative (Π) des attributs.
I18	n structures $\{P_j, I_j\}$ de semi ordres et/ou structures $\{P_j, I_j, Q_j\}$ de pseudo-ordres plus un vecteur de coefficient d'importance relative (Π) des attributs.
I19	n structures $\{P_j, I_j\}$ de semi ordres et/ou structures $\{P_j, I_j, Q_j\}$ ($\{P_j, I_j, Q_j\} \equiv \{>, \sim, >^f\}$) de pseudo-ordres plus des seuils de veto v_j plus un vecteur de coefficient d'importance relative (Π) des attributs.
I20	n fonctions d'utilité (u_j) (d'utilité (valeur) partielle) exprimées sur des échelles intervalles plus un vecteur de coefficient d'importance relative (Π) des attributs.
I21	n fonctions d'utilité (u_j) (d'utilité (valeur) partielle) exprimées sur des échelles ratios plus un vecteur de coefficient d'importance relative (Π) des attributs.
I24	n structures $\{P_j, I_j\}$ de semi ordres et/ou structures $\{P_j, I_j, Q_j\}$ de pseudo-ordres plus des seuils de veto v_j définies sur des évaluations distributionnelles plus un vecteur de coefficient d'importance relative (Π) des attributs.

Tableau. 11 Caractérisation des inputs

3.4.2 Caractérisation des outputs

Le tableau ci-dessous résume les différentes caractérisations des outputs proposés par [GUITOUNI A. et al 1999] :

Outputs	Signification
O1	Évaluation globale : cette situation traduit la volonté de construire un critère unique de synthèse. Le score global est de niveau cardinal.
O2	Un rangement global des actions en considérant un seuil d'indifférence : ($\{>, \sim\}$): une structure de semi ordre total) : l'introduction de seuils permet d'introduire des nuances ou limiter certaines conclusions (de surclassement) par exemple.
O3	Un rangement total des actions avec possibilité d'ex æquo : ($\{>, \sim\}$): une structure de pré ordre total) : l'objectif dans ce cas est souvent le rangement des actions de la meilleure à la moins bonne. Dans ce cas, toutes les actions sont comparables; il est possible de les discriminer.
O4	Un rangement partiel des actions en considérant l'incomparabilité : ($\{>, \sim, >^f, ?\}$) : une structure de pré ordre partiel qui signifie {Préférence forte, Indifférence, Préférence faible, incomparabilité}) : cet output reprend l'idée de l'output précédent tout en considérant qu'il est possible de ne pas pouvoir discriminer entre certaines actions : on accepte l'incomparabilité.
O5	Choix de la meilleure action : ou d'une classe d'équivalence des meilleures actions.
O6	Choix d'un sous-ensemble d'actions : parmi lesquelles se trouve(nt) la (les) meilleure(s) action(s).
O7	Tri ordonné : affecter les actions à des catégories pré-définies et ordonnées.

Tableau. 12 Caractérisation des outputs

3.4.3 Caractérisation des méthodes d'aide à la décision multicritère selon les inputs et les outputs

Les méthodes d'aide à la décision multicritère ont été placées dans les cases correspondantes de la matrice. Les résultats de cette classification sont présentés ci-après (**Tableau.13**).

Inputs	Outputs						
	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7
I1							
I2							
I3				ELECTRE IV			
I4							
I5							
I6							
I7							
I8							
I9							
I10							
I11							
I12							
I13							
I14							
I15							
I16							
I17				ELECTRE II	MACBETH	ELECTRE I	
I18			PROMETHEE II	PROMETHEE I			ELECTRE TRI
I19			EVAMIX	ELECTRE III		ELECTRE IS	
I20	MAUT TOPSIS		MAVT SMART UTA				
I21	AHP						

Tableau. 13 Classification des méthodes d'aide à la décision multicritère selon la matrice inputs/outputs

4. Les méthodes d'optimisation mathématique multicritère

Le problème d'optimisation mathématique multicritère est représenté par un ensemble de points. Cet ensemble de points est constitué par des solutions non dominantes, encore appelées optimales. Cela signifie que l'on ne peut pas améliorer l'un des critères d'optimisation sans détériorer au moins un autre.

Dans les problèmes d'optimisation multicritère, la démarche courante consiste à définir une combinaison, linéaire ou non, de tous les critères dans le but d'optimiser cette fonction. Cependant, pour des critères hétérogènes, il est très difficile de donner une combinaison de ces critères d'autant qu'une faible variation des poids accordés à ces différents critères, entraîne généralement des solutions assez différentes. Par ailleurs, le choix même des épreuves servant à l'estimation globale d'une solution est délicat. Pour un problème concret, établir des seuils, accorder des bonus suivant les performances d'une éventuelle solution, se fait par un jeu d'essais et une bonne solution suivant une telle formule d'agrégation des critères [STEUER RE. 1986].

4.1 La méthode de critère global

La méthode du critère global développée par VINCKE en 1989 s'articule dans une optique de minimisation des écarts par rapport à la solution idéale sans procéder à une articulation à priori des préférences. Sa formulation algébrique est la suivante :

$$\text{Min}_{\underline{x} \in A} \sum_{j=1}^n \left[\frac{g_j(\underline{x}^*) - g_j(\underline{x})}{g_j(\underline{x}^*)} \right]^r$$

Avec, $g_j(\underline{x}^*)$: est l'évaluation de la meilleure des solutions sur le critère j.

Si r est un entier pair, alors le décideur est indifférent par rapport aux écarts positifs et négatifs.

Si r est un entier impair, alors le décideur est sensible aux écarts positifs et négatifs [HAMMAMI A. 2003].

4.2 La Programmation Mathématique à Objectifs Multiples (PMOM)

La programmation mathématique à objectifs multiples développé par [STEWART S. et al 1991] est une technique qui prend en compte plusieurs fonctions économiques, chacune jouant le rôle d'un critère (on parle aussi de fonction critère). Chacune de ces fonctions possède un optimum, qui ne sera- en général - pas celui des autres fonctions. Ainsi, une solution optimale n'existe pas; car ce qui est optimal selon un critère ne l'est pas selon les autres critères. Il va donc falloir choisir une solution de compromis : solution jugée satisfaisante.

La formulation algébrique d'une programmation mathématique à objectifs multiples (PMOM) est la suivante : [HAMMAMI A. 2003]

$$\begin{aligned} & \underset{\underline{x}}{\text{Optimiser}} \underline{g}(\underline{x}) \\ \text{Sujet à : } & c_l(\underline{x}) \leq 0, l = 1, 2, \dots, L \\ & \underline{g} = \{g_1, g_2, \dots, g_n\} \end{aligned}$$

Dans un PMOM, on s'intéresse essentiellement à la détermination de l'ensemble des solutions efficaces.

4.3 ϵ - Constraint Method

La méthode du ϵ - Constraint développée par VANHENTENRYCK en 1989 consiste à transformer un programme d'optimisation multi-objectif en un problème d'optimisation mono-objectif comportant des contraintes supplémentaires. La formulation mathématique de la méthode est la suivante : [HAMMAMI A. 2003]

$$\begin{aligned} & \underset{\underline{x} \in A}{\text{Min}} g_1(\underline{x}) \\ \text{Sujet à : } & c_l(\underline{x}) \leq 0, l = 1, 2, \dots, L \\ & g_j(\underline{x}) \leq \epsilon_j, j = 2, \dots, n \\ & \epsilon_j \geq 0, j = 2, 3, \dots, n \end{aligned}$$

La méthode du ε - Constraint est facile à mettre en place. Elle exige de fixer un seuil de performance sur n-1 critères.

4.4 Compromise Programming(CP)

La technique compromise programming (CP) développée par ZELENY en 1973 s’articule autour d’une optique de minimisation des écarts par rapport à la solution idéale tout en procédant à une articulation a-priori des préférences (α_j). Sa formulation algébrique est la suivante :

$$\text{Min}_{\underline{x} \in A} \left[\sum_{j=1}^n \alpha_j^r \left[\frac{g_j(\underline{x}^*) - g_j(\underline{x})}{g_j(\underline{x}^*) - g_j(\underline{x}^*)} \right]^r \right]^{1/r}$$

Avec, $g_j(\underline{x}^*)$: est l’évaluation de la meilleure des solutions sur le critère j.

$g_j(\underline{x}^*)$: est l’évaluation de la pire des solutions sur le critère j.

Par sa définition, la fonction objective de la technique de compromise programming n’exige pas de normalisation des évaluations. En effet, les évaluations sont d’une certaine façon normalisées puisque la performance d’une action par rapport à un critère est divisée par le terme $g_j(\underline{x}^*) - g_j(\underline{x}^*)$, et par conséquent le terme $\frac{g_j(\underline{x}^*) - g_j(\underline{x})}{g_j(\underline{x}^*) - g_j(\underline{x}^*)}$ n’a pas d’unité [ANDRE F J. et al 2007].

4.5 Goal Programming(GP)

Le Goal Programming développée par [CHARNES A. et al 1961], compte parmi les modèles de la programmation mathématique à objectifs multiples les plus connus. Ce modèle permet de tenir compte simultanément de plusieurs objectifs dans une problématique de choix de l'action la plus satisfaisante, parmi un ensemble d'actions potentielles (ou l'ensemble des solutions admissibles) [CHANG CT. 2007]. Plus précisément, ce modèle consiste à trouver une solution qui minimise les déviations par rapport aux buts fixés par le décideur pour chaque objectif. Ces déviations peuvent être positives, dans le cas du dépassement du but, ou négatives, dans le cas contraire. De plus, le décideur peut attribuer une importance relative

aux différents types de déviations (écarts). La procédure d'agrégation des degrés d'atteinte de ces divers objectifs conflictuels, auxquels sont rattachées des unités de mesure de nature généralement différente, soulève quelques difficultés [AOUNI B. et al 2001].

La formulation du modèle standard du Goal Programming est comme suit :

$$\begin{aligned} & \text{Min}_{\underline{x} \in A} \sum_{i=1}^p (\delta_i^+ + \delta_i^-) \\ & \text{Sujet à : } C_1(\underline{x}) \leq 0, l = 1, 2, \dots, L \\ & g_i(\underline{x}) - \delta_i^+ + \delta_i^- = b_i, i = 1, 2, \dots, n \\ & \delta_i^+, \delta_i^- \geq 0 \end{aligned}$$

Avec : δ_i^+ : l'écart positif de \underline{x} par rapport au but.

δ_i^- : L'écart négatif de \underline{x} par rapport au but.

$g_i(\underline{x})$: L'évaluation de la solution x par rapport au critère i .

$C_1(\underline{x})$: système de contraintes relatives au problème.

Le produit des écarts positifs et négatifs ($\delta_i^+ \times \delta_i^-$) est toujours nul, car les vecteurs δ_i^+ et δ_i^- ne peuvent être actifs (c'est-à-dire une solution de base) simultanément. En d'autres termes, pour un objectif i quelconque, nous ne pouvons être en même temps en dessous (δ_i^-) et en dessus (δ_i^+) du but fixé g_i [JAHANSHAHLOO GR. et al 2008].

Dans le Goal Programming standard, le décideur est principalement appelé à fixer des buts pour les objectifs qu'il a préalablement déterminés. Son implication dans le processus décisionnel s'arrête en général à ce stade.

Le modèle du Goal Programming a connu plusieurs variantes. A titre d'indications, nous citons : le GP pondéré, le GP lexicographique, le GP minimax, le GP non linéaire, le GP incluant des fonctions de satisfaction, le GP avec intervalles, le GP flou, le GP interactif [KETTANI O. et al 2004].

4. 5.1 Goal Programming pondéré

La particularité du Goal Programming pondéré développée par [CHARNES A. et al 1977] consiste en l'introduction dans le Goal Programming standard de coefficients d'importance w_i . Le GP pondéré se présente ainsi sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \text{Min}_{x \in A} \quad & \sum_{i=1}^p (w_i^+ \delta_i^+ + w_i^- \delta_i^-) \\ \text{Sujet à: } & f_i(x) + \delta_i^- - \delta_i^+ = g_i, i = 1, 2, \dots, p \\ & x \in X \\ & \delta_i^+, \delta_i^- \geq 0 \end{aligned}$$

Où : w_i^+ et w_i^- représentent les coefficients d'importance relative attribués aux déviations positives et négatives respectivement.

Les coefficients de pondération w_i appliqués à chaque déviation jouent simultanément deux rôles : l'un de normalisation des différentes unités de mesure des objectifs et l'autre de valorisation de chaque objectif [KETTANI O. et al 2004].

Ainsi, dans le modèle du GP pondéré, les préférences du décideur sont introduites, en plus des buts, par le biais des coefficients de pondération w_i . Ces derniers permettent de révéler l'importance relative qu'accorde le décideur aux différents objectifs et jouent le rôle de compromis, c'est-à-dire combien le décideur est prêt à concéder d'un objectif au profit d'un autre objectif. Ces coefficients sont généralement fixés au tout début du processus décisionnel et le modèle du GP pondéré peut être ainsi classé avec les méthodes intégrant a priori les préférences du décideur [ROY B. et al 1996].

4. 5.2 Goal Programming lexicographique

La technique du Goal Programming lexicographique est une méthode développée par [IJIRI Y. 1965]. Dans la variante du Goal Programming Lexicographique, les objectifs sont classés par ordre de priorité, selon l'importance relative que leur accorde le décideur. La formulation mathématique correspondante à cette variante se compose d'un vecteur ordonné L des déviations relatives aux différents objectifs, qui implique une minimisation dans l'ordre des différents niveaux de priorité q [ROMERO C. 1991]. Le programme mathématique s'écrit comme suit :

$$\begin{aligned} \text{lex. Min. } L &= [l_1(\delta^-, \delta^+), \dots, l_q(\delta^-, \delta^+)] \\ &\quad \underset{x \in A}{\text{Sujet à:}} \quad f_i(x) + \delta_i^- - \delta_i^+ = g_i, i = 1, 2, \dots, p \\ &\quad \quad \quad x \in X \\ &\quad \quad \quad \delta_i^+, \delta_i^- \geq 0 \end{aligned}$$

Il est à préciser qu'à chaque niveau inférieur au premier niveau une nouvelle contrainte s'ajoute au système usuel des contraintes. Cette contrainte consiste en la valeur minimale obtenue pour tout niveau L_{q-1} à l'étape $q-1$. De plus, il est à noter que le nombre de niveaux de priorité q est inférieur ou égal au nombre d'objectifs p ($q \leq p$).

Un ordre lexicographique implique, non seulement un ordre de priorité mais un ordre restrictif, voire absolu, sur le premier niveau. En l'occurrence, c'est comme si on s'inscrivait dans une procédure de discrimination par rapport aux objectifs, la réalisation des objectifs appartenant à la première classe étant absolument prioritaire à la réalisation de ceux se situant à des niveaux inférieurs. En effet, en instituant ce que nous pouvons considérer comme des paliers, il est possible de limiter sensiblement l'effet de certains objectifs situés dans les niveaux inférieurs au premier niveau [ROMERO C. 2004].

Dans le Goal Programming lexicographique, les préférences du décideur peuvent être prises en compte dans le modèle par le biais de deux paramètres. Elles sont en premier lieu introduites par le biais des différents niveaux de priorité q composant le vecteur L . En deuxième lieu, dans les niveaux de priorité eux-mêmes, des coefficients d'importance (w_i) peuvent être assignés aux objectifs appartenant à chaque niveau de priorité. Généralement, dans le modèle du Goal Programming lexicographique les préférences du décideur, et donc l'ordre dans les objectifs qui en découle, sont établis a priori [RINGUEST JL. et al 1983].

4. 5.3 Goal Programming Minmax

La méthode du Goal Programming Minmax est développée par [FALVELL RB. 1976]. La fonction objective de cette variante Goal Programming Minmax consiste en la minimisation du maximum de la somme des déviations relatives aux différents objectifs. En d'autres termes, il s'agit de minimiser la déviation la plus importante et donc la moins appréciée par le décideur. La formulation mathématique du Goal Programming Minmax se présente généralement comme suit : [ROMERO C. 1991]

$$\begin{aligned} & \text{Min}_{x \in A} \sum_{i=1}^p (w_i^+ \delta_i^+ + w_i^- \delta_i^-) \\ \text{Sujet à: } & f_i(x) + \delta_i^- - \delta_i^+ = g_i, i = 1, 2, \dots, p \\ & w_i^- \delta_i^- + w_i^+ \delta_i^+ \leq Z, i = 1, 2, \dots, p \\ & x \in X \\ & \delta_i^+, \delta_i^- \geq 0 \end{aligned}$$

Où : Z représente la déviation maximale.

Une solution parfaitement équilibrée correspond à une solution où les écarts pondérés entre les valeurs idéales et les niveaux de réalisation des différents objectifs sont équivalents.

Cependant, [OGRYCZAK W. 2001] et [GANJAVI O. et al 2002] ont souligné et démontré que l'existence d'une solution parfaitement équilibrée n'est valable que dans certains cas bien précis et que par conséquent il n'est pas possible de généraliser, du moins pas avec la formulation proposée par [ROMERO C. et al 1998]. Le Goal Programming Minmax utilise à son tour des coefficients de pondération w_i pour introduire une information relative aux préférences du décideur. Il en ressort que cette variante peut être classée dans la catégorie des variantes s'appuyant essentiellement sur la modélisation a priori des préférences du décideur. Il s'agit principalement pour ce dernier de fixer les buts afin de déterminer les déviations, auxquelles des coefficients d'importance sont assignés, et d'en minimiser le maximum.

4. 5.4 Le Goal Programming incluant des fonctions de satisfactions

Afin de recentrer le rôle du décideur dans le processus décisionnel tout en remédiant aux difficultés liées à la procédure d'agrégation du modèle du Goal Programming, [MARTEL J. et al 1990] ont reformulé un modèle inspiré du concept de critère généralisé de la méthode PROMETHEE en développant le concept de fonction de satisfaction. Le modèle du Goal Programming incluant des fonctions de satisfaction permet de modéliser explicitement différents types de préférence du décideur. Ces fonctions sont établies conjointement avec le décideur qui peut les spécifier différemment en fonction de chaque but, et selon que la déviation soit négative ou positive. Par ailleurs, cette formulation du Goal Programming peut

être utilisée aussi bien dans les cas où les actions sont discrètes que dans les cas où elles sont continues[MARTEL JM. et al 1998].

Les fonctions de satisfaction $F_i(\delta_i^+)$ reflètent le degré de satisfaction du décideur à l'égard des déviations constatées entre les valeurs des buts fixées et celles obtenues par une solution donnée. Ces fonctions varient entre 0 et 1 et sont décroissantes par rapport aux déviations car elles varient inversement avec la valeur de ces déviations [CHERIF MS. et al 2008].

Type de fonction critère	Dans PROMETHEE	Paramètres à définir	Dans le GP	Définition analytique
I. Vrai critère		α_v		$F(\delta) = \begin{cases} 1, & \delta = 0 \\ 0, & 0 < \delta \leq \alpha_v \end{cases}$
II. Quasi-critère		α_d, α_v		$F(\delta) = \begin{cases} 1, & \delta \leq \alpha_d \\ 0, & \alpha_d < \delta \leq \alpha_v \end{cases}$
III. Critère à préférence linéaire		α_o, α_v		$F(\delta) = \begin{cases} 1 - \frac{\delta}{\alpha_o}, & \delta \leq \alpha_o \\ 0, & \alpha_o < \delta \leq \alpha_v \end{cases}$
IV. Critère à paliers		$\alpha_d, \alpha_o, \alpha_v$		$F(\delta) = \begin{cases} 1, & \delta \leq \alpha_d \\ \frac{1}{2}, & \alpha_d < \delta \leq \alpha_o \\ 0, & \alpha_o < \delta \leq \alpha_v \end{cases}$
V. Critère à préférence linéaire avec zone d'indifférence		$\alpha_d, \alpha_o, \alpha_v$		$F(\delta) = \begin{cases} 1, & \delta \leq \alpha_d \\ \frac{\alpha_o - \delta}{\alpha_o - \alpha_d}, & \alpha_d < \delta \leq \alpha_o \\ 0, & \alpha_o < \delta \leq \alpha_v \end{cases}$
VI. Critère (inverse) gaussien		δ, α_v		$F(\delta) = \begin{cases} e^{-\delta^2/2\sigma^2} & \text{si } \delta \leq \alpha_v \end{cases}$

Figure. 53 Fonction type satisfaction adaptée par [MARTEL J. et al 1990]

Le GP incluant des fonctions de satisfactions introduit différents seuils correspondant à des seuils de tolérance et de satisfaction du décideur. Ce type de seuils est au nombre de trois :

- des seuils d'indifférence (α_{id}) où sur un objectif i , le décideur est totalement satisfait tant que la déviation ne dépasse pas ce seuil;

- des seuils de satisfaction nulle (α_{i0}) où sur un objectif i , le décideur n'est pas réellement satisfait si la déviation associée à la solution atteint ce seuil, mais ne la rejette pas;
- et des seuils de veto (α_{iv}) qui rendent toute solution, dont au moins une déviation dépasse l'un de ces seuils, inadmissible [ROGHANIAN E. et al 2008].

Le programme mathématique, est reformulé comme suit :

$$\begin{aligned} & \text{Max}_{x \in A} \sum_{i=1}^p (w_i^+ F_i^+(\delta_i^+) + w_i^- F_i^-(\delta_i^-)) \\ \text{Sujet à: } & f_i(x) + \delta_i^- - \delta_i^+ = g_i, i = 1, 2, \dots, p \\ & x \in X \\ & \delta_i^+, \delta_i^- \geq 0 \\ & \delta_i^+, \delta_i^- \leq \alpha_{iv} \end{aligned}$$

Où : (F_i^+) , (F_i^-) représentent respectivement les fonctions de satisfaction relatives aux déviations positives et négatives par rapport à l'objectif i [AOUNI B. et al 2005].

Le modèle du Goal Programming avec les fonctions de satisfaction peut être aussi bien classé dans la catégorie des méthodes avec une articulation a priori des préférences du décideur, comme dans celle avec une articulation progressive de ces préférences. En effet, l'élaboration de telles fonctions peut se faire d'une façon évolutive et progressive, et ce pour refléter le plus fidèlement possible la structure de préférence du décideur. Ce dernier peut réviser à tout moment durant le processus décisionnel, les fonctions de satisfaction qu'il aura préalablement établies [KETTANI O. et al 2004].

4. 5.5 Le Goal Programming avec intervalle

Dans le modèle du Goal Programming avec Intervalles développée par [CHARNES A. et al 1976], les buts spécifiés pour les différents objectifs prennent la forme d'intervalles. Afin de modéliser cette variante, il est courant d'utiliser les fonctions de pénalité. Les fonctions de pénalité sont des fonctions linéaires ayant des pentes différentes et qui sont définies sur plusieurs intervalles. La figure suivante illustre la fonction de pénalité à cinq segment, L'intervalle central, représenté par $[g_c, g_d]$, est l'intervalle «cible», où aucune pénalité n'est

appliquée, le décideur étant satisfait des solutions se trouvant à l'intérieur de cet intervalle [ROMERO C. 2004].

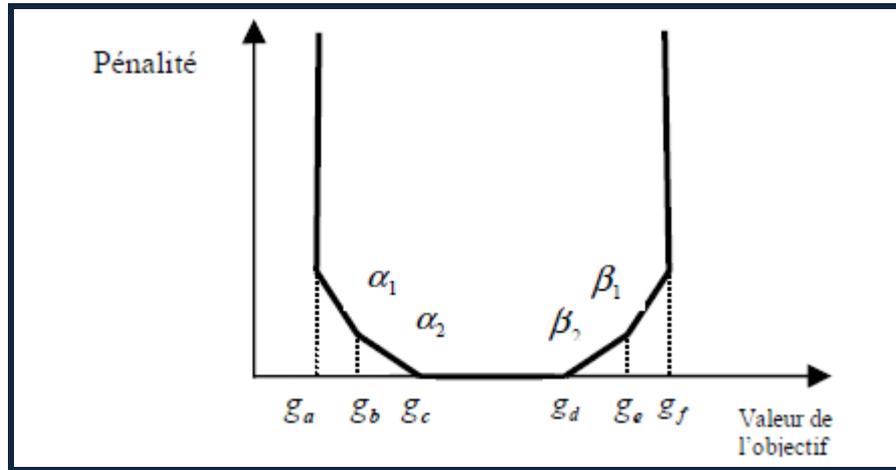


Figure. 54 Fonction de pénalité à 5 segments de forme U

Le programme mathématique, est reformulé comme suit :

$$\text{Min}_{x \in A} \alpha_1 \delta_{11}^- + \alpha_2 \delta_{12}^- + \alpha_3 \delta_{13}^- + \alpha_4 \delta_{14}^-$$

$$\text{Sujet à: } f_1(x) \leq g_f$$

$$f_1(x) + \delta_{14}^- - \delta_{14}^+ = g_e$$

$$f_1(x) + \delta_{13}^- - \delta_{13}^+ - \delta_{14}^+ = g_d$$

$$f_1(x) + \delta_{11}^- + \delta_{12}^- - \delta_{12}^+ = g_c$$

$$f_1(x) + \delta_{11}^- - \delta_{11}^+ = g_b$$

$$f_1(x) \geq g_a$$

$$\delta_{1j}^+, \delta_{1j}^- \geq 0, x \in X, j = 1, 2, \dots, 4$$

Par rapport au modèle du Goal Programming standard, les diverses formulations du Goal Programming avec intervalle permettent au décideur de considérer différemment les déviations négatives et positives relatives aux buts fixés dans le modèle [LIAO CN. 2008].

Le décideur est supposé ne pas avoir d'idée ou avoir une idée non précise sur la valeur des buts. Par conséquent, toutes les valeurs exprimées en termes d'intervalles doivent être traitées

de manière similaire et il n'y a pas de raison de favoriser les valeurs centrales comparativement aux autres valeurs.

Les formulations du Goal Programming avec intervalle à l'aide des fonctions de pénalité peuvent être classées dans la catégorie des méthodes avec intégration a priori de l'information fournie par le décideur dans le sens où celui-ci est généralement plus appelé à fixer ses buts qu'à introduire ses préférences plus tard dans le processus. Dans cette variante, l'information relative aux préférences du décideur est considérée être prise en compte par les différentes pentes des segments de droite définissant les pénalités. Ces paramètres sont généralement fixés a priori [AOUNI B. et al 2006].

4. 5.6 Le Goal Programming flou

Le modèle du Goal Programming Flou a été développé par [ZIMMERMANN HJ. 1978] pour modéliser l'imprécision relative à certaines situations décisionnelles, situations où le décideur ne peut attribuer que des valeurs vagues et approximatives aux buts [SELIM H. et al 2008].

Le programme mathématique, est reformulé comme suit :

$$\begin{aligned} & \underset{x \in A}{\text{Max}} \lambda \\ \text{Sujet à: } & \frac{f_i(x)}{\Delta_i} + \delta_i^- - \delta_i^+ = \frac{g_i}{\Delta_i}, i = 1, 2, \dots, p \\ & \lambda + \delta_i^- + \delta_i^+ \leq 1, i = 1, 2, \dots, p \\ & \lambda, \delta_i^-, \delta_i^+ \geq 0, x \in X, i = 1, 2, \dots, 4 \end{aligned}$$

Où Δ_i représente une constante de déviation par rapport aux buts g_i fixée par le décideur.

Cette fonction prend la forme triangulaire représentée dans la figure suivante :

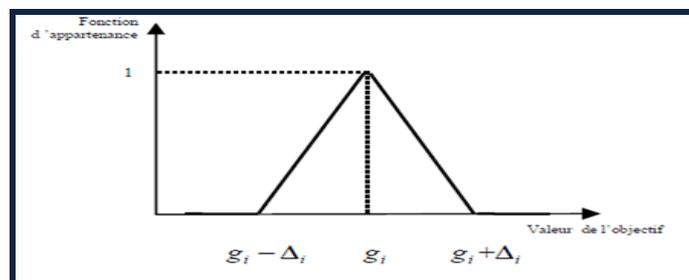


Figure. 55 Forme triangulaire de la fonction d'appartenance

Le développement du Goal Programming flou a permis de considérer une nouvelle façon de modéliser l'imprécision relative aux paramètres des contextes décisionnels. [TSAI KM. et al 2008] Cependant, le modèle du Goal Programming flou formulé de la sorte ne permet pas de modéliser plusieurs types de préférence du décideur.

La plupart des variantes du modèle du Goal Programming sont à l'origine des formulations avec une intégration a priori des préférences du décideur dans le processus décisionnel. En l'occurrence, ceci a constitué le fondement de l'une des critiques majeures adressées au modèle du Goal Programming [HANNAN EL. 1985]. Cependant, l'un des développements qu'a connu ce modèle est son utilisation basée sur une approche interactive.

4. 5.7 Le Goal Programming interactive

La variante du Goal Programming Interactif développée par [BENAYOUN R. et al 1971] correspond à l'utilisation du Goal Programming de façon interactive et ce de concert avec le décideur. Cette variante, où le décideur s'inscrit dans ce qui peut être qualifié comme un processus de continuité, permet de modéliser les préférences du décideur de manière progressive et itérative.

Le Goal Programming Interactif offre l'avantage de permettre au décideur d'être plus impliqué dans le processus décisionnel, et d'apprendre plus sur sa structure de préférence et sur les différents paramètres et possibilités relatifs à la situation décisionnelle.

[YANG JB. et al 1996] considèrent à ce propos que c'est une méthode basée sur un processus d'apprentissage tandis que [ZELENY M. 1982] considère que l'évolution même des préférences du décideur relatives à une situation décisionnelle donnée constitue en elle-même un processus d'apprentissage important qui doit être pris en compte. De même, nous considérons que ce type d'approche est basé sur un processus d'apprentissage et offre un cadre plus approprié pour une explicitation fiable des préférences du décideur. En l'occurrence, le processus décisionnel est enrichi par l'échange d'information entre ses différents acteurs et favorise ainsi l'instauration d'une véritable relation d'aide. De ce fait, le processus décisionnel s'apparente à un processus évolutif qui se construit et qui prend forme au fur et à mesure que cette relation évolue [PONGPENG J. et al 2003].

4.6 Procédure de choix d'une méthode d'optimisation mathématique

La méthode de résolution d'un problème de sélection formalisée sous la forme d'un modèle d'optimisation mathématique dépend du modèle obtenu (modèle linéaire, modèle linéaire mixte, modèle non linéaire, modèle de programmation mathématique à objectifs multiples...). Ainsi, on va utiliser la même matrice inputs/outputs proposé par [GUITOUNI A. et al 1999] pour le choix d'une méthode d'optimisation mathématique.

Inputs	Outputs						
	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7
I21	-La méthode du critère global -La programmation mathématique à objectifs multiples -La méthode du ϵ - Constraint programming -La technique compromise programming -Le Goal Programming						

Tableau. 14 Classification des méthodes d'optimisation mathématique selon la matrice inputs/outputs

5. Critiques des méthodes d'aide à la décision multicritères et d'optimisation mathématique multicritère

Les méthodes d'aide à la décision multicritère et d'optimisation mathématique multicritère constituent chacune des avantages et des inconvénients dans leurs applications et diffèrent selon le besoin d'utilisation, cependant elles permettent tout d'aider le décideur à faire un choix judicieux et une meilleure sélection.

5.1. Avantages et inconvénients des méthodes d'aide à la décision multicritère

Méthodes	Avantages	Inconvénients
TOPSIS	<ul style="list-style-type: none"> •L'apport de la méthode TOPSIS est l'introduction des notions d'idéal et d'anti-idéal. • Elle est facile à appliquer. 	<ul style="list-style-type: none"> •Les attributs doivent être de nature cardinale, les préférences sont fixées a priori. •Si toutes les actions sont mauvaises, la méthode propose la meilleure action parmi les mauvaises.
SMART	<ul style="list-style-type: none"> •La méthode SMART est facile à exploiter. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elle exige une articulation a- priori des préférences, et une évaluation des actions sur une échelle unique.
MAVT	<ul style="list-style-type: none"> •La méthode MAVT est très pratique pour les problèmes d'aide à la décision, les problèmes d'économie, de finance et d'actuariat. 	<ul style="list-style-type: none"> • C'est une procédure très exigeante de point de vue informationnel. Par ailleurs, la construction des fonctions de valeur n'est pas toujours une tâche évidente. •La construction de la fonction analytique V est une tâche ardue. •L'exploitation de la forme additive n'est possible que sous des hypothèques très restrictives du point de vue théorique.
MAUT	<ul style="list-style-type: none"> •La méthode MAUT permet les évaluations des actions par rapport aux attributs qui sont imprégnées d'incertitude (aléatoire). 	<ul style="list-style-type: none"> • C'est une procédure très exigeante de point de vue informationnel. Par ailleurs, la construction des fonctions de valeur n'est pas toujours une tâche évidente. •La construction de la fonction analytique V est une tâche ardue. • L'exploitation de la forme additive n'est possible que sous des hypothèques très restrictives du point de vue théorique.
UTA	<ul style="list-style-type: none"> •Dans UTA, les fonctions d'utilité partielles découlent toutes à la fois de la préférence globale exprimée par le décideur. 	<ul style="list-style-type: none"> •La méthode UTA exige des données cardinales, une articulation a-priori des préférences, une famille de vrai-critères. •UTA exige l'indépendance au sens des préférences.
AHP	<ul style="list-style-type: none"> •la méthode AHP permet la modélisation du problème de décision par une structure hiérarchique. •Elle utilise une échelle sémantique pour exprimer les préférences du décideur. 	<ul style="list-style-type: none"> •Un grand nombre d'éléments dans le problème de décision fait exploser le nombre de comparaisons par paires. •Le problème de renversement de rang (deux actions peuvent voir leur ordre de

Chapitre 3 : La décision multicritère

		<p>priorité s'inverser suite à une modification (ajout ou suppression d'une ou de plusieurs actions) de l'ensemble des actions.</p> <ul style="list-style-type: none"> •L'association d'une échelle numérique à l'échelle sémantique est restrictive et introduit des biais.
EVAMIX	<ul style="list-style-type: none"> •La méthode EVAMIX est facile à mettre en œuvre. -Elle a l'avantage de traiter les évaluations ordinales et cardinales. 	<ul style="list-style-type: none"> •La méthode EVAMIX exige une articulation a-priori des préférences, et une structure de préférence du type {P,I}.
PROMETHEE I	<ul style="list-style-type: none"> •La méthode PROMETHEE I construit une relation de surclassement valuée traduisant une intensité de préférence. 	<ul style="list-style-type: none"> •L'indifférence est en pratique très rare vu les nombreux calculs pour obtenir les flux.
PROMETHEE II	<ul style="list-style-type: none"> •La méthode PROMETHEE II construit un pré-ordre total excluant l'incomparabilité et réduisant fortement l'indifférence. 	<ul style="list-style-type: none"> •La méthode PROMETHEE II apparaît clairement comme une méthode d'utilité, les comparaisons 2 à 2 ne servant qu'à masquer le calcul du score final $\Phi(a)$ de chaque action.
PROMETHEE III	<ul style="list-style-type: none"> •La méthode PROMETHEE III introduit des seuils d'indifférence sur les flux, ce qui minimise les nombreux calculs pour l'obtention de ces flux. 	<ul style="list-style-type: none"> •Dans cette méthode les seuils d'indifférences n'ayant pas d'interprétation concrète pour le décideur, ils font l'objet de calculs statistiques qui rendent la méthode moins "accessible".
PROMETHEE IV	<ul style="list-style-type: none"> •La méthode PROMETHEE IV a un intérêt plutôt théorique et concerne des ensembles infinis d'actions. 	<ul style="list-style-type: none"> •La méthode nécessite le calcul d'intégrales au lieu de sommes.
ELECTRE I	<ul style="list-style-type: none"> •La méthode ELECTRE I est utilisée pour des problématiques de sélection. •Elle introduit la notion de noyau qui permet de restreindre le domaine de l'étude pour s'intéresser uniquement aux meilleures actions. 	<ul style="list-style-type: none"> •Elle exige de traduire les performances des actions en notes, ce qui suscite une gêne chez certains utilisateurs qui y voient une perte de maîtrise de leurs données.
ELECTRE II	<ul style="list-style-type: none"> •La méthode ELECTRE II relève des problématiques de classement. •Elle vise à classer les actions depuis les meilleurs jusqu'aux moins bonnes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Il est difficile de déterminer le pré-ordre partiel P car les rangs des actions bougent beaucoup entre le classement direct et le classement inverse. •Elle exige des évaluations cardinales et une articulation a priori des préférences.
ELECTRE III	<ul style="list-style-type: none"> • La méthode ELECTRE III relève des problématiques de classement. Le but est de classer les actions des meilleures aux moins bonnes. •L'originalité de cette méthode est d'admettre une part de flou dans les choix du décideur, et l'introduction d'un seuil véto. 	<ul style="list-style-type: none"> •Elle exige un grand nombre de paramètres techniques. •Elle est jugée trop complexe et parfois difficile à interpréter.
ELECTRE IV	<ul style="list-style-type: none"> •La méthode ELECTRE IV relève des problématiques de classement. 	<ul style="list-style-type: none"> •Elle exige un grand nombre de paramètres techniques.

	<ul style="list-style-type: none"> •Elle associe à chaque critère des seuils de préférences, mais l'originalité réside dans le fait de supprimer la pondération attachée à chaque critère. 	
ELECTRE Is	<ul style="list-style-type: none"> •La méthode ELECTRE Is est utilisée pour des problématiques de sélection. •Elle introduit la notion de noyau qui permet de restreindre le domaine de l'étude pour s'intéresser uniquement aux meilleures actions. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elle exige de traduire les performances des actions, ce qui suscite une gêne chez certains utilisateurs qui y voient une perte de maîtrise de leurs données.
ELECTRE TRI	<ul style="list-style-type: none"> •Relève des problématiques d'affectation. •Le but est de classer les actions qui seront proposées au décideur dans une des catégories prédéfinies. 	<ul style="list-style-type: none"> •Elle exige un grand nombre de paramètres techniques.
MACBETH	<ul style="list-style-type: none"> •La méthode MACBETH permet de combiner deux types d'information une information sur les préférences révélées par le décideur, une information sur l'importance des critères et leurs interactions, limitées aux paires de critères. 	<ul style="list-style-type: none"> •les échelles de la méthode MACBETH ne sont pas bornées. •Dans la méthode MACBETH, la détermination des constantes d'échelle suit le même processus que pour la détermination des échelles d'attractivité.

Tableau. 15 Les avantages et inconvénients des méthodes d'aide à la décision multicritère

5.2. Avantages et inconvénients des méthodes d'optimisation mathématique multicritère

Méthodes	Avantages	inconvénients
La méthode du critère globale	<ul style="list-style-type: none"> •La méthode du critère global a l'avantage d'avoir une fonction objective facile à formuler. •La normalisation des évaluations est faite implicitement par la définition même de la fonction objective. •La méthode du critère global n'exige pas une articulation a- priori des préférences. 	<ul style="list-style-type: none"> •Elle génère une solution médiocre si toutes les actions ne sont pas bonnes.
PMOM	<ul style="list-style-type: none"> •La méthode PMOM constitue un axe de recherche très porteur du domaine de la recherche opérationnelle et de l'analyse de la décision. 	<ul style="list-style-type: none"> •Elle exige une articulation a posteriori des préférences. •Le traitement d'un programme mathématique à objectifs multiples peut, à tort, nous paraître aisé.
ϵ- Constraint Method	<ul style="list-style-type: none"> •La méthode du ϵ - Constraint est facile à mettre en place. •Elle fixe le seuil de performance sur n-1 critères. 	<ul style="list-style-type: none"> •le principal inconvénient de cette méthode est le fait qu'elle soit gourmande en temps de calcul s'il y a trop de contraintes.
Compromise Programming	<ul style="list-style-type: none"> •Le compromise programming a l'avantage d'avoir une fonction objectif facile à formuler. 	<ul style="list-style-type: none"> •la résolution du modèle Compromise Programming peut être beaucoup plus difficile dans le cas où on dispose d'un ensemble de contraintes à respecter. •Le défaut du Compromise Programming est de proposer une action médiocre si toutes les actions ne sont pas bonnes.

		•Le Compromise Programming exige une articulation a- priori des préférences.
Goal Programming	<ul style="list-style-type: none"> •Le Goal Programming a l'avantage d'aborder les problèmes sous l'angle de satisfaction d'objectifs. •Le Goal Programming s'avère utile pour modéliser des problèmes qui n'ont pas de solution optimale. •un modèle Goal Programming qui permet de choisir l'action qui se rapproche le plus de ces souhaits. 	•Le Goal Programming dans sa forme standard peut générer des solutions non « performantes » dans le cas où les objectifs sur les critères sont fixés de façon pessimiste.

Tableau. 16 Les avantages et inconvénients des méthodes d'optimisation mathématique multicritère

5.3. Comparaison entre les méthodes d'aide à la décision multicritère et les méthodes d'optimisation mathématique multicritère

Dans le Tableau 17, nous récapitulons les différences entre les méthodes d'optimisation mathématique multicritère et les méthodes d'aide à la décision multicritère, et ce afin de servir de base au développement d'une procédure de choix d'une méthode de sélection.

Les méthodes d'optimisation mathématique multicritère	Les méthodes d'aide à la décision multicritère
•Il n'est pas nécessaire que les solutions soient connues a priori. Elles seront déterminées lors de l'application de ces méthodes et ce à l'étape de résolution.	•Ces méthodes s'appliquent à un ensemble de solutions (actions) connues a priori.
•Le nombre de solutions peut être fini ou infini.	•Le nombre de solutions est fini.
•Les évaluations des actions doivent être cardinales.	•Les évaluations des actions peuvent être ordinales, cardinales ou mixtes.
•Tous les critères sont du type vrai critère.	•Plusieurs types de critères peuvent être considérés (vrai critère, pseudo critère, quasi critère, ...)
•Dans leur version standard, ces méthodes ne traitent que les problèmes de choix. Toutefois, elles sont facilement adaptables pour traiter les problèmes de rangement ou de tri.	•Ces méthodes traitent des problèmes de choix, de rangement, et de tri.
•Les préférences du décideur peuvent être exprimées a priori ou a posteriori et ce selon la méthode.	•Les préférences du décideur peuvent être exprimées a priori ou a posteriori et ce selon la méthode.
•Le décideur intervient dans la définition du problème, ou après la résolution du problème. Il ne contribue pas à la construction des solutions.	•Le décideur contribue directement à la construction de la solution en intervenant dans la méthode et non seulement dans la définition du problème (ceci est vrai pour les méthodes interactives).
•Les méthodes d'optimisation mathématique multicritère permettent la résolution et la sélection simultanément.	•Les méthodes d'aide à la décision multicritère ne permettent que la sélection d'une solution parmi plusieurs.

Tableau. 17 Tableau comparatif des méthodes d'optimisation mathématique multicritère et des méthodes d'aide à la décision multicritère [HAMMAMI A. 2003]

Conclusion

L'activité d'aide à la décision est une activité faite par tous presque chaque jour. Nous prenons des décisions sans arrêt. Des plus simples, aux plus complexes, à tous les niveaux individuels.

Assez souvent, dans ces processus de décision nous demandons l'avis, l'aide, le support d'ami(e)s, d'experts, de sociétés de conseil, etc. Ce qui caractérise l'aide à la décision à la fois comme activité scientifique et comme activité professionnelle est son approche qualifiée de « formelle : langages pour réduire l'ambiguïté de la communication humaine » et « abstraite : langages indépendants du domaine de discours ». Techniquement, l'aide à la décision multicritère est développée pour traiter plusieurs classes de problèmes de décision (choix, tri, classification, rangement...) tout en considérant plusieurs critères (attributs), souvent conflictuels et non commensurables, tout en cherchant à modéliser au mieux les préférences et les valeurs du ou des décideurs. Ce chapitre a présenté la problématique d'aide à la décision et plus particulièrement l'analyse multicritère d'aide à la décision, son processus de réalisation, ainsi que les différentes méthodes de modélisation d'un problème multicritère telqu'elles soient des méthodes d'analyses et ou d'optimisation multicritère.

Par suite, la méthode du goal programming est une méthode de programmation mathématique multicritère qui se base sur la transformation d'un problème multiobjectif en un problème uniobjectif, et ceci afin d'aboutir à une solution d'optimalité en introduisant explicitement les différentes préférences du décideur sous forme des fonctions de satisfactions.

Chapitre 4:

MODELE D'OPTIMISATION MULTICRI TERE DE LA FIABILITE

Sommaire

INTRODUCTION	158
1. Problématique d'optimisation de la fiabilité	158
1.1. Optimisation multicritère	159
1.2. Les conditions d'optimisation multicritère	160
1.3. Les problèmes d'optimisation multicritère	161
1.3.1 Constraints satisfaction problem (CSP)	162
1.3.2 Les solutions de Constraints satisfaction problem	162
1.3.3 Représentation de Constraints satisfaction problem	163
1.4. L'optimisation multicritère pour l'aide à la décision	164
2. modèle d'optimisation de la fiabilité humaine	166
2.1. Analyse de l'existant	169
2.2. Identification des dangers	172
2.3. Identification des risques	175
2.4. Classement des risques	177
2.5. Optimisation de la fiabilité humaine	180
2.6. Suivi et contrôle	183
CONCLUSION	186

Introduction

L'application de l'aide à la décision face aux risques au sein des organisations, nécessite une synergie d'efforts de plusieurs membres ayant différents intérêts, compétences et expériences afin que chacun d'eux mette à contribution son savoir-faire. D'ailleurs, c'est grâce à cette synergie que les membres peuvent atteindre des résultats supérieurs à ceux qu'ils auraient pu réaliser individuellement. Pour l'ensemble de ces raisons, plusieurs travaux de recherches ont été entrepris pour améliorer le fonctionnement et la performance des groupes dans la résolution d'un problème de décision. Ces travaux ont essayé d'une part, de structurer ce processus en différentes étapes et d'autre part, d'élaborer un ensemble d'outils et de méthodes permettant à un groupe d'individus de progresser dans la résolution d'un problème de décision afin d'aboutir à la réalisation de l'optimalité.

Nous présentons donc, dans ce chapitre, l'importance de la problématique d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine, et plus particulièrement dans l'industrie de traitement de Gaz, tous en identifiant les différents acteurs et réglementations du système de régulation des risque dans cette industrie. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous illustrons, la détermination de notre modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine sous l'initiative d'une minimisation des risques.

1. Problématique d'optimisation de la fiabilité

Les besoins en optimisation sont multiples et recouvrent des enjeux souvent considérables. Dans le domaine de la fiabilité, cette optimisation cherche à améliorer la robustesse des produits aux aléas (défaillances, erreurs humaines...). Aussi, l'évaluation de la fiabilité n'est plus considérée comme une simple étape de vérification contractuelle, mais est utilisée à des fins d'optimisation pour garantir la disponibilité du service rendu à l'utilisateur final au moindre coût.

1.1 Optimisation multicritère

Le cadre de l'optimisation semble inadapté aux problèmes comportant des contraintes multiples et fortes ou qui ne vérifient pas les conditions d'optimisation, il ne se limite pas non plus aux problèmes de grande taille ou peu de contraintes (offrant un large choix de solutions). Cependant, les problèmes réels comportent couramment des contraintes importantes dont la violation risque de rendre la solution inapplicable dans la réalité et le processus de satisfaction est souvent plus important que la tâche d'optimisation elle-même.

L'optimisation multicritère consiste à trouver une bonne solution répondant à des critères d'évaluations et satisfaisant un ensemble restreint de contraintes, en un temps de calcul raisonnable. Elle fait intervenir une fonction d'optimisation représentée souvent sous une forme mathématique censée traduire les objectifs du problème, l'expression des objectifs sous forme d'une fonction de coût ou de profit est une tâche délicate à cause de la divergence entre la réalité et la simulation. Dans la pratique, les problèmes d'optimisation peuvent atteindre rapidement une grande complexité et nécessitent des temps de calcul considérables à cause de l'explosion multicritère du nombre de solutions potentielles [JAZIRI W.2004]

L'optimisation multicritère est menée au niveau du système complet, et non plus de ses seuls constituants, et porte sur les différentes phases du cycle de vie du produit afin de minimiser le coût global d'acquisition (développement, mise en place, opérations, maintenance, retrait de service...). L'optimisation multicritère porte principalement sur l'architecture, la mise en œuvre et la maintenance des produits. Mais la complexité croissante de ces derniers nous oblige à améliorer nos outils d'évaluation et à faire appel à des techniques d'optimisation plus sophistiquées issues des domaines de la recherche opérationnelle ou de l'intelligence artificielle [KURSAWE F. 1991].

Selon [STUEUER RE. 1986] et [SOLAND RM. 1979], l'optimisation multicritère représente une extension à la notion d'optimisation classique dont le domaine se limite aux problèmes cherchant à améliorer un critère unique. Le choix de la meilleure solution se base sur l'évaluation parallèle de plusieurs critères d'optimalité. D'une façon générale, le traitement de l'aspect multicritère peut suivre trois orientations :

-Prendre en compte un seul critère(le plus important) et transformer les autres critères sous formes de contraintes et /ou d'heuristiques.

-Rassembler les différents critères dans la même fonction F ce qui revient à ramener les critères à un seul par sommation ou moyenne pondérée, le choix des poids traduit l'importance de chaque critère.

-Prendre en compte les différents critères séparément et tenter de trouver un compromis vérifiant leur optimisation.

La principale conséquence de l'utilisation intensive de l'optimisation dans des domaines différents est qu'il existe actuellement un grand nombre de méthodes ayant chacune ses mérites et ses limitations, et dont la performance dépend du problème étudié [DUCHAINE F. 1991].

1.2 Les conditions d'optimisation multicritère

Le cadre d'optimisation multicritère se révèle parfois inefficace face à des problèmes où aucun optimum ne peut être dégagé. En effet, l'existence de cet optimum peut être conditionnée par trois contraintes : [ROY B. 1981]

-L'exclusivité mutuelle : qui présume que toutes les solutions potentielles sont mutuellement exclusives deux à deux. Cette condition permet d'assurer qu'une solution peut être choisie au détriment de toutes les autres solutions. Néanmoins, dans certains problèmes de rangement ou de tri, l'intérêt est plutôt porté sur la conservation des ensembles de solutions satisfaisantes non exclusives entre elles. Dans de-tels cas, les alternatives possibles ne peuvent être modélisées sous forme d'alternatives deux à deux mutuellement exclusives. Ce genre de problème consiste donc à raisonner sur des alternatives compatibles pouvant être choisies simultanément et entre plutôt dans le cadre de l'aide à la décision.

-L'exclusivité des solutions explorées et considérées : le terme exhaustivité ne reflète pas ici la définition usuelle de recherche exhaustive souvent utilisée en optimisation et qui désigne la recherche de toutes les solutions possibles et donc l'exploration de tout l'espace de recherche. L'exhaustivité désigne ici l'ensemble des solutions relativement aux quelles l'optimum sera défini (l'espace de recherche exploré), les solutions doivent être réparties dans l'espace de recherche exploré, de façon définitive entre admissibles et inadmissibles ou prise en compte et ignorées. Les solutions non explorées ou non intéressantes (non admissibles) dans l'espace exploré sont ignorées. La recherche de l'optimum s'effectue en comparant les solutions admissibles et prises en compte, cet ensemble doit être clairement délimité et ne doit

jamais être remis en cause lors du processus d'optimisation. L'introduction d'une nouvelle solution ignorée précédemment, à cet ensemble implique nécessairement la perte de la validité de l'optimum trouvé.

-La structure de pré-ordre complet : cette condition postule la possibilité de désigner de façon nette et précise une solution unique comme la meilleure parmi toutes les solutions potentielles. Cette condition peut être décomposée en deux sous conditions :

- **Le pré-ordre partiel :** qui suppose que deux solutions sont nécessairement comparables. En effet, les évaluations des décideurs peuvent exprimer des relations binaires de préférence, d'indifférence ou de non comparabilité entre les solutions. La condition de pré-ordre partiel exclut la relation de non comparabilité. Deux types de relations sont donc possibles entre deux solutions : la préférence stricte (a est strictement préféré à b ou inversement) ou l'indifférence.
- **La complète transitivité :** les préférences des décideurs sur les solutions doivent être complètement transitives, a est meilleurs que c [TVERSKY A. 1969].

Cette 3^{ème} condition est rarement vérifiée en présence de critères multiples (la condition de pré-ordre partiel n'est pas vérifiée) et notamment en présence du facteur humain (la condition de complète transitivité est rarement respectée). Dans ce dernier cas, le décideur préfère a sur b , b sur c mais pas forcément a sur c .

1.3 Les problèmes d'optimisation multicritère

Dans un problème d'optimisation multicritère, il n'y a pas une solution optimale unique, mais un ensemble de solution potentielle car en générale aucune solution n'est la meilleure vis-à-vis de tous les critères simultanément, on identifie alors un ensemble de solutions non dominées [MARCO N. et al 1999].

1. 3.1 Constraints satisfaction problem(CSP)

Le domaine d'affectation s'intéresse aux problèmes faisant intervenir des contraintes fortes et multiples. Il est souvent utilisé pour chercher une solution, la meilleure solution ou l'ensemble des solutions satisfaisant toutes les contraintes, à l'aide des méthodes exactes qui représentent le cadre naturel pour la résolution de cette classe de problèmes, appelé satisfaction des problèmes sous contraintes (CSP : Constraints Satisfaction Problem).

Un Constraints Satisfaction Problem est défini par un ensemble fini de variables, chacune pouvant prendre une valeur dans un domaine fini de valeurs qui lui est associé [FREEMAN BN. et al 1990], [FREUDER E. et al 1989], [JUSSIEN MN. 1997] à des contraintes portant sur des sous-ensembles de variables représentant des conditions à satisfaire et restreignent l'ensemble des valeurs pouvant être affectées simultanément à ces variables. Plus formellement, un Constraints Satisfaction Problem est défini par le triplet $\langle X, D, C \rangle$:

$X : \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$, ensemble des n variables du problème,

$D = \{dom(x_i) \mid x_i \text{ ensemble de } X\}$, ensemble des n domaines associés aux variables,

$C : \{c_1, c_2, \dots, c_j, \dots, c_m\}$, ensemble des m contraintes spécifiant les combinaisons de valeurs mutuellement compatibles.

1. 3. 2 Les solutions de Constraints satisfaction problem

Selon les besoins de l'application, la résolution d'un problème de satisfaction sous contraintes consiste à trouver une solution, l'ensemble des solutions et ou la meilleure solution. Il s'agit dans ce derniers cas de problème mixte de satisfaction et d'optimisation. Les problèmes servons à traiter les problèmes d'optimisation faisant intervenir des contraintes fortes et peut donc être considéré comme une extension des problèmes de satisfaction sous contraintes avec une fonction à optimiser relative à une évaluation numérique de chaque solution.

Certains problèmes ne sont pas assez contraints et offre un large choix de solutions. Il est donc nécessaire de donner un supplément d'information pour orienter le choix d'une solution. Ces informations peuvent être assimilées à des préférences du système et permettent ainsi de guider la résolution du problème. Nous distinguons trois formes de préférences :

- Un complément d'information sur les données d'entrée,
- Un contrôle sur le mécanisme de résolution,

-Un critère de sélection appliqué sur les solutions produites.

Une solution potentielle du problème consiste à affecter à chaque variable une valeur de son domaine. L'ensemble des solutions potentielles est donc représenté par le produit cartésien des domaines des variables. Une évaluation (ou une instantiation) d'un problème de satisfaction sous contrainte est l'affectation de valeurs aux variables. Une instantiation est dite consistante si elle satisfait toutes les contraintes portant sur ses variables. Une solution d'un problème de satisfaction sous contrainte peut donc être vue comme une instantiation consistante de toutes les variables du problème. Une instantiation d'un ensemble de variable $V \subseteq X$ est dite partielle si $V \neq X$ et complète, sinon ($V = X$) [JAZIRI W. 2004].

1. 3. 3 Représentation de Constraints satisfaction problem

La structure de graphe de contraintes (appelé parfois réseau de contraintes), constitue un cadre naturel pour représenter les problèmes faisant intervenir des contraintes. Un graphe est constitué par un ensemble de nœuds et d'arcs ; les nœuds représentent les étapes à parcourir (problème à résoudre), et les arcs expriment les règles de passages entre ces nœuds (l'ordre de résolution des problèmes). Formellement, un graphe prend la forme $\langle N, A \rangle$, où N est l'ensemble de nœuds et $A \subseteq N \times N$, est un ensemble d'arcs reliant les nœuds.

La façon la plus simple pour représenter un Constraints Satisfaction Problem binaire, consiste à exprimer une variable par un nœud, et une contrainte par un arc. Comme illustré dans la figure ci-dessous :

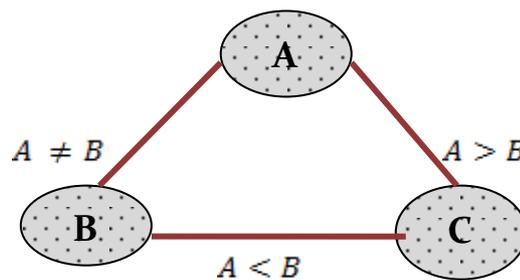


Figure. 56 Représentation de 3 variables (A, B, C) et les 3 contraintes ($A \neq B$, $A > B$, $A < B$)

Ainsi, la notion de graphe reste un moyen générique de représentation applicable à de nombreuses situations. Plusieurs travaux ont montré qu'il est possible de convertir un Constraints Satisfaction Problem jusqu'à n variables (contraintes reliant jusqu'à n variables),

en Constraints Satisfaction Problem binaire équivalent [BACCHUS F. et al 1998], [BESSIERE C. 1999], [SMITH B. et al 2000] et [STERGIOU K. et al 1999]. Cette possibilité d'exprimer des contraintes supérieures à 2 en termes de contraintes binaires est importante du point de vue théorique puisqu'elle permet de se restreindre au cas de Constraints Satisfaction Problem binaire. La convention d'un Constraints Satisfaction Problem à n variables à un Constraints Satisfaction Problem binaire est basée sur l'introduction de nouvelles variables liées par des contraintes. on filtre les variables liées par des contraintes. Les nouvelles variables introduites ont pour domaine le produit cartésien des domaines des variables individuelles filtrées.

1.4 L'optimisation multicritère pour l'aide à la décision

L'aide à la décision consiste à assister les décideurs et les aider à mieux exprimer leurs choix et préférence vis-à-vis d'une situation donnée. Selon [ROY B. 1990 c] la bonne décision est un construit. C'est pourquoi la démarche à suivre n'est pas une démarche de découverte mais une démarche de construction [COURBON JC. 1993].

Ainsi, la tâche d'optimisation multicritère n'est pas tout à fait écartée dans les démarches d'aides à la décision et peut servir entant que technique de progression vers l'obtention d'éléments de réponse ou la construction de la décision.

[ROY B. 1990 c] ajoute que les calculs d'optimisation restent fondamentaux pour éclairer des décisions. La démarche d'optimisation multicritère est très efficace pour apporter des éléments d'analyse et de réponse.

La figure ci-dessous, récapitule l'interaction entre l'optimisation multicritère et l'aide à la décision, ainsi que la complémentarité entre les techniques multicritères de résolution des problèmes.

Les décideurs expriment leurs besoins qui reflètent les objectifs à atteindre et les contraintes à respecter. En fonction de ces besoins, le problème se formalise comme un problème multicritère où il y a des contraintes à respecter. Ainsi l'utilisation des outils multicritères d'aide à la décision permet au décideur d'établir un compromis entre tous les critères afin d'aboutir à la réalisation de la résolution optimale.

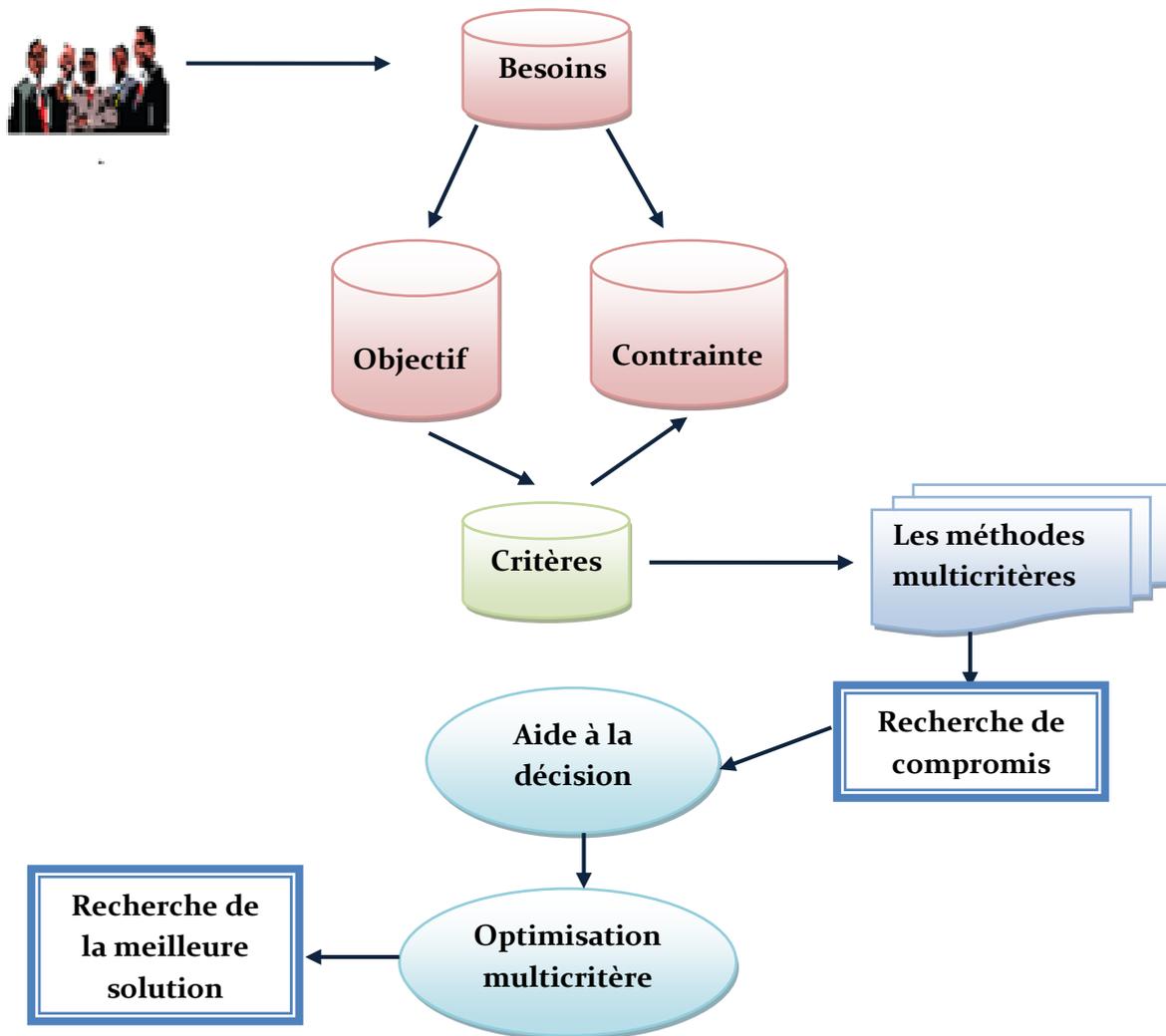


Figure. 57 Dépendance entre optimisation multicritère et aide à la décision

L'approche multicritère privilégie la notion de consensus. Son objectif est d'aboutir à une ou plusieurs solutions satisfaisantes au regard de la majorité des critères et encore acceptables par la minorité restante.

Les multiples décisions prises au sein du système entrpris ne sont pas toutes de même portée. Evidement, les décisions exceptionnelles ne sont pas traitées de la même façon que les décisions répétitives. C'est pourquoi les chercheurs en sciences de la décision ont établi des typologies permettant d'identifier et de traiter au mieux chaque décision que le décideur est amené à prendre.

L'aide à la décision n'a pas pour ambition d'établir des vérités objectives mais vise plus modestement à assesoir sur des bases dites scientifiques, faisant référence à des hypothèses de travail, des énoncés de propositions qu'elle soumet au discernement d'un décideur et ou de divers acteurs engagés dans le processus de décision. L'aide à la décision ne prétend pas être une science de la décision, mais se veut être une science d'aide à la décision, elle se définit comme l'activité de l'homme d'étude visant à éclairer la décision par une recommandation formulée auprès des décideurs, mais aussi à améliorer la cohérence entre l'évolution du processus décisionnel, les objectifs et le système de valeur des acteurs qui s'y insèrent.

2. Modèle d'optimisation de la fiabilité humaine

Dans cette partie nous avons développé à partir de notre recherche un modèle d'optimisation de la fiabilité humaine sous l'initiative de minimisation des risques professionnels.

Ce modèle proposé se base sur les rapprochements du support théorique représenté dans le chapitre 2 et aussi sur les expérimentations que nous avons menées et s'articule autour de principes qui s'appliquent tout au long des différentes étapes et phases constituant notre proposition.

Ainsi, nous présenterons tout d'abord les étapes du processus en insistant sur leurs objectifs, puis nous présenterons les 6 principes de base de notre méthode.

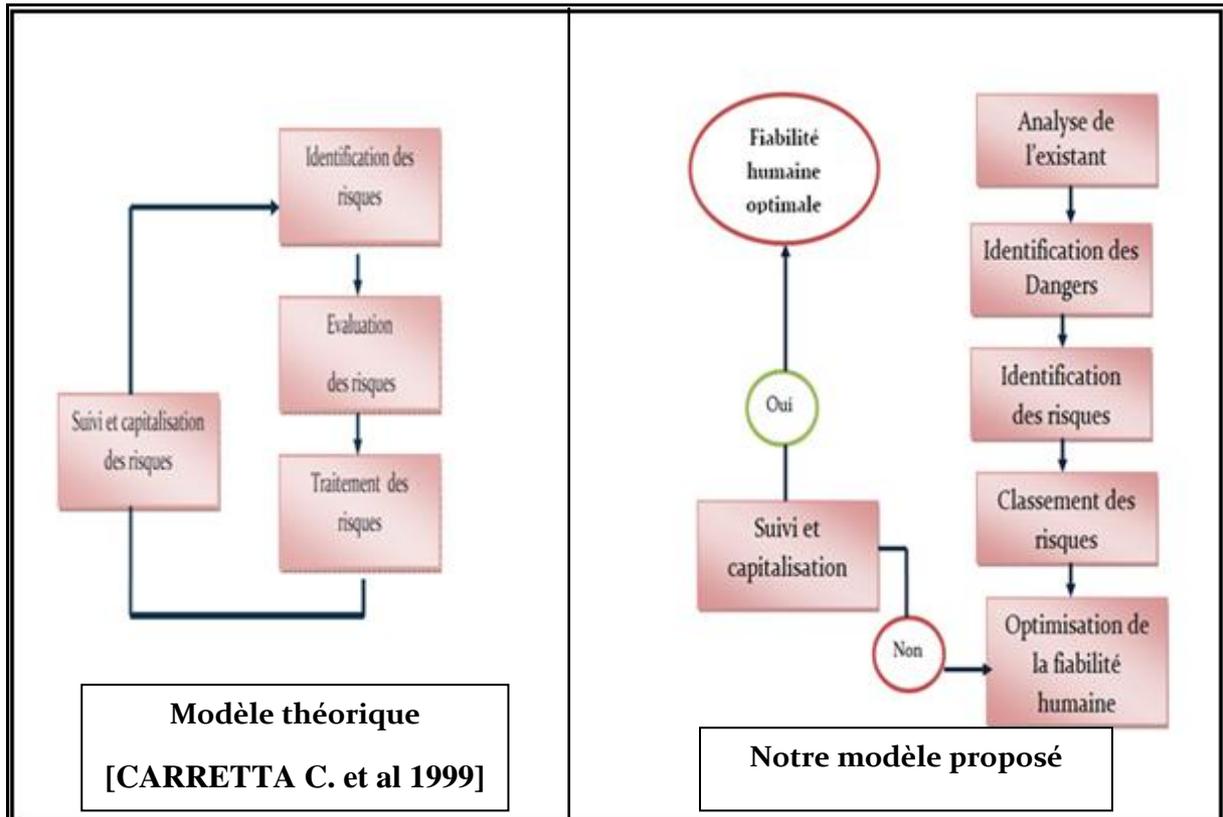


Figure. 58 Développement de la proposition méthodologique

Ainsi, notre modèle proposé «Optimisation de la fiabilité humaine sous l'initiative de minimisation des risques professionnels » est composé de six phases successives. La première phase, dite Analyse de l'existant, est une étude expérimentale et diagnostic du nombre de risque dans les sites de travail. La seconde phase, dite Identification des dangers, est une étude de danger du système et de son environnement. La troisième phase, Identification du risque est une phase de caractérisation des risques principaux par l'intermédiaire d'identification des relations dangers/risques. La quatrième phase est la Classification des risques qui sont organisés sous la forme d'une hiérarchie, de manière à représenter un modèle analytique du risque global lié au système étudié. La cinquième phase, dite Optimisation de la fiabilité humaine, permet de modéliser un système de minimisation des risques identifiés précédemment afin d'aboutir à la réalisation de la satisfaction du décideur par la création des fonctions de satisfactions. La sixième phase est une phase de suivi et capitalisation des résultats optimaux réalisés.

Chapitre 4 : Modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité

Dans la figure qui suit, nous présentons les correspondances entre nos expérimentations, nos hypothèses de recherche et les différentes étapes du modèle que nous proposons.

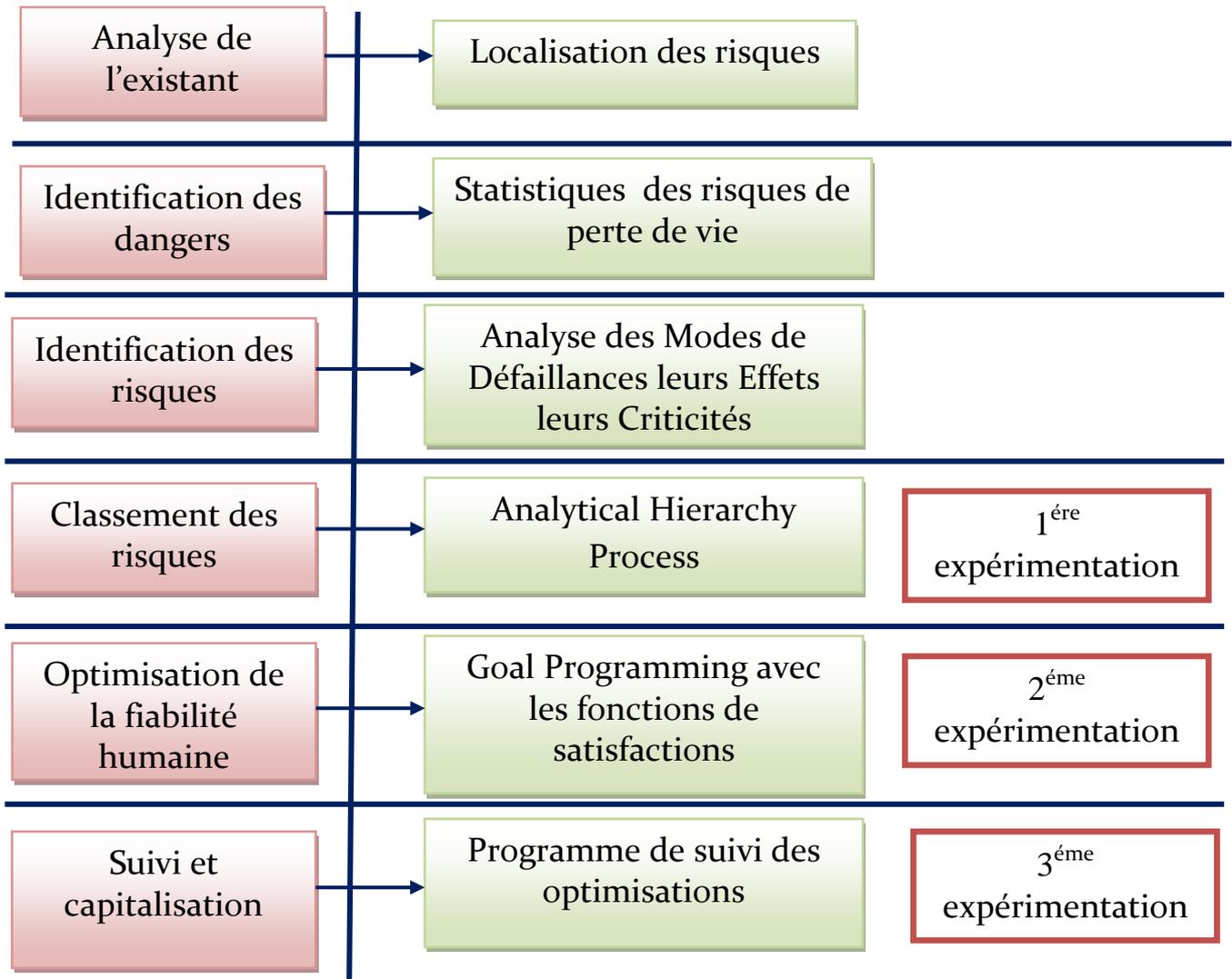


Figure. 59 Les expérimentations dans notre modèle proposé

2.1 Analyse de l'existant

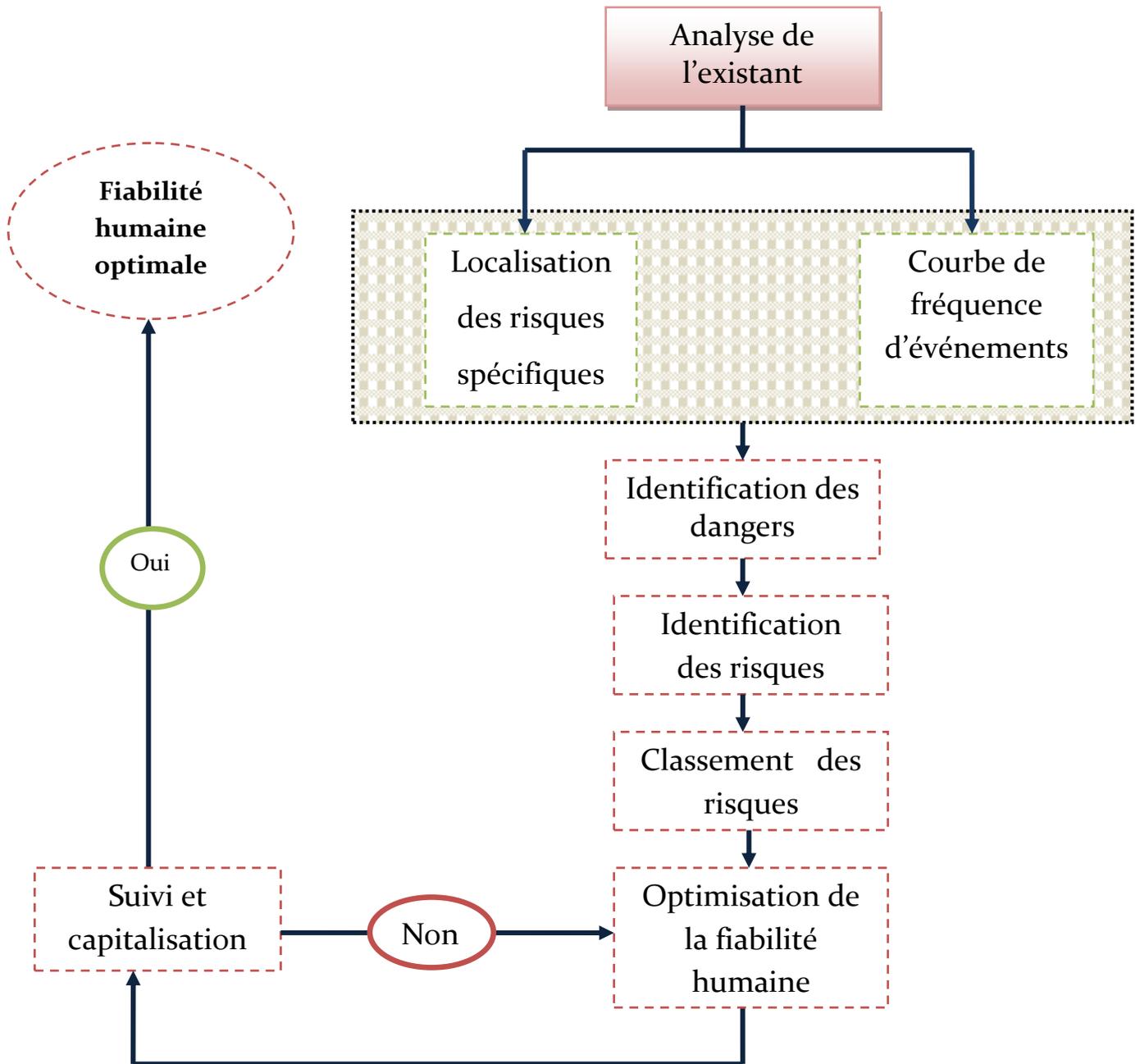


Figure. 60 Analyse de l'existant des risques

Une bonne méthode, pour progresser dans la pertinence du système d'information de l'entreprise, consiste à analyser l'existant sans chercher systématiquement à documenter les défauts connus de tous. Il s'agit d'un pré-diagnostic. L'analyse de l'existant permet de partir d'un diagnostic préalable et de s'appuyer sur les expériences antérieures, sur les indicateurs

existants ou à formaliser. Le fait de ne pas préparer la démarche renforce le sentiment de lourdeur et d'inutilité souvent évoqué par les entreprises. Le manque d'intégration fait perdre de vue l'intérêt de l'évaluation des risques, sa finalité, c'est à dire la prévention et l'amélioration des conditions de travail. Il en résulte que l'entreprise s'arrête à la rédaction du document unique sans réfléchir à un plan d'actions de prévention. Ou encore, elle évalue les risques indépendamment des actions qu'elle engage au quotidien ou des projets qu'elle conduit. L'analyse de l'existant se déroule dans notre modèle d'optimisation de la fiabilité humaine selon deux phases :

-Localisation des risques de travail :

La localisation des risques de travail est une démarche préventive. Elle permet d'identifier les risques présents dans le milieu de travail sans pour autant les spécifier, elle se caractérise par un ensemble d'activité qui vise l'identification systématique des risques liés aux équipements, aux tâches, aux unités de travail et à l'aménagement des lieux du travail. Il s'agit en fait d'une fonction de surveillance du milieu de travail qui permet de détecter et de localiser les risques. Pour établir une analyse fine au plus près des situations de travail et des contraintes de l'entreprise, il faut s'intéresser aux salariés, à leurs constats, à leur fatigue, à leur mal-être ou encore à leur épanouissement ou à leur satisfaction au travail.

Ainsi, dans notre modèle d'optimisation de la fiabilité humaine, la localisation des risques se présente par unité de travail. Un tel choix s'explique par le fait que l'unité de travail consiste en un regroupement de situations qui sont similaires du point de vue du travail réalisé et des diverses expositions aux risques qui lui sont liées. Par suite, la localisation des risques de travail selon les unités correspondantes constitue un préliminaire de l'action d'identification des risques professionnels, c'est une maille d'analyse qui permet d'identifier tous les personnels qui, à un moment ou à un autre, seront concernés par les mêmes risques.

L'unité de travail permet de réaliser un inventaire des risques, en tendant à n'en oublier aucun. Toute action de prévention (évaluation des risques, mesure de prévention...) ne peut se faire indépendamment des caractéristiques, chacune des unités de travail va révéler la dimension cumulative des expositions aux risques et leur interférence entre elles.

-Identification de la courbe de fréquence des événements :

La caractérisation du comportement humain est un domaine complexe, et il est bien entendu réducteur de l'exprimer en tant que composant ayant une fréquence d'événements indésirables ou en tant que barrière avec un taux de disponibilité.

Un événement indésirable est défini comme : Accident, incident ou dysfonctionnement dont les conséquences sont ou auraient pu être dommageables, qui révèle un état de risque, d'insécurité ou de non-qualité. Cet événement peut survenir dans les conditions normales d'utilisation du produit. Il peut être:

- observé en l'espace de quelques minutes ou de plusieurs années après l'utilisation d'un produit,
- d'intensité variable : sans conséquence sérieuse ou, au contraire, altérer la qualité de vie, voire conduire au décès,
- de nature très diverse : douleurs aux jambes, au dos, à l'estomac, fièvre, rougeurs de la peau, démangeaisons, dépression, troubles du sommeil, du langage, de la motricité, du comportement, nausées, vomissements, diarrhées...

Ainsi, le système de classification des événements indésirables varie selon l'industrie, et selon le type de fréquences observées. Dans notre modèle d'optimisation de la fiabilité nous avons pris la classification des fréquences d'événements selon le degré de fatalité des événements indésirables, comme suit :

- Fatalité à l'intérieur du site,
- Fatalité à l'extérieur du site.

A partir, de la première étape « Analyse de l'existant » de notre modèle, nous parviendrons à identifier un diagnostic de la situation des sites de travail envers la localisation des risques avec leurs fréquences d'événements indésirables.

2.2 Identification des dangers

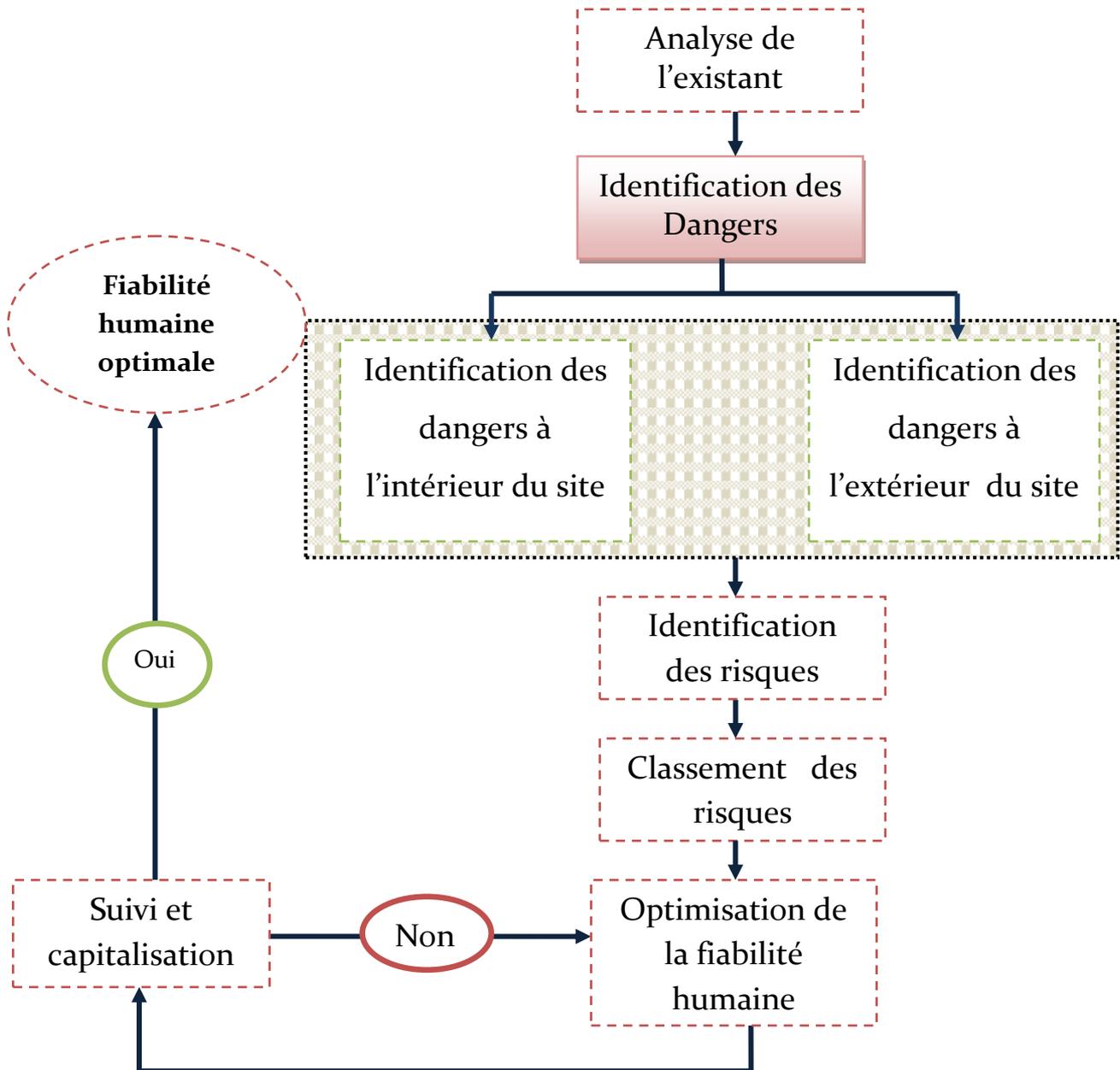


Figure. 61 Identification des dangers

Un danger c'est ce qui menace ou compromet la sûreté, l'existence d'une personne ou d'une chose, c'est la propriété ou la capacité intrinsèque d'un équipement, d'une substance, d'une méthode de travail qui provoque un dommage. L'identification des dangers se fait après la définition des unités de travail. Cette étape d'identification permet d'analyser : les conditions d'expositions des salariés aux dangers pendant leurs activités, c'est ce qu'on appelle

« identification des dangers à l'intérieurs des sites de travail », et d'analyser les différents dommages susceptible d'être provoqués à l'extérieurs du site, c'est ce qu'on appelle « identification des dangers à l'extérieur des sites de travail ».

-Identification des dangers à l'intérieur des sites de travail:

Pour identifier les dangers, il est nécessaire de :

- Circuler sur le lieu de travail à la recherche d'éventuelles causes d'accidents ou de maladies;
- Consulter les travailleurs et/ou leurs représentants pour connaître les problèmes qu'ils ont rencontrés. Souvent, le moyen le plus rapide et le plus sûr d'identifier les détails de ce qui se passe réellement consiste à poser des questions aux travailleurs participant à l'activité évaluée. Ils savent quelles étapes du processus ils suivent, s'il y a ou non des raccourcis ou des moyens de venir à bout d'une tâche difficile, et quelles mesures de précautions ils appliquent;
- Examiner systématiquement tous les aspects du travail, c'est-à-dire:
 - Observer ce qui se passe réellement sur le lieu de travail ou pendant l'activité de travail, (les pratiques réelles peuvent différer de ce que disent les manuels),
 - Penser aux activités inhabituelles et intermittentes (par exemple, activités d'entretien, modifications des cycles de traitement),
 - Tenir compte d'événements non prévus mais prévisibles tels que les interruptions de l'activité de travail;
- Analyser les antécédents de l'entreprise en matière d'accidents et de maladie.

-Identification des dangers à l'extérieur des sites de travail:

L'identification des dangers à l'extérieur des sites, regroupe tous ceux qui peuvent être exposés aux dangers indirectement. A ce niveau, il ne s'agit pas de dresser une liste nominative de toutes les personnes concernées, mais bien d'identifier des groupes de personnes qui sont exposés indirectement ou spontanément aux dangers. Une fois les étapes pertinentes identifiées, il faut lister les dangers possibles à chaque étape en se basant sur les faits observés, sur les causes reconnues d'accidents et de blessures et sur l'expérience personnelle.

Une deuxième observation pourrait être nécessaire après avoir identifié les étapes pertinentes. Ceci permettrait d'accorder plus d'attention aux possibilités de danger qui existent à chaque étape, sans toutefois tenter de résoudre les problèmes pour le moment.

Chapitre 4 : Modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité

Avec l'étude de dangers, l'accident est saisi dans sa globalité à la lumière de deux variables : sa probabilité et sa gravité.

Ainsi, l'étude de dangers à l'intérieur et à l'extérieur du site de travail, est au cœur du processus de gestion des risques d'origine accidentelle pour les installations classées. L'étude de dangers s'attache à démontrer la maîtrise des risques d'accidents majeurs associés aux installations et activités industrielles.

2.3 Identification des risques

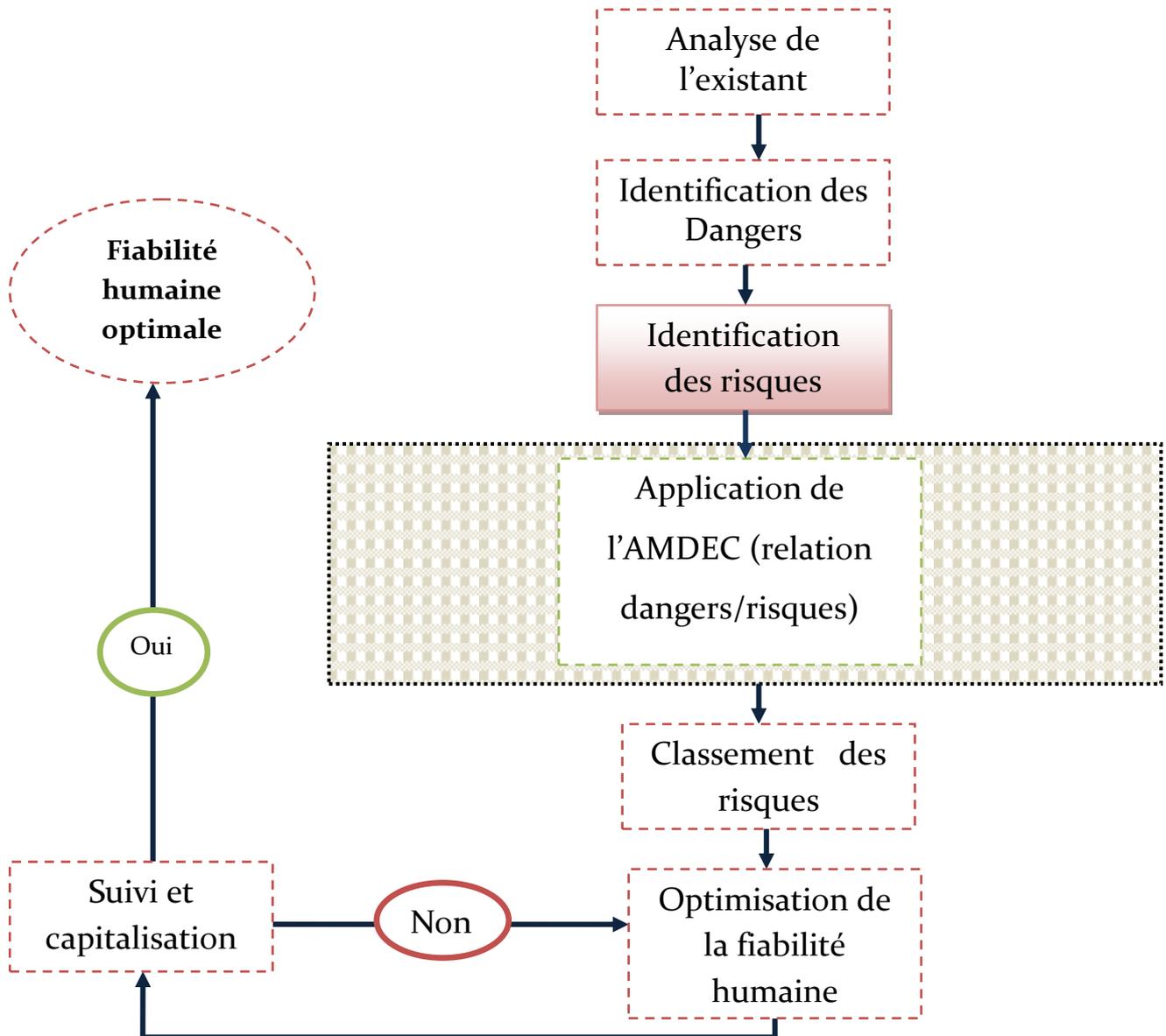


Figure. 62 Identification des risques

Le risque est une menace pour les êtres humains et ceux à quoi sont rattachés. L'identification des risques consiste à avouer les risques auxquels sont soumis les salariés d'un établissement, en vue de mettre en place des actions de prévention pertinentes. Elle constitue l'étape initiale d'une politique de santé et de sécurité au travail. Gérer le risque revient à réaliser l'articulation entre optimum économique et acceptabilité du risque. En

Chapitre 4 : Modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité

d'autres termes, il s'agit de distinguer l'inacceptable de l'acceptable en déterminant un niveau de frontière en consensus avec les sphères techniques, économiques et sociales.

Ainsi, l'identification des risques s'effectue en observant l'étude de dangers réellement effectuée aux différents postes de travail et en dialoguant avec les personnes qui les occupent. Il faut donc recenser les informations qui existent sur les risques dans l'entreprise (recueillir les avis, les retours d'expérience et les ressentis des salariés, les documents de la médecine du travail, ceux relatifs aux accidents du travail) ainsi qu'à l'extérieur de l'entreprise (statistiques accidents du travail...).

L'identification des risques consiste en une identification systématique, et permanente, en une analyse de la présence de dangers et de facteurs de risque dans des processus et des situations concrètes sur le lieu de travail dans une entreprise. En effet, elle permet d'exposer l'ampleur, mais aussi la probabilité d'occurrence d'un accident majeur et d'expliquer jusqu'à quel point les mesures de sécurité déjà prises sont à même de le prévenir ou d'en limiter les conséquences.

Le risque couple la probabilité d'occurrence et la gravité des conséquences, appliqué à un événement non souhaité. C'est l'éventualité d'une rencontre entre l'homme et un danger auquel il peut être exposé. Il se découpe en deux composantes : la probabilité de survenance du dommage (produit de la fréquence d'exposition au danger par le niveau d'exposition) et la gravité du dommage, qui sera analysé à l'aide de l'outil de sûreté de fonctionnement AMDEC (Analyse des Modes de leurs Effets et de leur Criticité).

L'AMDEC a pour objectif d'une part, d'identifier et de hiérarchiser les risques potentiels, d'autre part, elle vise la mise en place d'actions permettant d'apporter des solutions aux points critiques révélés. C'est un outil de maîtrise prévisionnelle des risques. L'AMDEC présente des grilles d'analyse composées du nom du composant sur lequel porte l'analyse, ses fonctions, les défaillances dont il peut faire l'objet (avec un mode, une cause, un effet), la détection, la gravité, la fréquence du risque. La combinaison des indicateurs de fréquence, de gravité et de détection donne la criticité, selon sa valeur, il amène à des actions correctives, toujours consignées dans les grilles d'analyse.

2.4 Classement des risques

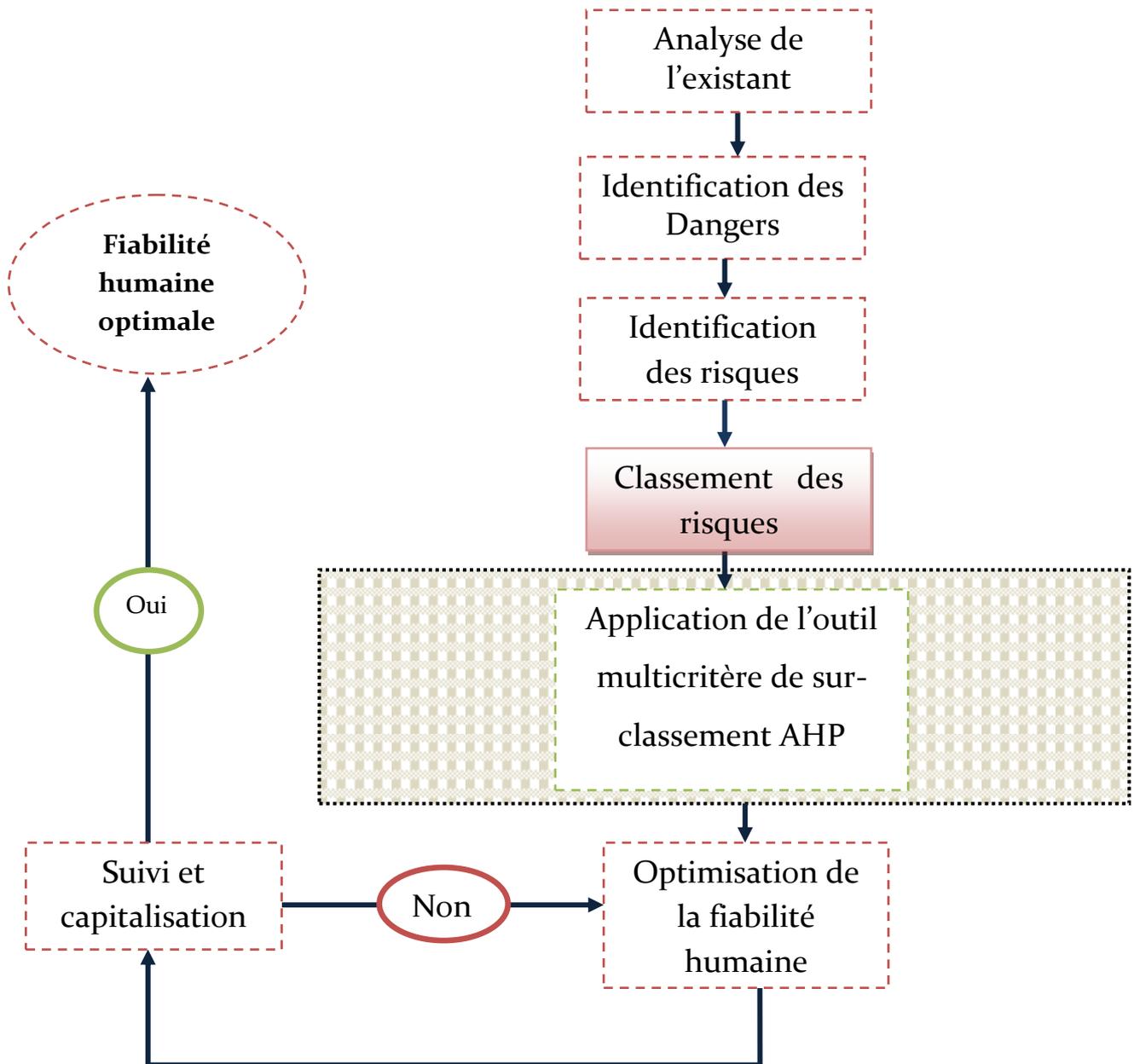


Figure. 63 Classement des risques

Cette étape permet de hiérarchiser les risques identifiés et ainsi d'orienter les priorités d'action. La hiérarchisation se fait à partir de la méthode multicritère d'aide à la décision AHP (Analytical Hierarchy Process).

La méthode AHP consiste à représenter un problème de décision par une structure hiérarchique reflétant les interactions entre les divers éléments du problème, à procéder ensuite à des comparaisons par paires des éléments de la hiérarchie, et enfin à déterminer les priorités des actions. La méthode AHP est utilisée fréquemment afin de comparer plusieurs objectives ou alternatives.

Le choix de la méthode AHP est justifié par le fait que :

- La méthode AHP repose sur un modèle souple et facilement compréhensible pour résoudre un large éventail de problèmes non structurés. Les problèmes de hiérarchisation des risques étant non structurés, le développement d'un modèle permettra d'alléger le fardeau de la prise de décision,
- La méthode AHP permet de résoudre des problèmes complexes tout en tenant compte de l'interdépendance des éléments du système sans se focaliser sur une pensée linéaire. Les problématiques de hiérarchisation des risques sont des problèmes complexes parce qu'il semble difficile de faire un classement entre les risques, où il faut considérer séparément plusieurs facteurs parfois conflictuels,
- La méthode AHP reflète la tendance naturelle de l'humain à trier et classer ensemble les éléments semblables d'un système sur un même niveau,
- Elle attribue des valeurs numériques à des jugements subjectifs sur l'importance relative de chaque variable et permet de synthétiser les jugements afin de déterminer les variables qui ont la plus grande priorité et sur lesquelles il convient d'agir pour parvenir à la solution.

En plus :

- l'objectif dans l'étape «Classement des risques », est la hiérarchisation des risques, afin de détecter un ordre de priorité du degré de gravité de chacun,
- ce classement des risques nécessite l'intégration du décideur en amont du processus de décision.

A partir de toutes ces informations et sur la base de la matrice de [GUITOUNI A. et al 1999], notre input (risques à classer)= I21 (n fonctions d'utilité (u_j) (valeur) partielle) exprimées sur des échelles ratios plus un vecteur de coefficient d'importance relative (Π) des attributs.) du tableau des inputs, et notre outputs (causes hiérarchiser) = O1 (Évaluation globale: cette situation traduit la volonté de construire un critère unique de synthèse. Le score global est de niveau cardinal.) du tableau des outputs. L'intersection des inputs et des outputs selon la

matrice de [GUITOUNI A. et al 1999], nous permet de choisir la méthode de sur-classement AHP pour le classement des risques.

En résumé, la méthode AHP est un outil de décision multicritère robuste et flexible. Cet outil permet de considérer les critères subjectifs autant qu'objectifs et s'adapte bien, à notre avis, au processus de décision en problématique de priorisation des risques.

L'aide multicritère à la décision diminue l'incertitude car le gestionnaire de projet prendra en compte un grand nombre de facteurs avant d'agir. L'incertitude et le risque étant moindres, la probabilité de performance et de succès du projet sera plus élevée [CAILLET R. 2003]

2.5 Optimisation de la fiabilité humaine

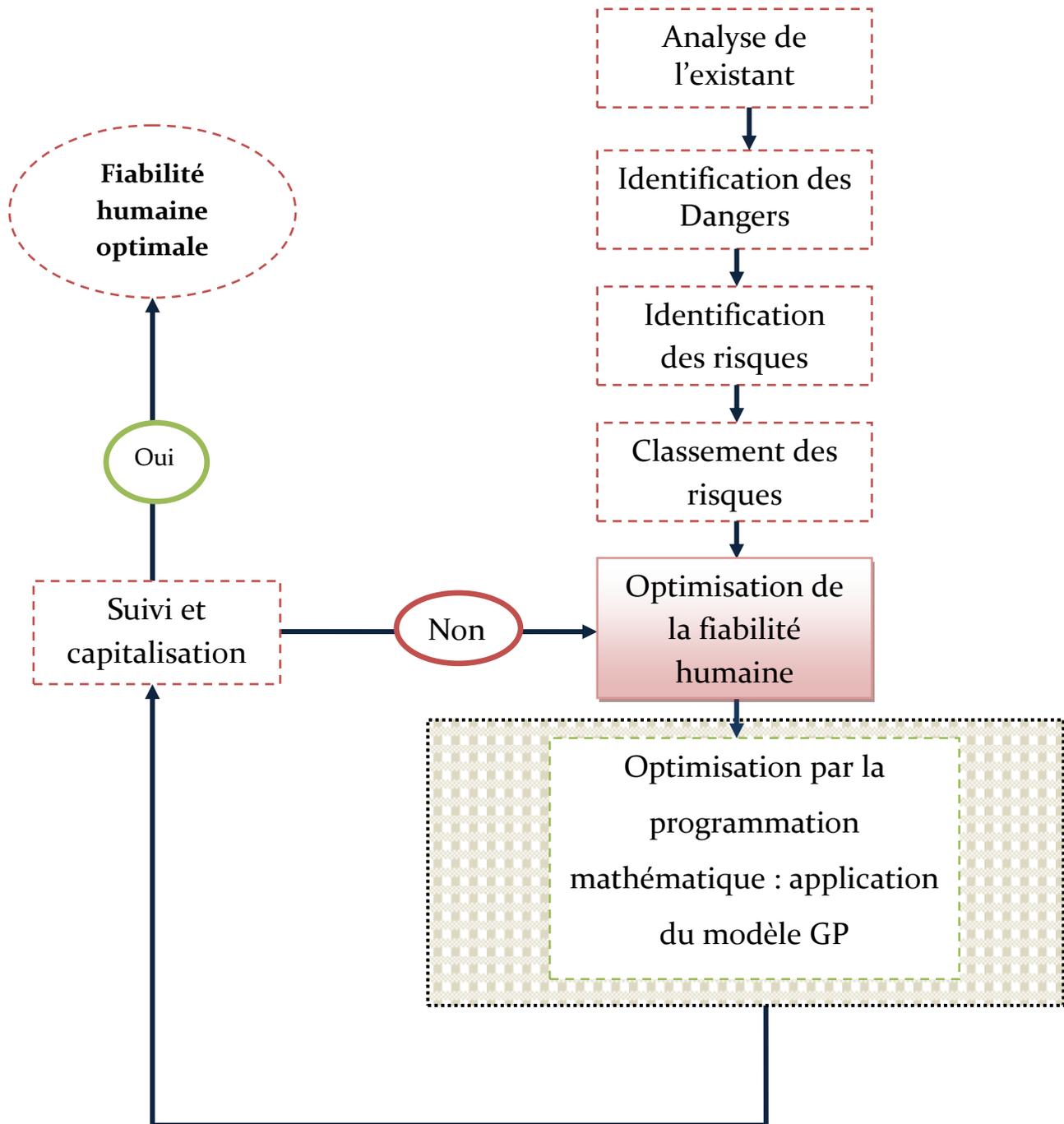


Figure. 64 Optimisation de la fiabilité humaine

L'optimisation de la fiabilité humaine à travers le traitement des risques constitue la phase centrale de la gestion des risques. Les actions réalisées à cette étape permettent à l'opérateur

ou le responsable de la sécurité des mesures d'urgence permettant de réduire les risques auxquels la collectivité ou l'organisation est exposée. C'est grâce aux actions réalisées à cette étape que la collectivité ou l'organisation pourra de façon concrète réduire les risques auxquels elle est exposée. Ces actions devraient agir sur l'aléa, sur la vulnérabilité du milieu ou sur les deux, lorsque possible. Le traitement des risques définit des solutions permettant de faire face aux risques évitement, acceptation, réduction ou partage. Pour ce faire l'étape de traitement des risques élabore un ensemble de mesures permettant de mettre en adéquation le niveau des risques avec le seuil de tolérance et l'appétence pour le risque de l'organisation. À ce stade crucial du processus, les acteurs sont donc appelés à identifier, à sélectionner et à mettre en œuvre les mesures devant permettre de réduire les risques à un niveau acceptable. Le traitement des risques se décrit ainsi comme un processus de sélection et de mise en œuvre de mesures destinées à réduire les risques. Il est opportun par ailleurs de souligner qu'à l'occasion du traitement des risques, une analyse des risques plus détaillée peut s'avérer nécessaire afin de disposer de l'information exigée pour une identification, une évaluation et une sélection appropriée des mesures à réaliser. Il faut donc compter sur un niveau d'analyse adéquat pour s'assurer que les mesures mises en place traitent véritablement les causes à l'origine des risques.

Ainsi, l'idée de notre modèle est d'appliquer l'étape de traitement des risques par l'application du modèle de Goal Programming avec les fonctions de satisfactions.

Le choix de la méthode Goal Programming avec les fonctions de satisfactions est justifié par le fait que :

-l'objectif dans l'étape «Optimisation de la fiabilité humaine », est d'appliquer une méthode multi-objectifs de minimisation des risques, à travers la programmation mathématique à objectifs multiples.

-en plus, cette optimisation des risques nécessite le choix des actions qui se rapproche le plus des souhaits du décideur en amont du processus de décision, afin de satisfaire les objectifs à atteindre.

A partir de toutes ces informations et sur la base de la matrice de [GUITOUNI A. et al 1999], notre input (risques à minimiser)= I21 (n fonctions d'utilité (u_j) (d'utilité (valeur) partielle) exprimées sur des échelles ratios plus un vecteur de coefficient d'importance relative (Π) des attributs.) du tableau des inputs, et notre outputs (fiabilité humaine optimale)= O1 (Évaluation

globale: cette situation traduit la volonté de construire un critère unique de synthèse. Le score global est de niveau cardinal.) du tableau des outputs.

L'intersection des inputs et des outputs selon la matrice de [GUITOUNI A. et al 1999], nous permet de choisir la méthode de programmation mathématique à objectifs multiples pour l'optimisation de la fiabilité humaine.

Ainsi, La principale difficulté d'un problème de programmation mathématique à objectifs multiples (cela est aussi vrai pour l'ensemble des problèmes dans l'analyse multicritère) réside dans la nature de sa formulation. Il s'agit d'un problème où il est impossible de trouver une solution objective, qui maximise simultanément les P objectifs. C'est pourquoi la résolution du programme de programmation mathématique par application du Goal Programming consiste à trouver une solution de compromis en faisant intervenir la structure de préférences du décideur. Ici, nous excluons les situations de dominance où une action peut avoir de meilleures évaluations sur tous les objectifs. Dans une problématique du choix de la meilleure solution parmi un ensemble de solutions réalisables. La procédure d'agrégation des degrés d'atteinte de ces divers objectifs conflictuels, auxquels sont rattachées des unités de mesure de nature généralement différente, s'attache précisément sur le choix du décideur.

Notre approche a pour avantage d'engager plus avant le décideur dans le processus de choix en lui demandant non seulement d'exprimer des buts pour chaque objectif, mais également de se prononcer sur son degré de satisfaction face aux déviations (positives ou négatives) auxquelles les diverses solutions ou actions peuvent conduire. Le décideur est interrogé sur des fonctions simples, comportant peu de paramètres, qui ont une signification concrète pour lui. A ce niveau, l'application du modèle de Goal Programming a permis «d'optimiser» le processus décisionnel en respectant des contraintes établies et en attendant à des objectifs désirés. D'une application du modèle au cas réel de traitement des risques professionnels, nous avons pu fournir une décision importante qui a permis de conduire le décideur à prendre sa décision.

2.6 Suivi et contrôle

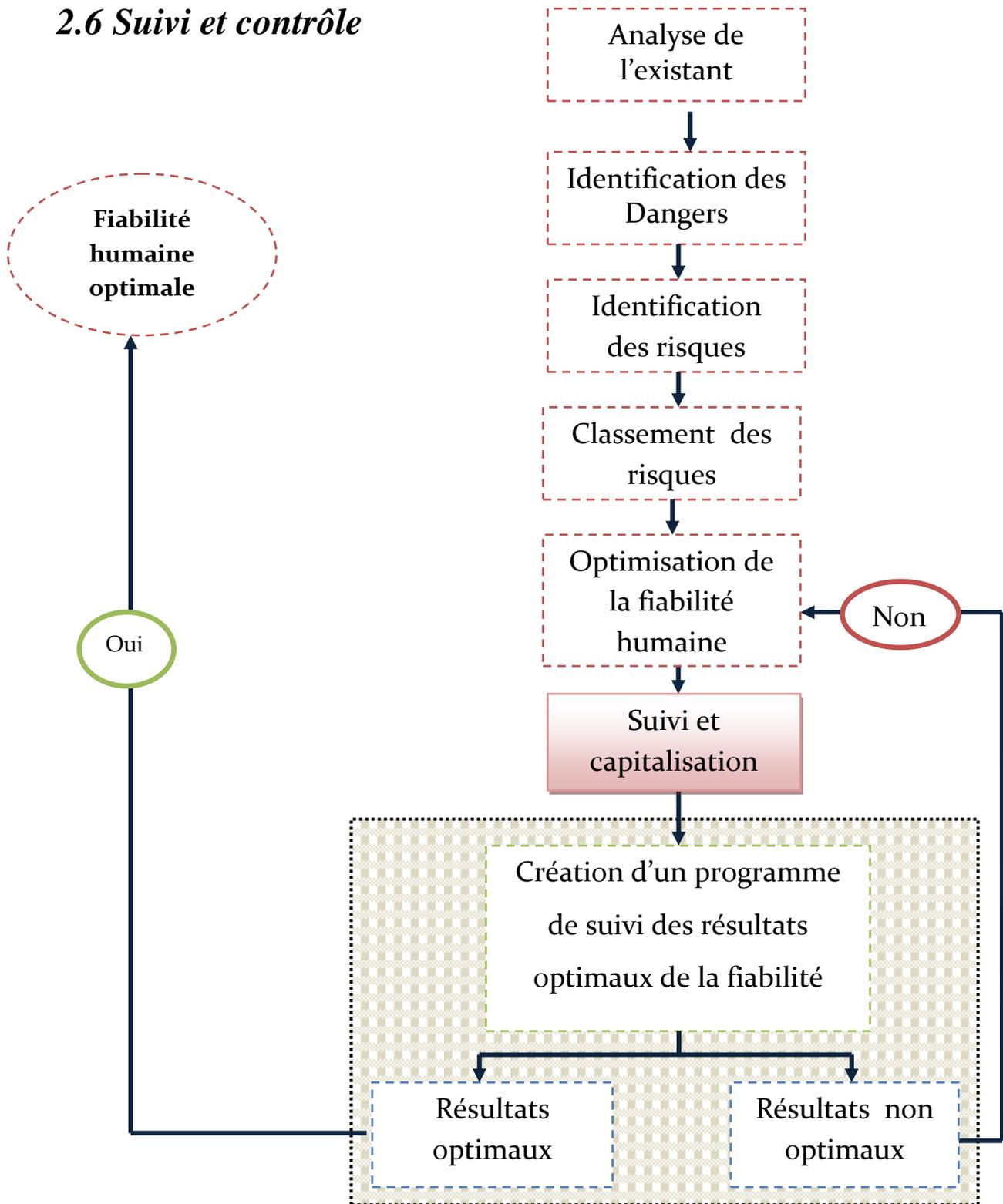


Figure. 65 Suivi et contrôle des résultats optimaux

À cette étape de suivi et contrôle, nous précisons et nous évaluons les options possibles de réduction des risques pour ce qui est de l'efficacité, du coût et de l'impact de ces risques sur les intervenants et sur leur capacité à accepter les choses.

L'efficacité des mesures de réduction retenues en phase de traitement des risques est conditionnée par le suivi rigoureux de leur mise en œuvre et la continuité du processus de gestion des risques (condition nécessaire au maintien du niveau de maîtrise des risques et à la prise en compte de l'évolution de l'entité considérée).

Les notions de suivi et de contrôle sont centrales puisqu'au cœur des principes de gestion des risques. Le suivi consiste à analyser l'état d'avancement des programmes afin de mesurer les écarts éventuels entre la situation réelle et la situation prévisionnelle.

Les contrôles de suivi peuvent être assurés par des actions ponctuelles telles que l'audit, ou bien par la mise en place d'indicateurs de suivi, sous la forme de tableaux de bord. L'utilité de ces actions est multiple. L'audit apporte un regard extérieur. Les tableaux de bord favorisent un suivi intégré à la politique de l'entreprise, mesurant l'évolution du niveau de risque, les efforts engagés, les résultats atteints.

A ce niveau, le suivi et le contrôle consiste à identifier seulement un contrôle d'une situation actuelle par rapport aux résultats présentés dans la phase de traitement des risques.

Dans notre modèle de recherche « optimisation de la fiabilité humaine », nous proposons un programme de contrôle des résultats est de suivi de l'optimalité appelé « **programme de contrôle et suivi de l'optimisation de la fiabilité humaine** », ce programme constitue la suite à donner, nous mettons en vigueur à travers ce programme les stratégies de contrôle des risques, nous évaluons l'efficacité du processus de prise de décision et nous examinons les résultats avec vigilance. Ainsi, ce programme aide à déterminer l'exactitude des hypothèses émises et l'efficacité des mesures de contrôle prises, et permet à l'organisation de réagir en présence de circonstances changeantes.

Le programme proposé, consiste à contrôler toutes les données existantes ou nouvelles de chaque type de risques selon leur ordre de priorité préconisé dans l'étape d'évaluation des risques par la méthode d'aide à la décision « AHP ». Il contrôle les données et les compare par rapport à la base de données des optimalités identifiées dans l'étape de traitement des risques. Si les résultats sont optimaux, alors le décideur détient toujours le niveau de fiabilité optimale ; sinon, s'il y a des résultats non optimaux, et il faut retourner à l'étape précédente

(optimisation de la fiabilité humaine), pour chercher l'optimum par application du modèle du Goal Programming.

Le « **programme de contrôle et suivi de l'optimisation de la fiabilité humaine** » permet non seulement de vérifier si les risques ont pu être éliminés ou écartés entièrement ou s'ils ont pu être diminués de façon à pouvoir les maîtriser mais aussi si aucun nouveau risque n'a été créé suite à l'application des mesures.

De plus, il est recommandé de réaliser régulièrement une nouvelle évaluation des risques, afin de déterminer si les risques ont bien pu être éliminés définitivement ou si d'autres risques sont apparus depuis la dernière évaluation.

Il est indispensable d'effectuer à nouveau une évaluation des risques chaque fois qu'il y a eu un changement dans l'entreprise. Ce changement peut se situer au niveau organisationnel, au niveau du personnel ou être de nature technique. Il peut s'agir, par exemple, de la création d'un nouveau poste de travail, l'engagement de nouveaux salariés, l'installation d'une nouvelle machine, l'introduction d'un nouveau procédé ou l'introduction d'un nouveau procédé de travail...

Conclusion

Ce chapitre définit la résolution de la problématique d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans l'industrie de traitement de Gaz. Les besoins en optimisation sont multiples et recouvrent des enjeux souvent considérables. Dans le domaine de la fiabilité, cette optimisation cherche à améliorer la robustesse des produits aux aléas (défaillances, erreurs humaines...), et trouver une bonne solution répondant à des critères d'évaluations et satisfaisant un ensemble restreint de contraintes, en un temps de calcul raisonnable.

Ainsi, dans certaines industries comme l'industrie de traitement de Gaz, les risques de défaillances émanent à la fois de leur composante technique et de leur composante humaine. A ce jour, l'erreur humaine constitue un facteur causal majeur dans l'émergence d'accidents. Pour ce faire, l'évaluation de la fiabilité n'est plus considérée comme une simple étape de vérification contractuelle, mais elle est utilisée à des fins d'optimisation pour garantir la disponibilité du service rendu à l'utilisateur final avec le minimum de risques professionnels. Elle est menée au niveau du système complet, et non plus de ses seuls constituants, et porte sur les différentes phases afin de minimiser les dangers provoquant des risques catastrophiques dans les lieux de travail.

Partons de ces considérations, Nous avons présenté dans ce chapitre un modèle d'optimisation de la fiabilité humaine sous l'initiative de processus de minimisation des risques professionnels. L'apport dans le modèle proposé réside dans la méthodologie et les outils utilisés au niveau de chaque étape.

D'une manière plus générale, un tel modèle d'optimisation de la fiabilité humaine, va dans le sens d'un management intégré. Si, dans le cas présent, il se limite à la considération des aspects de maximisation de la sécurité dans les sites de travail, et il est applicable dans les domaines et les secteurs cherchons la minimisation des risques professionnels.

L'analyse sur le terrain est probante, puisqu'elle permet d'expérimenter le modèle proposé. C'est pourquoi l'objet du prochain chapitre est de présenter une étude expérimentale du modèle d'optimisation de la fiabilité dans une industrie de traitement de Gaz.

Chapitre 5:

EXPERIMENTATION DU MODELE D'OPTIMISATION MULTICRITERE DE LA FIABILITE HUMAINE DANS BRITISH GAZ TUNISIE

Sommaire

INTRODUCTION	189
1. Usine d'Hannibal British Gaz	189
1.1. Présentation.....	189
1.2. Le système de contrôle de l'usine.....	194
2. Santé, Sécurité et Environnement(HSE)	195
2.1. Le système de gestion HSE.....	195
2.2. Behaviour Based Safety.....	197
3. Expérimentation du modèle d'optimisation de la fiabilité humaine.....	198
3.1. Analyse de l'existant.....	198
3.2. Identification des dangers.....	202
3.3. Identification des risques	205
3.4. Classement des risques.....	214
3.5. Optimisation de la fiabilité humaine.....	221
3.5.1 Minimisation des risques explosion.....	221
3.5.2 Minimisation des risques d'incendie	234

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

3.5.3 Minimisation des risques de fatigue respiratoire	245
3.5.4 Minimisation des risques d'atteinte cellulaire irréversible	256
3.5.5 Minimisation des risques d'arrêt cardiaque.....	269
3.6. Contrôle et suivi	280
CONCLUSION	284



Introduction

Le travail blesse, mutile, rend malade et, encore trop souvent, tue. Pas par fatalité, mais par négligence. Pas du fait de l'absence de normes, mais à cause de leurs violations. Pas à cause de la pauvreté, mais à cause du manque de prévention. Encore trop souvent la vie des travailleurs est mise gratuitement en danger.

Les approches appliquées actuellement pour la mise en place de l'analyse de la fiabilité humaine au sein et entre les processus peuvent conduire à des résultats peu satisfaisants, pourvu qu'elles ne prennent en considération les opérateurs que sommairement.

Ce chapitre présente une application du modèle d'optimisation de la fiabilité humaine. L'objectif principal de cette étude est d'appliquer un système de minimisation et de suivi des risques au sein des sites de traitement de Gaz de « British Gaz Tunisie ».

1. Usine d'Hannibal British Gaz

1.1 Présentation

L'usine de traitement de Gaz Hannibal est située à 20 kilomètres au sud de la ville de Sfax, Tunisie. Elle est à environ 3 kilomètres à l'intérieur de la région du Golfe de Gabès et de terres côtières de Miskar / Hannibal.

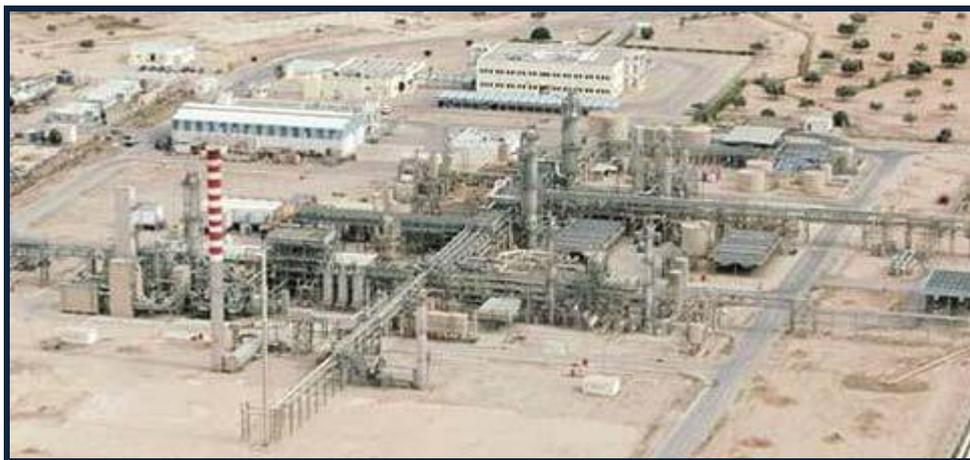


Photo. 1 Champs aérien de L'usine de traitement de Gaz Hannibal

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

L'usine de traitement de Gaz Hannibal a été créée en 1995, et reçoit l'essence des champs pétroliers marins de Miskar. Le processus de traitement de Gaz naturel schématisé dans la (Figure.66) nécessite l'acheminement des standards de canalisation commerciaux et domestiques. Le traitement inclut la démultiplication des concentrations du sulfure d'hydrogène, le dioxyde de carbone, l'azote, des liquides organiques concentrés et de l'eau. C'est couramment le traitement capable d'autour de 300 MMscfd de l'essence brute du Terrasse Miskar et 5000 BPD de concentration [ADVANTICA REPORT R 8898 2007].

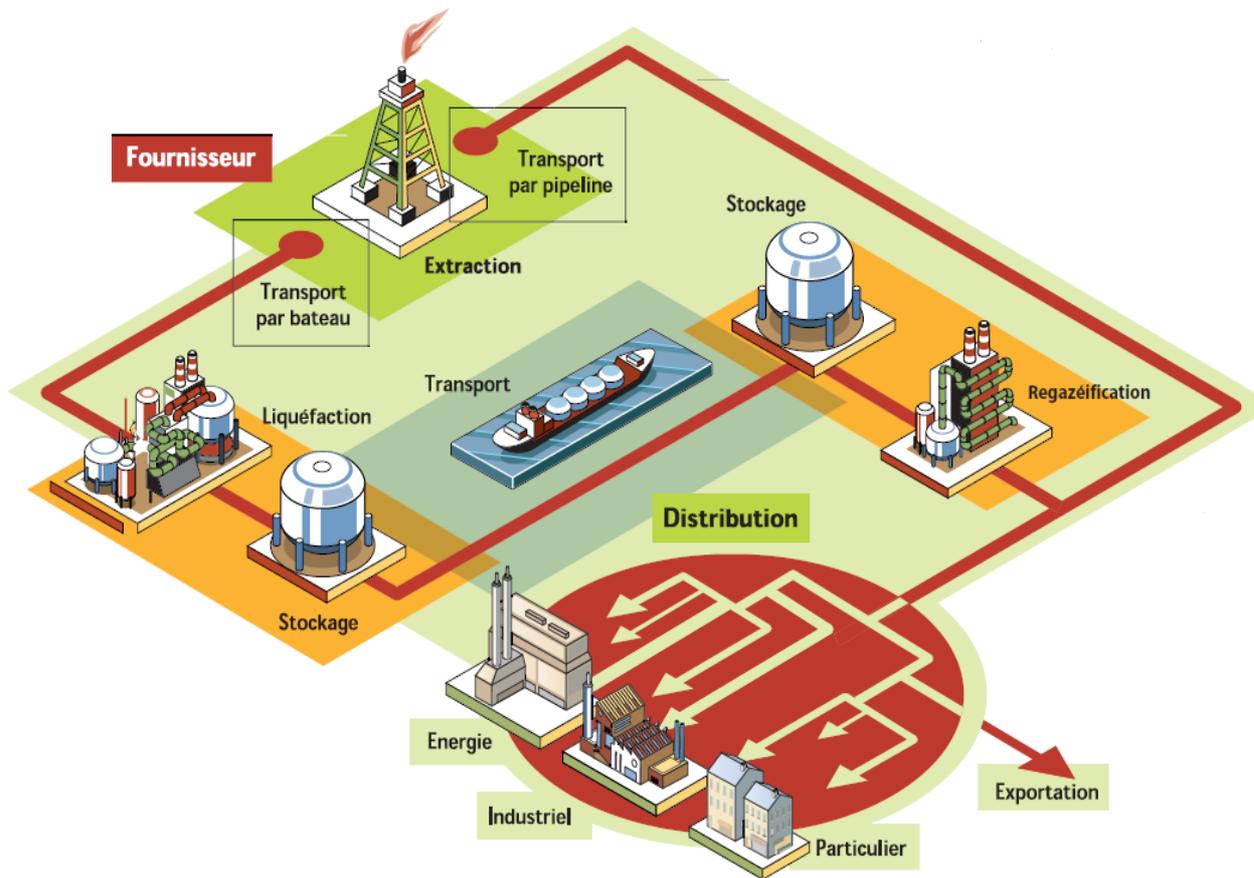


Figure. 66 L'usine de traitement de Gaz Hannibal

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

La schématisation simplifiée du diagramme bloc de L'usine de traitement de Gaz Hannibal est illustrée dans la (Figure. 67). Le processus d'alimentation du Gaz venant du terrasse Miskar et le traitement marine initial consiste à séparer le Gaz de l'essence liquide, alors que la déshydratation de glycol a suivi une réinjection de l'hydrocarbure concentré. (ANNEXE 1)

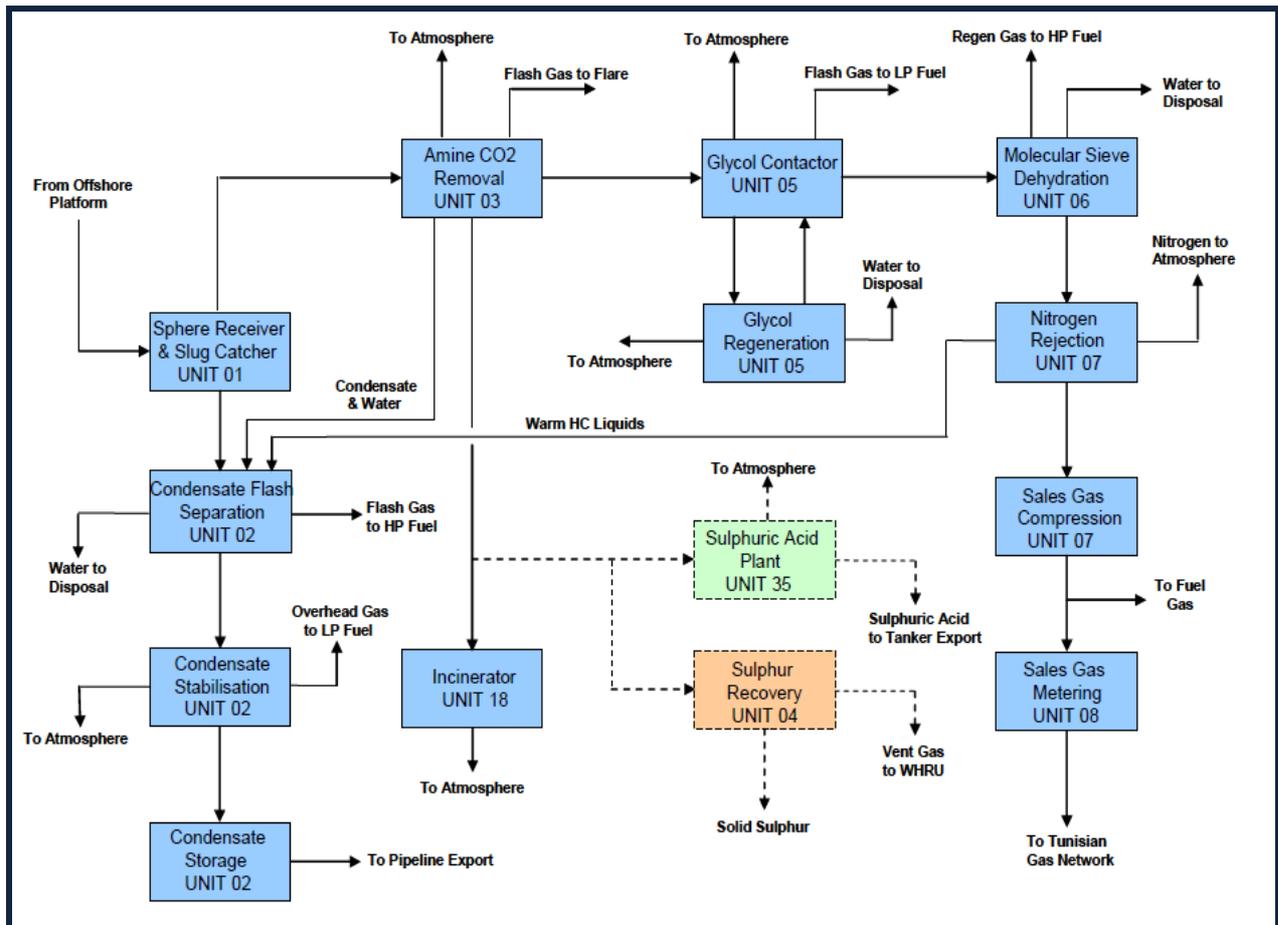


Figure. 67 Diagramme bloc de L'usine de traitement de Gaz Hannibal

Ainsi, les produits de l'usine de traitement de Gaz Hannibal sous formes de quantités significatives de substances sont contenus dans les différents processus de navires, et sont résumés dans le Tableau. 18 :

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

Catégories	Nom et code de produit	Composition en %
Extrêmement Inflammable	Gaz naturel	Principalement du méthane - typique
Extrêmement Inflammable	(NGL) concentré	Une combinaison complexe de hydrocarbures séparés et / ou condensés à partir de le gaz naturel et le contenant le nombre de carbones principalement dans la gamme C2-C20
Extrêmement Inflammable	Propane	Propane
Très Inflammable	Méthanol	Méthanol 99.8%
Dangereux pour l'environnement	Le carburant de diesel	100% les produits des distillations de pétroles
Dangereux pour l'environnement	Flatteries Hydrauliques	Assumé généralement avoir les propriétés similaires au Diesel
Extrêmement Inflammable Très Toxique	Le sulfure d'hydrogène	Contamination depuis l'essence naturelle a reçu par l'Outillage, aux concentrations jusqu'à 1%
Irritant	(methyldiethanolamine)	98% les dérivées d'amine
Corrosif	L'hydrate de potassium	Solution KOH 50%
Corrosif	L'acide sulfurique	98% H2SO4
Non classé	ARI 350 Chélaté (ARI Dactylographient le b Chélaté)	
Non classé	ARI-340 Catalyseurs De fers	
Non classé	Tri-Éthylène De glycol	
Non classé	Similigravure d'eau	À propos de 30m ³ produit et transportés chaque jour à une élimination hors site.
Toxique	Le formaldéhyde	
	AF 220 UI (Hypersperce antiscalant)	
Irritant	ARI 340 Catalyseurs De fers	Le liquide rouge contenant: <40% EDTA Ammonium de fer ; <12% Trisodium nitilotriacetate dans l'eau
Combustible	Carbone actif	
Corrosif	CS Plus additif	

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

	(Amine additif)	
Non classé	ARI 350 (ARI Type b Chélate)	
Corrosif	ARI 400 Biocide	<6% Alkyl diméthyl benzyl mélange de chlorure d'ammonium; <6% Alkyl-diméthyl ethylbenzyl ammonium chlorure de mélange; <90% eau <1% Nonylphénol C1.5 éthoxylate; <30% Nonylphénol éthoxylé C9; <3% de l'alcool isopropylique; <70% d'eau
Irritant	ARI 600 Surfactant	
Corrosif	Hypochlorite de sodium	15%
Non classé	Sodium Méta bisulfite	
Corrosif	Chlorure ferrique Solution	Le chlorure ferrique 40-42%
Non classé	Démoussant 530 Antimousse	
Nocif / Corrosif	Dehycor C985, inhibiteur corrosif	Mélange de: Solvant Naphta lourds; les acides gras, des grands-huile, mélangé avec des acides naphténique
Non classé	Mousse AFFF, Ansulité	
Extrêmement inflammable	Méthanol	
Inflammable	Acétone	
	GT 301	
	tablettes de chlore	
	Déshydraté	

Tableau. 18 Les substances utilisées et conservées [ADVANTICA REPORT R 8956 2006]

1.2 Le système de contrôle de L'usine

Tous les contrôles sont fonctions de calcul nécessaire à la conduite et l'entretien de l'installation d'une manière efficace et stable. Le système de **Contrôle Distribué (SCD)** contient toutes les fonctions de contrôle et de calculs nécessaires pour maintenir l'usine de traitement de Gaz de façon stable, efficace et fiable. La surveillance et le contrôle des fonctions ont été, autant que possible, mis en œuvre dans le niveau le plus bas possible du système (**SCD**). Rapprocher les fonctions de contrôle à partir d'un appareil de contrôle de niveau inférieur à un niveau supérieur de contrôle dispositif a été fait seulement en raison des limitations de l'appareil [**R2P2 2007**].

Ainsi, Un groupe de spécialistes (**HSE «Health, Safety and Environment »** : Santé, Sécurité et Environnement) est chargé de fournir des conseils, des orientations et un appui technique pour permettre la gestion en ligne à s'acquitter de leurs responsabilités. L'équipe de gestion de la structure est représentée à la Figure. 68 [**BGA 2007**].

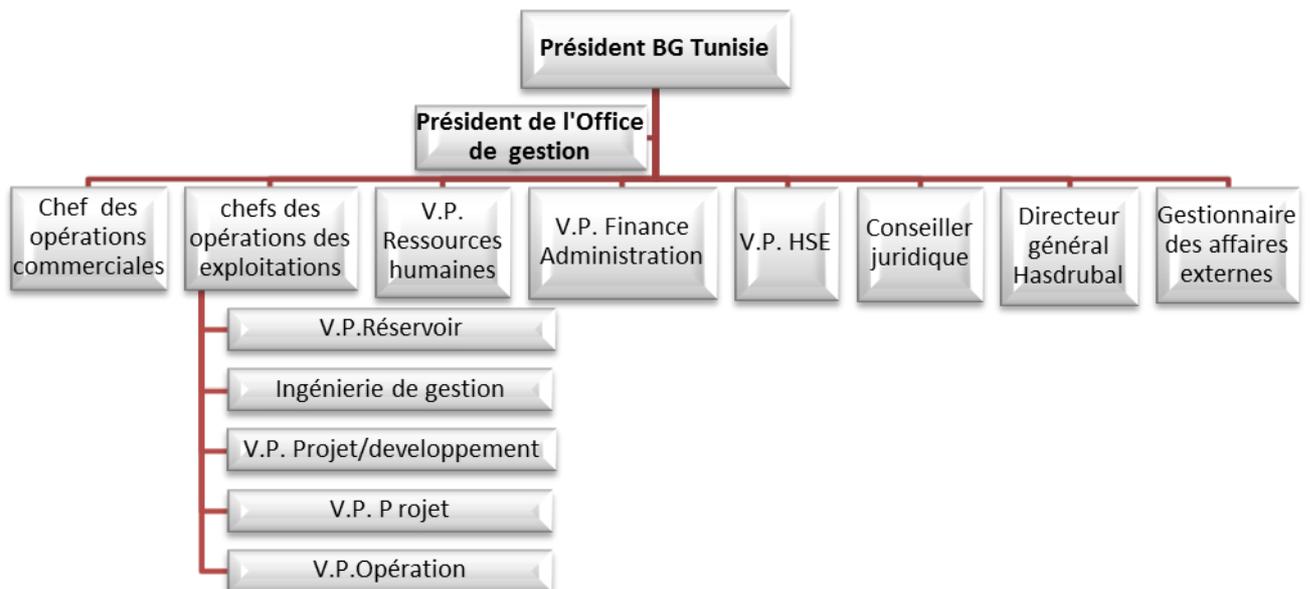


Figure. 68 Equipe de gestion de l'usine de traitement de Gaz Hannibal

2. Santé, Sécurité et Environnement (H.S.E)

2.1 Le système de gestion H.S.E

Le concept de l'application de la politique de l'usine de traitement de Gaz Hannibal -BG Tunisie en HSE est décrit comme un Système de gestion de la sécurité, la santé et de l'environnement (SHEMS : Safety, Health, Environnement, Management, System), Provenant de la valeur d'assurance-cadre (VAC), un modèle d'affaires développé par le groupe de BG , il constitue un outil par lequel les valeurs, les risques et les opportunités peuvent être identifiées dans l'ensemble du cycle de vie actif. La (VAC) comprend des exigences pour des opérations du système de gestion portant sur la production et les fonctions de maintenance, ainsi que des exigences de gestion HSE. La structure du système SHEMS est schématisée comme suit :

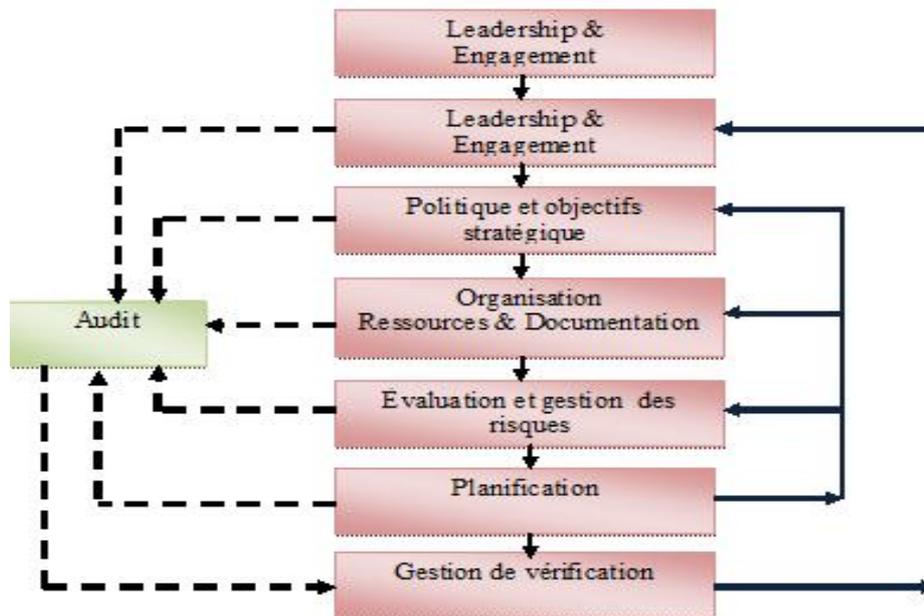


Figure. 69 Structure du système SHEMS de l'usine de traitement de Gaz Hannibal

- - ► : Maillon d'information
- ► : Maillon de contrôle

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

L'outil développé pour le **Système de Gestion des Opérations (S.O.G)** de l'usine de traitement de Gaz Hannibal - BG Tunisie contient un cadre cohérent pour les systèmes de gestion, et une base pour une gestion globale système d'audit. Ce système est utile lorsque on cherche des opérations de documents (procédures, directives, plans, ...) et de fournir des preuves de conformité avec les entreprises exigences. Il s'agit d'un outil qui est mis à jour sur une base régulière. L'usine de traitement de Gaz Hannibal assure également que la mise en œuvre de la politique de BG Tunisie HSE rencontre les exigences de l'utilisation d'une assurance de 14 Point HSE outil. C'est un outil qui peut exécuter BG Tunisie l'estimation de la performance de HSE, mais aussi fournir un cadre dans lequel les opérations sont vérifiées. Toutes les activités opérationnelles, y compris la sécurité, sont régies par des procédures établies dans le BG Tunisie système de gestion des opérations. Le système de gestion de la hiérarchie est fondé sur le modèle du groupe qui commence avec les principes d'affaires qui sont en cascade politiques, normes et lignes directrices. Des systèmes efficaces de contrôle des risques ont été mis en place pour veiller à ce que les risques liés à l'exploitation de l'usine sont bien contrôlés [ADVANTICA REPORT R 8898 2006].



Figure. 70 le système de gestion des opérations(S.O.G)

Des exercices de formation sont effectués, impliquant tous les aspects du plan d'intervention d'urgence. Les principaux exercices impliquent l'équipe de gestion des incidents et peut concerner les services publics. Le Tableau. 19 montre la fréquence prévue des exercices :

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

	Hebdomadaire	Mensuel	Deux mois	Trimestrielle	Semestrielle
Teste d'alarme					
Lutte contre l'incendie de forage					
Appareils de forage					
Manipulation temporaire de forage					
Première assistance du forage					
Rassemblement du forage					
Environnement de réponse de forage					
Table des exercices					
Exercices majeurs					

Tableau. 19 Exercices d'intervention d'urgence [ADVANTICA REPORT R 8898 2006]

2.2. Behaviour Based Safety

Sur la base du comportement de l'individu, le processus BBS (Behaviour Based Safety) met l'accent sur la sécurité, l'identification et le renforcement de la sécurité pour réduire les comportements dangereux. Le BBS est une approche systématique fondée sur les observations des employés. Ces employés sont formés à l'observation de ciblage spécifique et aux comportements liés à des risques en milieu de travail. Un comité de pilotage coordonne le processus, analyse les données et fait des recommandations pratiques qui sont communiqués à la gestion des risques.

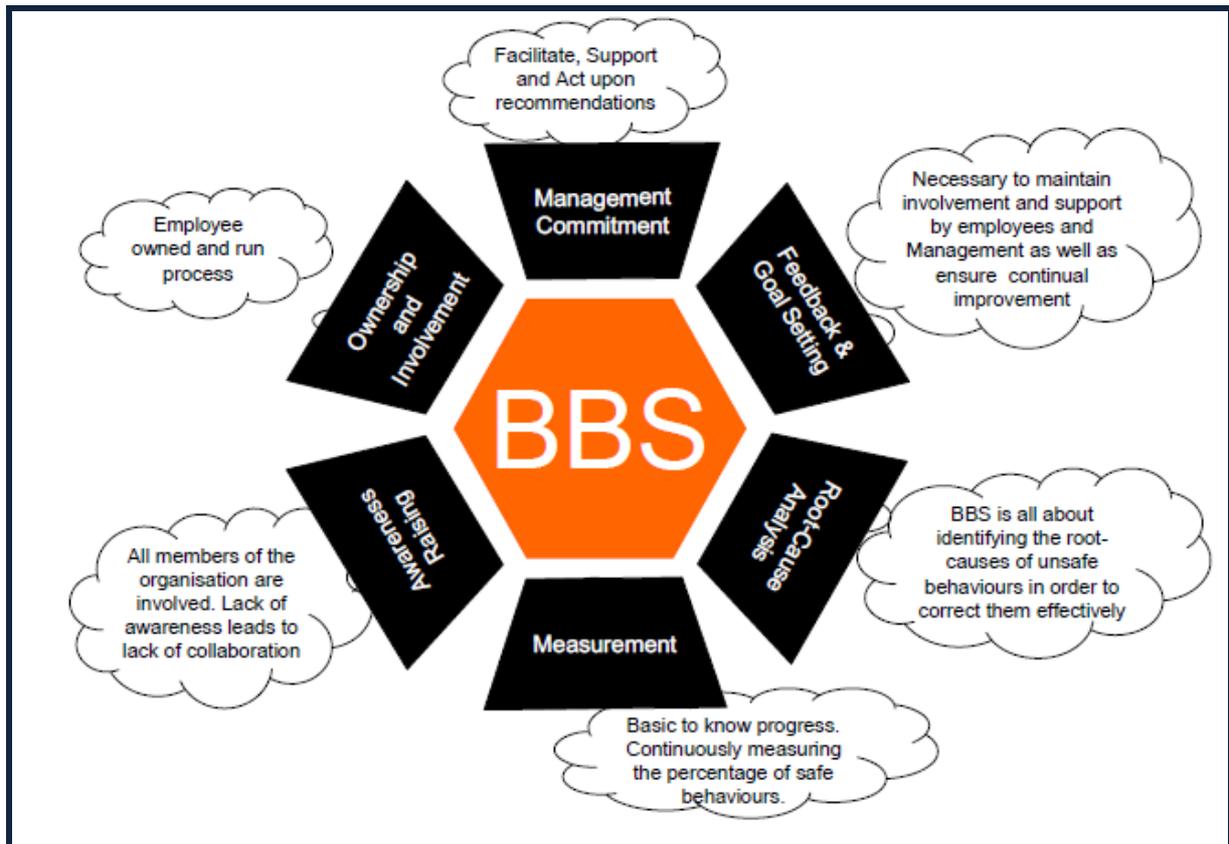


Figure. 71 Les six piliers de la sécurité Sur la base du comportement [ADVANTICA REPORT R 8956 2006]

3. Expérimentation du modèle d'optimisation de la fiabilité humaine

3.1 Analyse de l'existant

L'analyse de l'existant consiste à déterminer le degré d'apparition des risques par scénario. Les fréquences des événements ainsi que leurs critères des dangers sont combinés à chacun des scénarios pour donner une évaluation du risque. En évaluant l'impact de chaque scénario sur les différents sites. C'est une évaluation de risque spécifique par année. Ainsi, l'analyse

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

de l'existant suit 2 étapes d'évaluation du degré d'apparition des risques par scénario sur le site :

- **Localisation des Risques Spécifiques (LRS) :** c'est une identification de la localisation des différents risques spécifiques pour la personne restant dans le même emplacement spécifique pendant 24 heure / 365 jours dans le contour externe de l'usine de traitement de Gaz Hannibal. Les résultats des différents scénarios peuvent être combinés pour donner des contours des situations des risques spécifiques. La Figure. 72 montre l'emplacement des risques spécifiques pour le contour extérieur des opérations de l'usine de traitement de Gaz Hannibal.

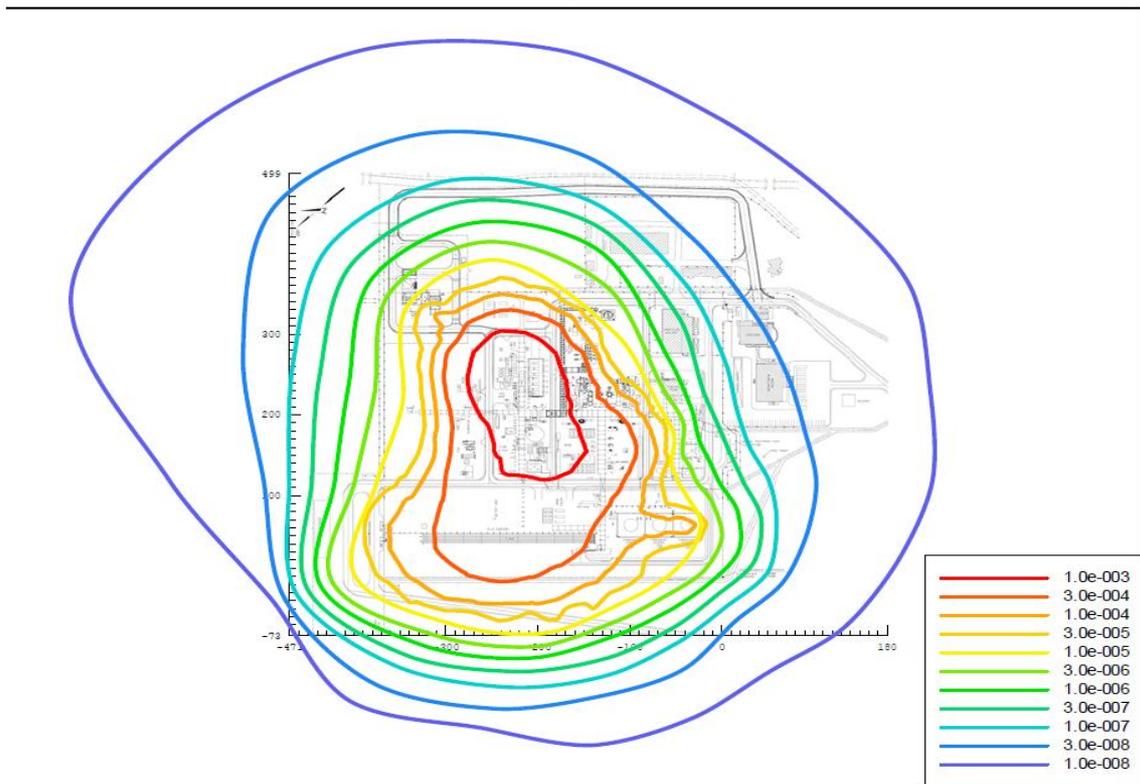


Figure. 72 Situation des Risques Spécifiques dans les sites de traitement de Gaz

A partir de la Figure. 72, on observe bien que la situation des risques spécifiques diffère selon la localisation, plus les personnes concernées sont près des champs de traitement de Gaz, plus la situation des risques spécifiques est importante (1.0 e^{-3}) par an. Et au contraire, plus les

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

personnes concernées sont éloignées des champs de traitement de Gaz, plus la situation des risques spécifiques est moins importante (1.0×10^{-8}).

Ainsi, la schématisation de la situation des risques spécifiques selon la localisation des contours extérieurs des opérations de traitement de Gaz, a permis d'identifier les risques spécifiques qui diffère selon l'emplacement des personnes concernées.

Après avoir identifié la localisation de la situation des risques spécifiques pour les contours externes de l'usine de traitement de Gaz Hannibal, on s'intéresse à la localisation de la situation des risques spécifiques à l'intérieur des bâtiments de l'usine.

La représentation des situations spécifiques des risques dans les bâtiments est dans la figure suivante :

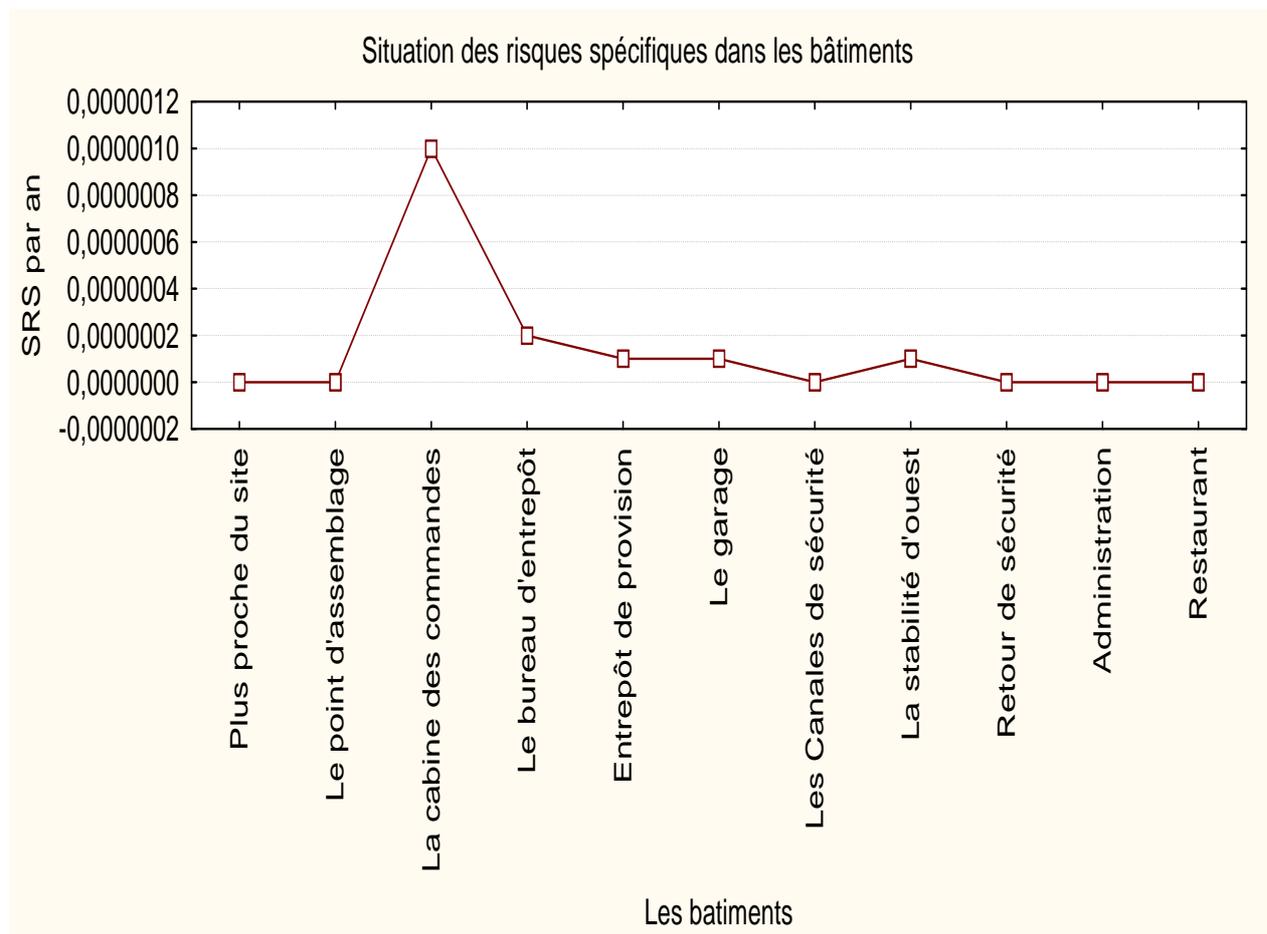


Figure. 73 Situation des Risques Spécifiques dans les bâtiments

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

La situation des risques spécifiques dans les bâtiments varie de $[-2 \times 10^{-7}, 12 \times 10^{-7}]$, elle est fatale dans la cabine des commandes (10^{-6}), elle est aussi importante dans le bureau d'entrepôt (2×10^{-7}).

- présentation de la courbe de fréquence d'événement :

Le graphique de fréquence exprime la fréquence des événements avec lesquels un certain nombre de morts est dépassé. La Figure. 74 montre la courbe de la fréquence des événements pour les scénarios de l'usine de traitement de Gaz Hannibal.

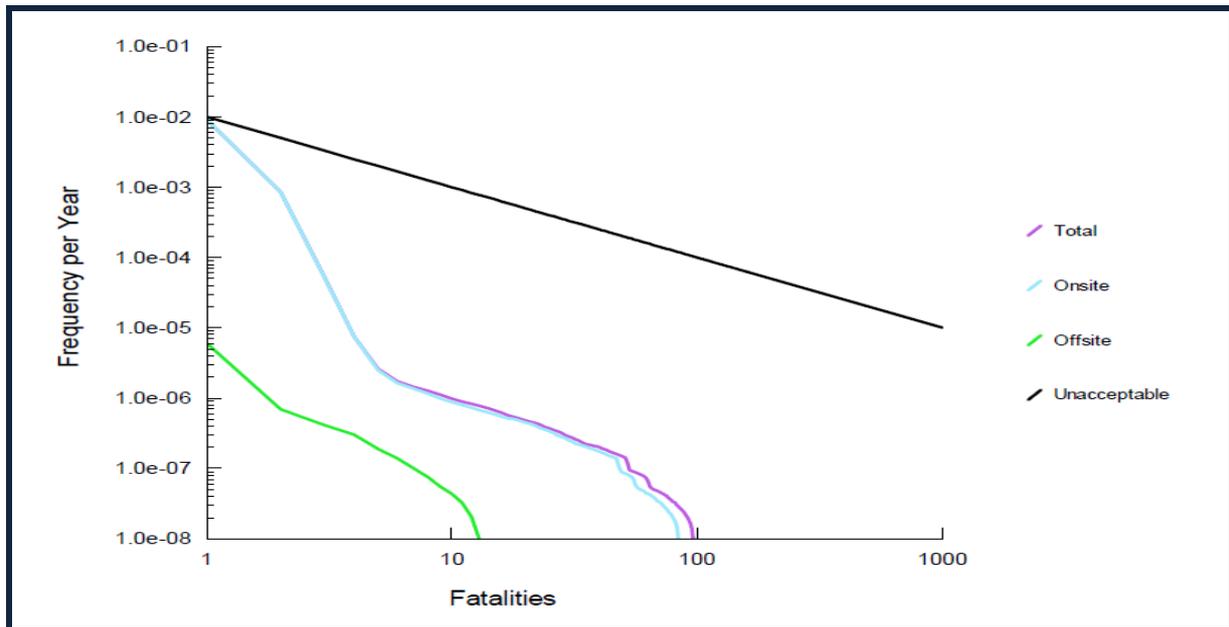


Figure. 74 courbes de fréquence des événements d'Hannibal

La courbe de fréquence des événements, identifie que la fréquence des événements inacceptables (les décès) est de (1.0×10^{-2}) par an avec un nombre de fatalité de 1000. La fréquence des événements pour les travailleurs de l'usine d'Hannibal ont la même fréquence que les événements inacceptables (1.0×10^{-2}) par an, avec un nombre de fatalité moins grave qui excède le 98. Pour les personnes à l'extérieur de l'usine, la fréquence d'événement est moins importante que les autres événements (1.5×10^{-6}), avec un nombre de fatalité de 20.

L'analyse de l'existant a permis d'identifier la présence des risques spécifiques. Ces risques sont élevés quand les personnes sont près des sites de traitement de Gaz, est diminuent de plus en plus en s'éloignant du site. La fatalité de ces risques est importante

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

quelque soit l'emplacement des personnes, et devient inacceptable pour les travailleurs dans le site de traitement de Gaz.

3.2 Identification des dangers

L'étape d'identification des dangers consiste à mettre en évidence les défauts ou vulnérabilités auxquelles l'unité considérée est confrontée. Cette identification est réalisée selon le degré d'apparence de l'indicateur « **Risques de Perte de Vie** » pour l'ensemble des risques spécifiques et ceci pour chaque unité de travail. Le **(RPV)** est la perte de la vie en tenant compte du risque spécifique pour chaque travailleur et le nombre total de personnel sur place et à l'extérieur. Cela peut être utilisé pour classer différents scénarios, ou dans une analyse coûts-avantages. Le Tableau. 20 donne le **(RPV)** pour les personnes à l'intérieur et à l'extérieur des sites de traitement de Gaz.

Risque de perte de vie par an (RPV)			
Unité de travail	Types de dangers	A l'intérieur du site	A l'extérieur du site
C-01	Défaut de section au dessous du sol de la ligne d'importation de Gaz	$1.23e^{-04}$	$5.81e^{-07}$
C-02	Défaut catastrophique du receveur de pastille	$8.97e^{-03}$	$1.07e^{-06}$
C-03(1)	Instabilité du condensateur déchargé en dehors du H2S	$1.21e^{-05}$	$2.08e^{-08}$
C-03(2)	Instabilité du condensateur de la ligne reliant le receveur de pastille à la zone de stabilisation du condensateur	$4.39e^{-04}$	$1.22e^{-07}$
C-04	Fuite dans la compression de Gaz naturel pour la vente	$4.28e^{-03}$	$2.12e^{-09}$
C-05	Rupture catastrophique de la sphère de réception	$3.49e^{-02}$	$1.27e^{-08}$
C-06	Déchargement de Gaz avec H2S	$2.07e^{-03}$	$2.58e^{-06}$
C-07	Défaut dépendant de l'emmagasinage du réservoir de propane	$2.84e^{-03}$	$1.84e^{-06}$
C-08	Défaut indépendant de l'emmagasinage du réservoir de propane	$4.21e^{-02}$	$2.21e^{-08}$
C-09	Fuite du réservoir H2SO4	$6.33e^{-04}$	$8.23e^{-07}$
C-10	Déchargement de l'acide de gaz	$6.04e^{-05}$	$2.44e^{-07}$
C-11	Fuite dans la canalisation de glycol pour l'unité de Gaz naturel	$1.44e^{-02}$	$4.54e^{-06}$
C-12	Rupture du filtre d'union F-0501B associé aux travaux de canalisation	$1.51e^{-03}$	$0.28e^{-09}$
C-13	Défaut catastrophique dans l'emmagasinage du réservoir du gaz naturel	$2.06e^{-03}$	$3.68e^{-08}$
C-14	Fuite dans la canalisation de Gaz naturel	$1.72e^{-03}$	$1.02e^{-09}$
C-15	Ligne de Gaz interrompu de la cuve de réacteur à la concentration des colonnes (67%, CO2 avec SO2 et H2SO4)	$5.45e^{-04}$	$1.94e^{-07}$
C-16(1)	Délivrance de Gaz naturel	$1.81e^{-04}$	$3.35e^{-09}$
C-16(2)	Délivrance de baisseement de Gaz naturel	$3.81e^{-03}$	$1.55e^{-08}$
C-17	Défaut dans la canalisation de propane	$6.06e^{-03}$	$3.27e^{-07}$

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

C-18	Défaut catastrophique d'une concentration de la colonne	3.94e ⁻⁰⁴	3.35e ⁻⁰⁹
C-19	Rupture de Gaz à l'export	2.00e ⁻⁰⁵	1.46e ⁻⁰⁷
C-20	Défaut de mesurage de Gaz naturel	1.28e ⁻⁰³	3.61e ⁻⁰⁹
C-21	Rupture du condensateur reliant le condensateur de stabilisation aux réservoirs d'emmagasinages	4.81e ⁻⁰²	6.61e ⁻⁰⁸
C-22	Fuites dans la surface du réservoir de perforations	3.24e ⁻⁰⁵	1.21e ⁻⁰⁷
C-23	Fuite dans la compression de Gaz naturel pour la vente	1.45e ⁻⁰³	2.13e ⁻⁰⁹
C-25	Rupture du condensateur de la ligne d'exportation C-25	3.49e ⁻⁰⁵	0.33e ⁻⁰⁹
C-26	Petit déclenchement de la canalisation C-26	6.68e ⁻⁰⁴	1.88e ⁻⁰⁸
C-27(1)	Défaut catastrophique dans le navire de Gaz combustible D-2201	1.29e ⁻⁰³	1.55e ⁻⁰⁷
C-27(2)	Défaut catastrophique dans le navire de Gaz combustible D-2202	3.59e ⁻⁰²	0.55e ⁻⁰⁷
C-27(3)	Défaut dans la libération de Gaz combustible	2.88e ⁻⁰⁴	1.68e ⁻⁰⁸
C-28	Fuite dans la ligne de stabilisation de Gaz naturel	1.70e ⁻⁰²	4.63e ⁻⁰⁷
C-30	Instabilité de la zone d'admission de Gaz naturel et la tubulure reliant la zone d'admission Amine	1.26e ⁻⁰³	3.66e ⁻⁰⁸
C-40	Instabilité du condensateur de libération en dehors de H2S	5.34e ⁻⁰²	6.44e ⁻⁰⁷
S-01	Non transfert d'acide de Gaz dans les tuyaux de l'unité d'Amine	3.36e ⁻⁰⁴	1.63e ⁻⁰⁸
S-02	Fuite d'acide de Gaz	5.66e ⁻⁰²	2.02e ⁻⁰⁴
S-03	Défaut catastrophique du réacteur de l'unité S03	1.42e ⁻⁰²	8.62e ⁻⁰⁸
S-04	Défaut indépendant de l'emmagasinage du réservoir du gaz naturel	2.58e ⁻⁰⁴	0.93e ⁻⁰⁹
S-05	Défaut catastrophique de la citerne de stockage H2SO4	3.78e ⁻⁰⁴	2.88e ⁻⁰⁸
S-06	Instabilité des liquides de concentration des colonnes à la cuve tampon (85%, H2SO4)	5.02e ⁻⁰³	1.17e ⁻⁰⁷
S-07	Rupture de la ligne de la citerne de stockage au cours du chargement de camion	5.06e ⁻⁰²	2.23e ⁻⁰⁵
S-08	Défaut dans la citerne du camion conduiront à la perte de contenant de la citerne	6.57e ⁻⁰²	3.06e ⁻⁰⁷

Tableau. 20 Classement des risques spécifiques (RS)

Le tableau ci-dessus a permis l'identification des dangers à l'intérieur et à l'extérieur du site de traitement de Gaz Hannibal. Ainsi, la figure ci-dessous schématise une cartographie de localisation des dangers dans les différentes unités de travail :

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

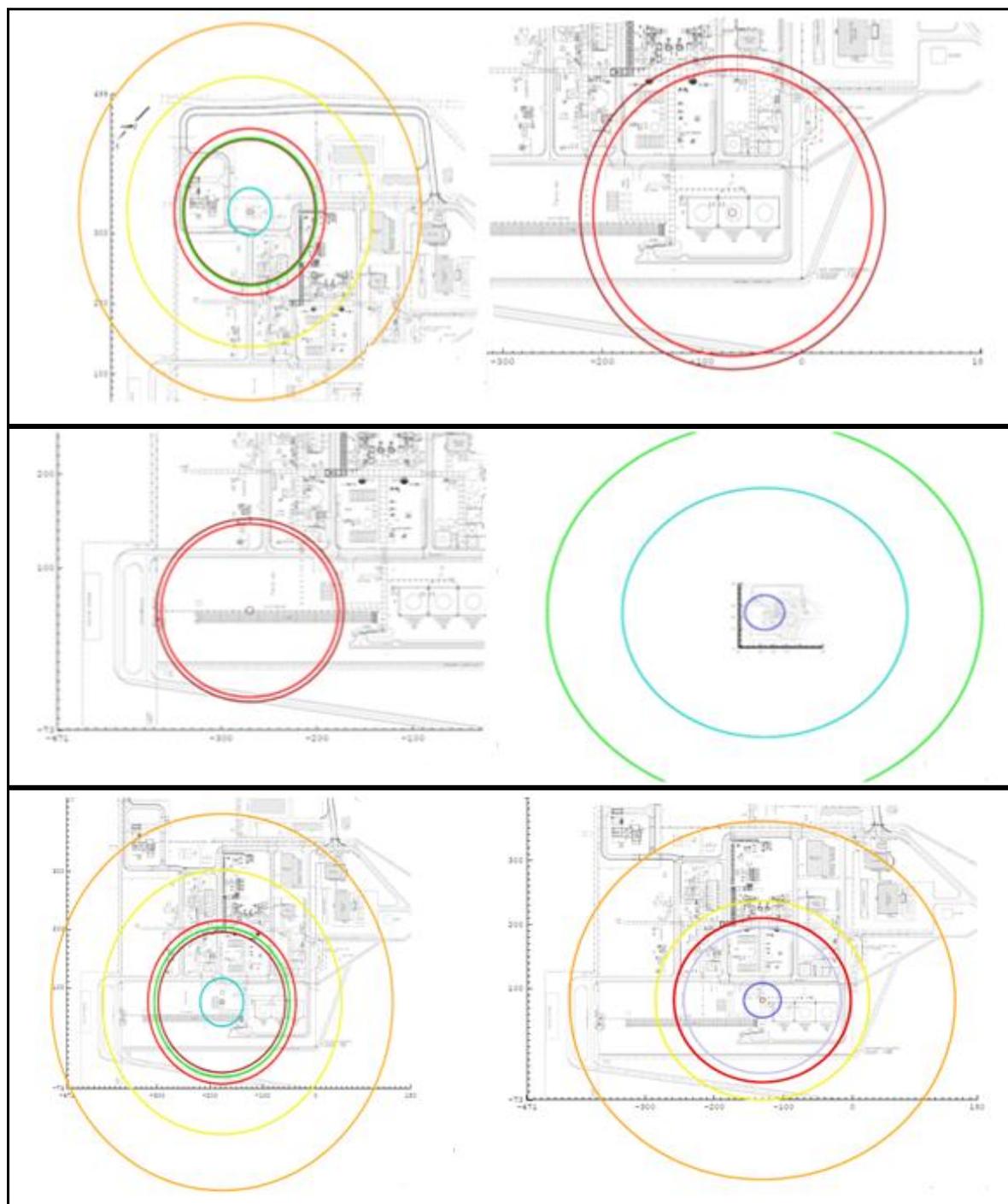


Figure. 75 Cartographie de localisation des dangers dans les unités de travail

La schématisation de la localisation des dangers dans les différentes unités de travail de l'usine de traitement de Gaz Hannibal, a permis de cerner les dangers qui diffère selon

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

l'emplacement des personnes concernées. Plus les personnes concernées sont près des champs de traitement de Gaz, plus la gravité du danger augmente. Et au contraire, plus les personnes concernées sont éloignées des champs de traitement de Gaz, plus est moins importante. L'étape d'identification des dangers a permis de faire une description détaillée des différents types de dangers qui existent dans chaque unité de travail et ceci pour les personnes à l'intérieur et à l'extérieur du site de travail. La bonne réalisation de cette étape « identification des dangers », permet la bonne réalisation de tous le processus d'optimisation de la fiabilité humaine. (ANNEXE 2)

3.3 Identification des risques

L'étape d'identification des risques spécifiques est réalisée par l'outil de sûreté de fonctionnement AMDEC. L'AMDEC est essentiellement une démarche inductive, aussi exhaustive que possible, qui consiste à identifier, les risques spécifiques dans les différentes unités de traitement de Gaz ayant une menace sur la santé des travailleurs, leurs causes et leurs effets.

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

TDC FMEA - [Copie de Copie de copie finalejj - Animateur (Sans mot de passe) - A

Fichier Edition Affichage Insertion Outils Fenêtre ?

Tableau Amdec Process PSA

Opération : traitement de gaz naturel

	Défaut potentiel	Effets du défaut	Causes du défaut	Surveillance	D	F	G	C	M
1	Défaut de section au dessous du sol de la ligne d'importation de Gaz	Atteinte cellulaire irréversible	Mauvais état du sol	Détection automatique	5	7	3	105	
2		Arrêt cardiaque	Difficulté de fixation de la valeur limite de mesurage	Détection automatique	8	5	8	320	
3	Défaut de mesurage de Gaz naturel	Atteinte cellulaire irréversible	Sensibilité de l'ouvrier par exposition au combustible inflammable	Détection automatique	7	3	4	84	
4		Fatigue respiratoire	Sensibilité de l'ouvrier par exposition au combustible inflammable	Détection automatique	6	5	4	120	
5	Petit déclenchement de la canalisation C26	Fatigue respiratoire	Filtre de la canalisation non conforme	Détection automatique	5	8	8	320	
6	Rupture catastrophique de la sphère de reception	Incendie: Brûlure grave	Apparence d'une source électrique dans la cuve du gaz inflammable	Détection automatique	6	5	7	210	
7	Rupture catastrophique du receveur de pastille	Incendie : Brûlure grave	Apparence d'une source électrique dans la cuve du Gaz inflammable	Détection automatique	7	8	8	448	
8	Déchargement du Gaz avec H2S	Atteinte rénale ou convulsion	Procédés de déchargement de Gaz mal maitrisé	Détection automatique	5	8	9	360	
9	Défaut indépendant de l'émagasinage du reservoir du Gaz naturel	Fatigue respiratoire: Asphyxie	Non utilisation des protecteurs munis de coquilles	Détection automatique	3	4	7	84	

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

TDC FMEA - [Copie de Copie de copie finalejj - Animateur (Sans mot de passe) - A

Fichier Edition Affichage Insertion Outils Fenêtre ?

Tableau Amdec Process PSA

Opération : traitement de gaz naturel

	Défaut potentiel	Effets du défaut	Causes du défaut	Surveillance	D	F	G	C	M
10	Rupture du filtre d'union F-0501 B associé aux travaux de canalisation	Explosion: Intoxication	Manque de maintenance du filtre d'union F-0501 B	Détection automatique	3	8	6	144	
11	Délivrance de Gaz naturel	Explosion: Intoxication	Procédés mal maîtrisé	Détection automatique	2	8	9	144	
12	Délivrance de baissment de Gaz naturel	Trouble de rythme cardiaque	Difficulté de fixation du niveau de baissment	Détection automatique	5	6	7	210	
13	Instabilité dans la zone d'admission de Gaz naturel et la tubulure reliant la zone d'admission Amine	Trouble respiratoire	Utilisation d'une appareil de soudure près de la zone d'admission Amine	Détection automatique	8	2	6	96	
14	Fuite dans les canalisations de Gaz nature	Arrêt cardiaque	Difficulté de fixation du niveau de baissment	Détection automatique	9	3	9	243	
15	Rupture de Gaz à l'export	Intoxication foudroyante	Deversement accidentel	Détection automatique	8	4	7	224	
16	Rupture du condensateur reliant le condensateur de stabilisation aux reservoirs d'émagasinage:	Explosion: Effet nefaste décès	Apparence des trous dans les canales du condensateur de stabilisation	Détection automatique	9	3	10	270	
17	Défaut catastrophique dans le navire de Gaz combustible D-2202	Incendie: brûlure grave et décès	Allumage d'un briquet au voisinage des orifices du navire de Gaz combustible	Détection automatique	7	4	10	280	
18	Défaut catastrophique dans le navire de gaz combustible D-2201	Incendie: brûlure grave et décès	Allumage d'un briquet au voisinage des orifices du navire de Gaz	Détection automatique	7	4	10	280	

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

TDC FMEA - [Copie de Copie de copie finalejj - Animateur (Sans mot de passe) - A

Fichier Edition Affichage Insertion Outils Fenêtre ?

Tableau Amdec Process PSA

Opération : traitement de gaz naturel

	Défaut potentiel	Effets du défaut	Causes du défaut	Surveillance	D	F	G	C
19	Fuite d'acide de Gaz	Explosion: Décès	Manque de maintenance du filtre	Détection automatique	2	6	9	108
20	Instabilité du condensateur de la ligne reliant le receveur de pastille à la zone de stabilisation du condensateur	Arrêt cardiaque	Procédés mal maitrisé	Détection automatique	4	8	7	224
21	Instabilité du condensateur déchargé en dehors du H2S	Explosion: Intoxication	Procédés mal maitrisé	Détection automatique	5	8	9	360
22	Déchargement de l'acide de Gaz	Trouble respiratoire	Procédés mal maitrisé	Détection automatique	7	2	5	70
23	Fuite dans la canalisation de glycol pour l'unité de Gaz naturel	Arrêt cardiaque	Apparence des trous dans les canaux de glycol	Détection automatique	9	1	8	72
24	Fuite dans la ligne de stabilisation de Gaz naturel	Fatigue respiratoire	Manque de maintenace du filtre	Détection automatique	7	4	9	252
25	Défaut dépendant de l'émagasinage du reservoir de propane	Effet reversible sur la foie	Variation dans le niveau de fixation d'emmagasinage	Détection automatique	8	4	9	288
26	Défaut indépendant de l'émagasinage du reservoir de propane	Tumeurs cérébrales	Variation dans le niveau de fixation d'emmagasinage	Détection automatique	3	8	10	240
27	Fuite dans la canalisation de propane	Atteinte cellulaire irréversible	Manque de maintenance du canale	Détection automatique	9	2	6	108

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

TDC FMEA - [Copie de Copie de copie finalejj - Animateur (Sans mot de passe) - Ar

Fichier Edition Affichage Insertion Outils Fenêtre ?

Tableau Amdec Process PSA

Opération : traitement de gaz naturel

	Défaut potentiel	Effets du défaut	Causes du défaut	Surveillance	D	F	G	C	N
28	Défaut catastrophique du réacteur de l'unité S03	Brûlure grave	Mauvais état du sous sol du réacteur	Détection automatique	7	5	9	315	
29	Défaut catastrophique de la concentration de la colonne	Atteinte cellulaire irréversible	Difficulté de fixation du niveau de concentration	Détection automatique	5	4	6	120	
30	Fuite dans la compression de Gaz naturel pour la vente	Atteinte du système nerveux	Sensibilité de l'ouvrier par exposition au combustible	Détection automatique	7	2	8	112	
31	Défaut catastrophique dans l'emménagement des réservoirs de Gaz naturel	Brûlure grave	Mauvaise condition d'emménagement	Détection automatique	3	7	7	147	
32	Fuite dans la surface du réservoir de perforation	Fatigue respiratoire	Procédés mal maîtrisés	Détection automatique	2	9	4	72	
33	Rupture du condensateur de la ligne d'exportation C25	Explosion: Intoxication	Procédés mal maîtrisés	Détection automatique	3	7	8	168	
34	Défaut dans la libération du Gaz combustible	Arrêt cardiaque	Difficulté de fixation du niveau de libération	Détection automatique	3	7	7	147	
35	Instabilité du condensateur de libération en dehors de H2S	Atteinte cellulaire irréversible	Mauvais état du sous sol	Détection automatique	3	6	8	144	
36	Non transfert d'acide de Gaz dans les tuyaux de l'unité d'Amine	Intoxication	Faible résistance de transfert dans les tuyaux	Détection automatique	7	4	9	252	

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

TDC FMEA - [Copie de Copie de copie finale] - Animateur (Sans mot de passe) - A

Fichier Edition Affichage Insertion Outils Fenêtre ?

Tableau Amdec Process PSA

Opération : traitement de gaz naturel

	Défaut potentiel	Effets du défaut	Causes du défaut	Surveillance	D	F	G	C	N
37	Ligne de Gaz interrompu de la cuve de reacteur à la concentration des colonnes(67%, CO2,avec SO2 et H2SO4)	Trouble de rythme cardiaque	Rupture de versemment de gaz	Détection automatique	3	6	7	126	
38	Instabilité des liquides de concentration des colonnes à la cuve tampon (85%, H2SO4)	Atteinte rénale ou convulsion	Mauvais état du sous sol	Détection automatique	9	4	9	324	
39	Défaut catastrophique de la citerne de stockage H2SO4	Arrêt cardiaque	Apparence des trous dans la citerne de stockage	Détection automatique	8	2	8	128	
40	Fuite du reservoir H2SO4	Brûlure grave et décès	Mauvaise condition d'emmagasinage	Détection automatique	7	5	7	245	
41	Défaut dans la citerne du camion conduiront à la perte de contenant de la citerne	Brûlure grave et décès	Manque de sensibilisation du conducteur	Détection automatique	8	2	9	144	
42	Rupture de la ligne de la citerne de stockage en cours du déchargement du camion	Explosion: Intoxication	Procédés mal maîtrisé	Détection automatique	3	7	9	189	
43	Exposition des employés au soufre combustible	Atteinte cellulaire irréversible	Augmentation du soufre à éliminer	Détection automatique	5	3	8	120	

Tableau. 21 AMDEC des risques spécifiques

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

A partir du tableau AMDEC pour l'identification des risques spécifiques (Effets), on constate que la gravité des dangers varie entre [4,10], donc elle peut être considérée comme une gravité de grande importance, aussi, la criticité d'évaluation du poids de chaque risque varie de [70, 448]. Outre, 6 valeurs seulement de la criticité sont < 100 et 37 valeurs de criticité sont > 100.

Le tableau d'AMDEC a permis d'identifier la relation entre Dangers spécifiques (Modes de défaillances) leurs causes et leurs effets.

- Relation Dangers /Risques spécifiques :

Dans le tableau qui suit, on identifie la relation entre Dangers spécifiques (Modes de défaillances) et Risques spécifiques (Effets) :

Dangers	Risques spécifiques
D1 : Défaut de mesurage du Gaz naturel, D2 : Délivrance de baissement du Gaz naturel, D3 : Fuite dans les canalisations de Gaz naturel, D4 : Instabilité du condensateur de la ligne reliant le receveur de pastille à la zone de stabilisation du condensateur, D5 : Fuite dans la canalisation de glycol pour l'unité de Gaz naturel, D6 : Défaut dans la libération du Gaz combustible, D7 : Ligne de Gaz interrompue de la cuve de réacteur à la concentration des colonnes (67%, CO2 avec SO2 et H2SO4), D8 : Défaut catastrophique de la citerne de stockage H2SO4.	R1 : Arrêt cardiaque
D1 : Défaut de section au dessous du sous sol de la ligne d'importation de Gaz, D2 : Défaut de mesurage du Gaz naturel, D3 : Déchargement du Gaz avec H2S, D4 : Défaut dépendant de l'emmagasinage du réservoir de propane, D5 : Défaut indépendant de l'emmagasinage du réservoir de propane, D6 : Fuite dans la canalisation de propane, D7 : Défaut catastrophique de la concentration de la colonne,	R2 : Atteinte cellulaire irréversible

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

<p>D8 : Fuite dans la compression de Gaz naturel pour la vente, D9 : Instabilité des liquides de concentration des colonnes à la cuve tampon (85%, H₂SO₄), D10 : Exposition des employées au soufre combustible.</p>	
<p>D1 : Défaut de mesurage du Gaz naturel, D2 : Petit déclenchement de la canalisation C26, D3 : Défaut indépendant de l'emmagasinage du receveur de Gaz naturel, D4 : Instabilité dans la zone d'admission de Gaz naturel et la tubulure reliant la zone d'admission Amine, D5 : Déchargement de l'acide de Gaz, D6 : Fuite dans la surface du réservoir de perforation.</p>	<p>R3 : Fatigue respiratoire</p>
<p>D1 : Rupture catastrophique du receveur de pastille, D2 : Défaut catastrophique dans le navire de Gaz combustible D-2202, D3 : Défaut catastrophique dans le navire de Gaz combustible D-2201, D4 : Défaut catastrophique du réacteur de l'unité SO₃, D5 : Défaut catastrophique dans l'emmagasinage des réservoirs de Gaz naturel, D6 : Fuite du réservoir H₂SO₄, D7 : Défaut dans la citerne du camion conduiront à la perte de contenant de la citerne.</p>	<p>R4 : Incendie</p>
<p>D1 : Rupture du filtre d'union F-0501 B associé aux travaux de canalisation, D2 : Délivrance de Gaz naturel, D3 : Rupture de Gaz à l'export, D4 : Rupture du condensateur reliant le condensateur de stabilisation aux réservoirs d'emmagasinage, D5 : Fuite d'acide de Gaz, D6 : Instabilité du condensateur déchargé en dehors du H₂S,</p>	<p>R5 : Explosion</p>

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

<p>D7 : Rupture du condensateur de la ligne d'exportation C25, D8 : Non transfert d'acide de Gaz dans les tuyaux de l'unité d'amine, D9 : Rupture de la ligne de la citerne de stockage en cours de déchargement du camion.</p>	
---	--

Tableau. 22 Relation Danger / Risques spécifiques

- Relation Causes /Risques spécifiques :

Causes	Risques spécifiques
<p>C1 : Difficulté de fixation de la valeur limite de mesurage, C2 : Difficulté de fixation du niveau de mesurage, C3 : Procédé mal maitrisé, C4 : Apparence des trous dans les canaux de glycol, C5 : Sensibilité de l'ouvrier par exposition au combustible, C6 : Difficulté de fixation du niveau de libération, C7 : Apparence des trous dans la citerne de stockage.</p>	<p>R1 : Arrêt cardiaque</p>
<p>C1 : Mauvais état du sol, C2 : Sensibilité de l'ouvrier par exposition au combustible inflammable, C3 : Procédé de déchargement de Gaz mal maitrisé, C4 : Variation dans le niveau de fixation d'emmagasinage, C5 : Manque de maintenance du canal, C6 : Difficulté de fixation du niveau de concentration, C7 : Augmentation du soufre à éliminer.</p>	<p>R2 : Atteinte cellulaire irréversible</p>
<p>C1 : Sensibilité de l'ouvrier par exposition au combustible inflammable, C2 : Filtre de canalisation non conforme, C3 : Non utilisation des protecteurs munis de coquilles, C4 : Utilisation d'un appareil de soudure près de la zone d'admission Amine, C5 : Procédé mal maitrisé, C6 : Manque de maintenance du filtre.</p>	<p>R3 : Fatigue respiratoire</p>

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

<p>C1 : Apparence d'une source électrique dans la cuve du Gaz inflammable,</p> <p>C2 : Allumage d'un briquet au voisinage des orifices du navire de Gaz,</p> <p>C3 : Mauvais état du sous sol du réacteur,</p> <p>C4 : Mauvaise condition d'emmagasinage,</p> <p>C5 : Manque de sensibilisation du conducteur,</p>	R4 : Incendie
<p>C1 : Manque de maintenance du filtre d'union F-0501 B,</p> <p>C2 : Procédé mal maîtrisé,</p> <p>C3 : Déversement accidentel,</p> <p>C4 : Apparence des trous dans les canaux du conducteur de stabilisation,</p> <p>C5 : Manque de maintenance du filtre,</p> <p>C6 : Procédé mal maîtrisé,</p> <p>C7 : Faible résistance de transfert dans les tuyaux.</p>	R5 : Explosion

Tableau. 23 Causes / Risques spécifiques

3.4 Classement des risques

La méthode AHP consiste à représenter un problème de décision par une structure hiérarchique reflétant les interactions entre les divers risques, à procéder ensuite à des comparaisons par paires des critères d'évaluations de la hiérarchie, et enfin à déterminer les priorités des risques.

Etape 1 : Décomposition du problème de classification des risques spécifiques en une hiérarchie d'éléments inter reliés. La structure hiérarchique du problème est la suivante :

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

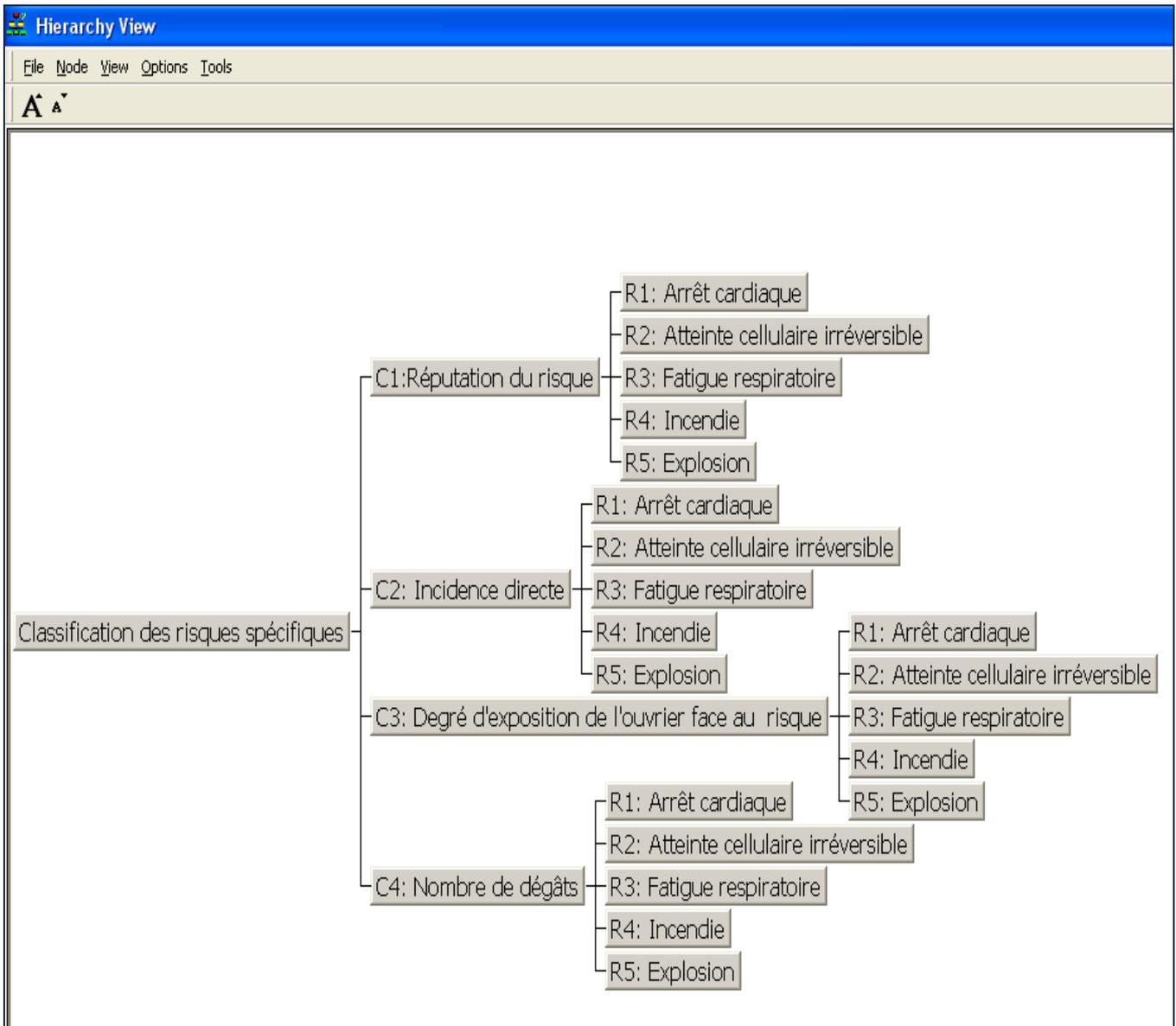


Figure. 76 Structure hiérarchique du problème de classification des risques

Étape 2 : Comparaisons par paires des éléments de chaque niveau hiérarchique par rapport à un élément du niveau hiérarchique supérieur :

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

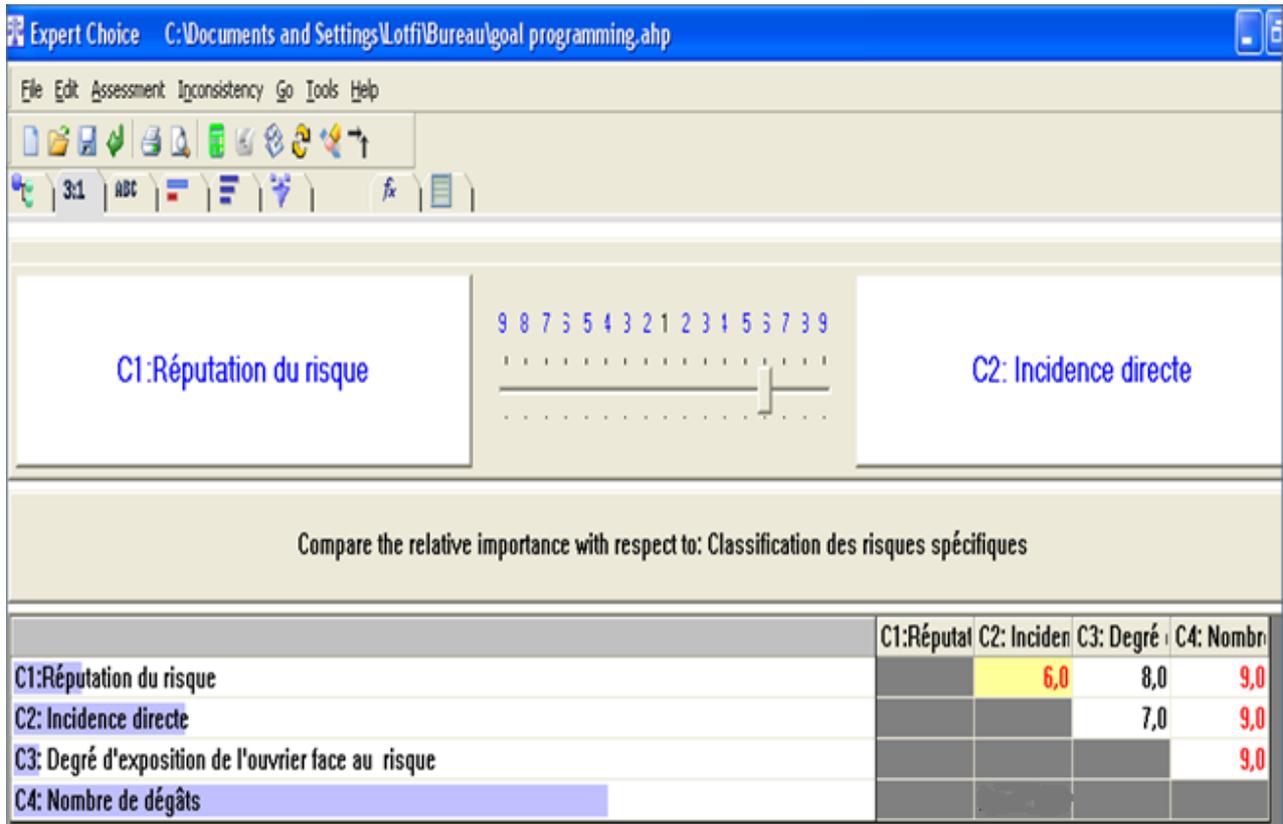


Figure. 77 Comparaison par paire des critères

La comparaison par paires des critères selon la matrice ci-dessus, a permis d'identifier le choix du décideur sur le degré d'importance de chaque critère. Pour le décideur, le critère le plus important est C4 : Nombre de dégâts, et le critère qui n'a pas de grande fatalité sur la décision de la hiérarchisation des risques spécifiques c'est le C3 : Degré d'exposition de l'ouvrier face au risque.

Etape 3 : Détermination de l'importance relative des éléments en calculant les vecteurs propres correspondants aux valeurs propres maximales des matrices de comparaisons.

- Détermination du vecteur propre pour le critère C1 : Réputation du risque

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

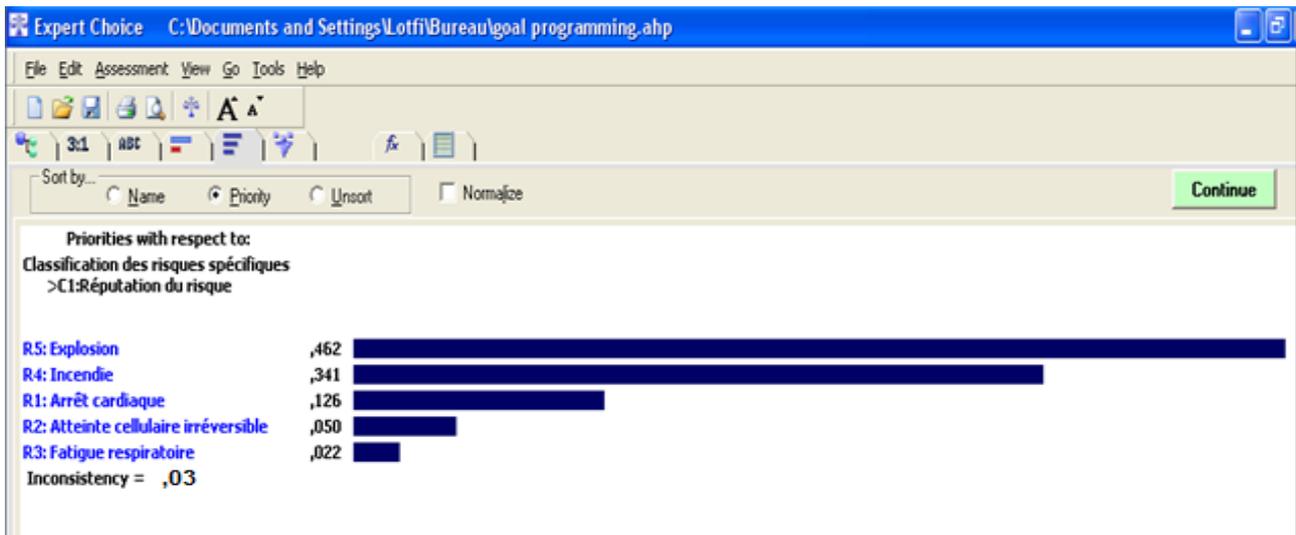


Figure. 78 Vecteur propre correspondant au critère « Réputation du risque »

Le calcul de vecteur propre correspondant pour le critère C1 : Réputation du risque identifie un classement des cinq types de risques spécifiques. Le risque le plus grave selon le critère C1 : Réputation du risque est R5 : Explosion, pourvu qu'il a la valeur du vecteur propre la plus élevée (0,462) ; en d'autre terme le classement des risques spécifiques est a la base de l'ordre décroissant des valeurs obtenu du vecteur propre.

-Détermination du vecteur propre pour le critère C2 : Incidence directe

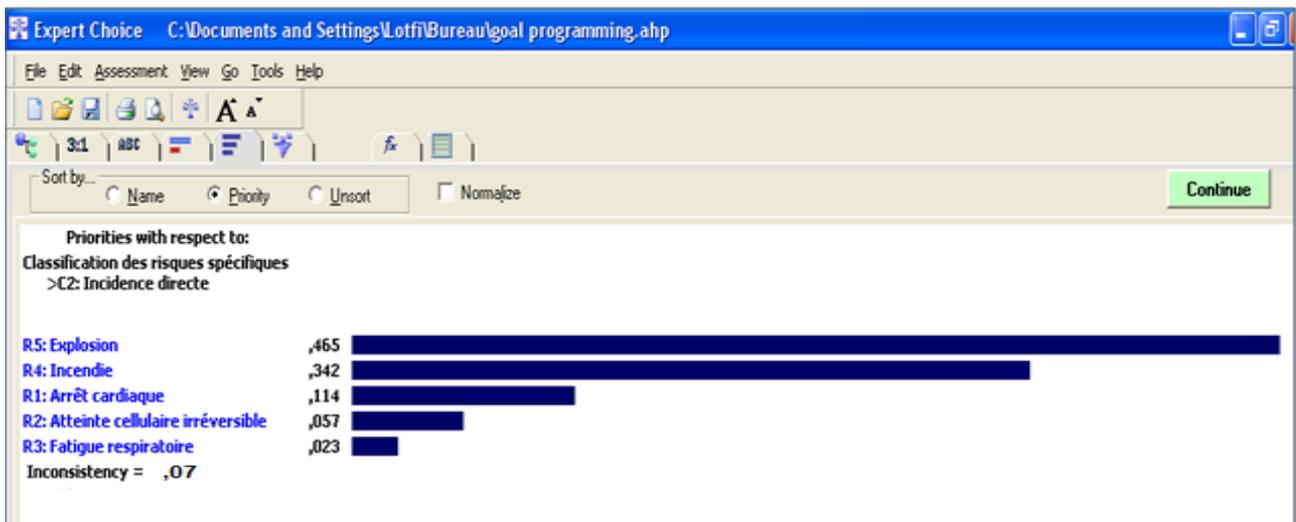


Figure. 79 Vecteur propre correspondant au critère « Incidence directe »

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

Pour le deuxième vecteur propre du critère C2 : Incidence directe, le décideur fait le même classement des risques spécifiques qu'au niveau du critère C1. C'est-à-dire pour les deux critères, le décideur prouve le même degré de gravité pour les cinq risques spécifiques. Le risque le plus fatale selon le critère C2 : Incidence directe, est R5 : Explosion(0,465). Ce qui diffère entre le classement des deux vecteurs propre des critères C1 et C2 c'est l'évaluation du poids donné pour chaque risque spécifique.

-Détermination du vecteur propre pour le critère C3 : Degré d'exposition de l'ouvrier face au risque

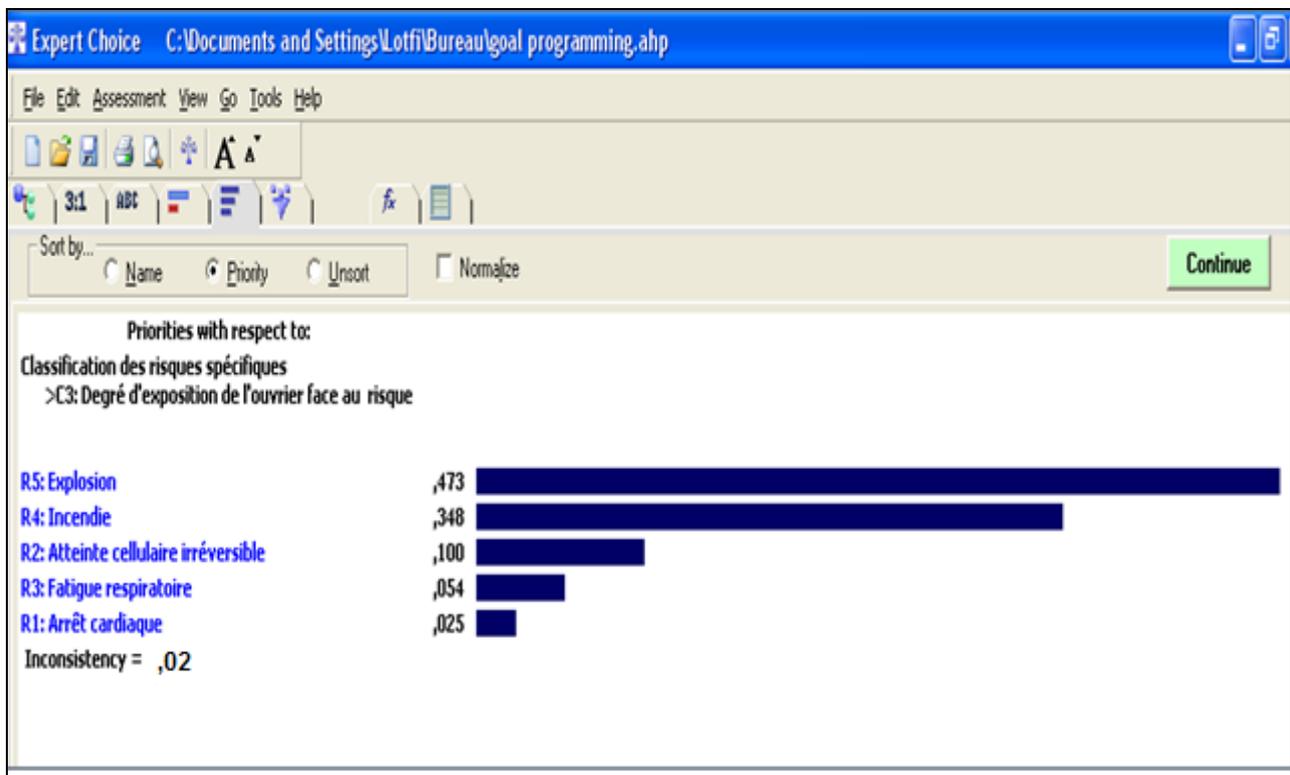


Figure. 80 Vecteur propre correspondant au critère « Degré d'exposition de l'ouvrier face au risque »

Selon le critère C3 : Degré d'exposition de l'ouvrier face au risque, le décideur prouve un peu de différence dans le classement des cinq risques spécifiques selon ce critère. A ce niveau, le décideur priorise R2 : Atteinte cellulaire irréversible avec un poids(0,100) par rapport à R1 : Arrêt cardiaque avec un poids (0,025). Mais le classement du premier risque le plus grave est toujours R5 : Explosion.

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

-Détermination du vecteur propre pour le critère C4 : Nombre de dégâts

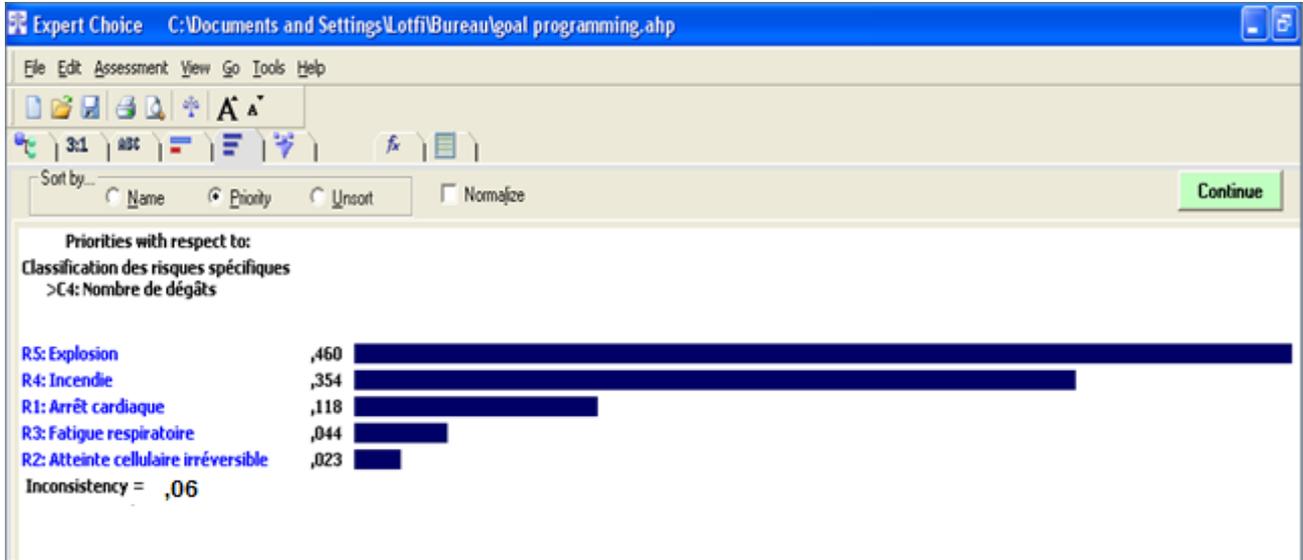


Figure. 81 Vecteur propre correspondant au critère « Nombre de dégâts »

Sur la base du critère C4 : Nombre de dégâts, le décideur hiérarchise les cinq risques spécifiques comme illustré dans la Figure. 96. Le risque R5 : Explosion est classé prioritaire avec un poids d'évaluation (0,460), et le risque R2 : Atteinte cellulaire irréversible est considéré selon le décideur faiblement grave avec un poids de (0,023).

Etape 4 : Vérification de la cohérence des jugements. Tous les jugements sont cohérents ;

Vecteur propre	Ratio de cohérence	Décision
Vecteur propre correspondant au critère C1.	0,03	Cohérence acceptée
Vecteur propre correspondant au critère C2.	0,07	Cohérence acceptée
Vecteur propre correspondant au critère C3.	0,02	Cohérence acceptée
Vecteur propre correspondant au critère C4.	0,06	Cohérence acceptée

Tableau. 24 Jugement des ratios de cohérences

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

-La décision du ratio de cohérence :

SAATY a défini, par expérimentation, un ratio de cohérence comme le rapport de l'indice de cohérence calculé sur la matrice correspondant aux jugements du décideur et de l'indice aléatoire (IA) d'une matrice de même dimension. La cohérence globale d'appréciation est évaluée au moyen de ce ratio de cohérence RC.

Selon SAATY, la valeur de ce dernier doit être au plus égale à **10%**.

Dans le cas où cette valeur dépasse 10%, les appréciations peuvent exiger certaines révisions, et la cohérence est dit non acceptée.

Etape 5 : Calcul de la performance

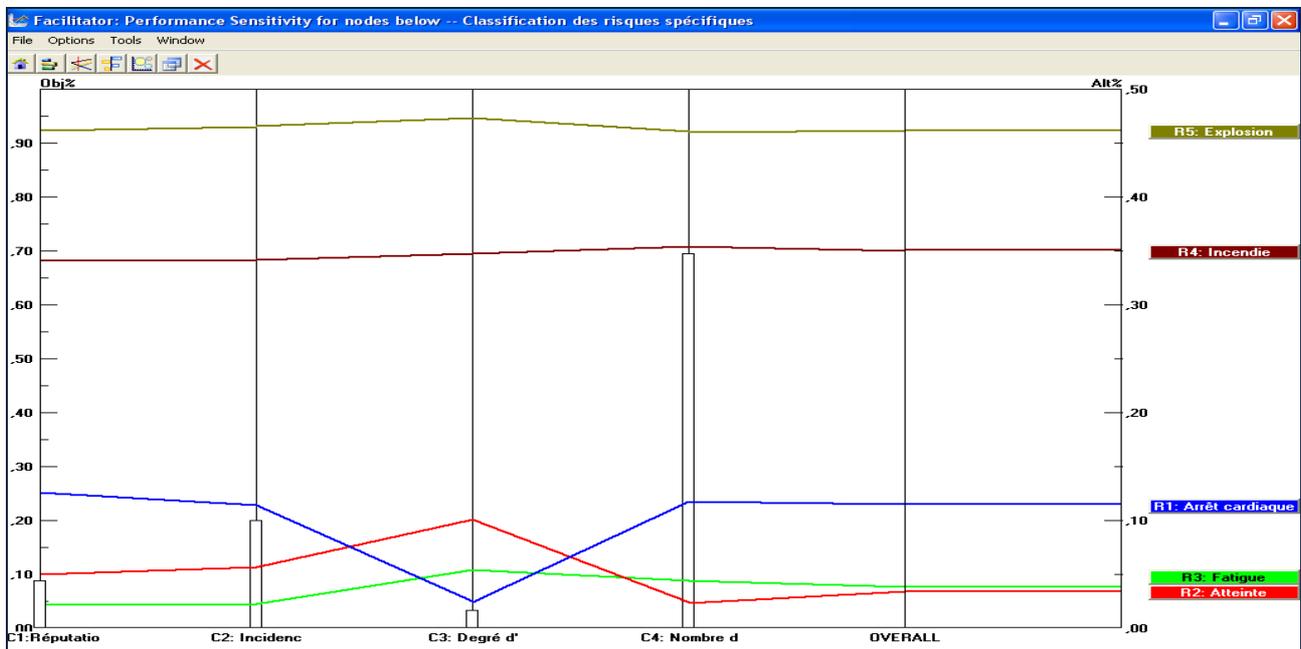


Figure. 82 Performance des risques spécifiques

La hiérarchisation selon la méthode AHP a permis d'établir un classement des risques spécifiques selon leurs degrés de gravité.

Le classement final est comme suit :



Figure. 83 Classement des risques spécifiques

3.5 Optimisation de la fiabilité humaine

La phase d'optimisation de la fiabilité humaine est basée sur le traitement des risques spécifiques. L'objectif du traitement des risques est de réduire les risques inacceptables par application de la méthode multicritère d'aide à la décision « Goal Programming ». Le modèle de Goal Programming avec fonctions de satisfactions permet de tenir compte simultanément de plusieurs objectifs dans une problématique du choix de la meilleure solution parmi un ensemble de solutions réalisables. La procédure d'agrégation des degrés d'atteinte de ces divers objectifs conflictuels, auxquels sont rattachées des unités de mesure de nature généralement différente, soulève quelques difficultés. De plus, le décideur n'est pas suffisamment mis à contribution dans les diverses variantes du Goal Programming.

Ainsi sur la base de l'étape précédente, on commence par la minimisation du risque explosion considéré le plus grave.

L'application du modèle de Goal Programming avec fonctions de satisfactions se réalise selon 3 étapes :

3. 5.1 Minimisation des risques d'explosion

Etape 1 : Evaluation des critères

Les critères sont des expressions qualitatives ou quantitatives de points de vue, d'objectifs, d'aptitudes ou de contraintes relatives au contexte réel, qui permettent d'apprécier des alternatives [SIMOS J. et al 1990]. L'établissement de la liste des critères a fait l'objet de discussions avec le responsable du service Santé, Sécurité et Environnement, car il ne fallait pas :

- Omettre des critères,
- Considérer des critères redondants,
- Tenir compte des expressions dont le sens des préférences ne faisait pas l'unanimité.

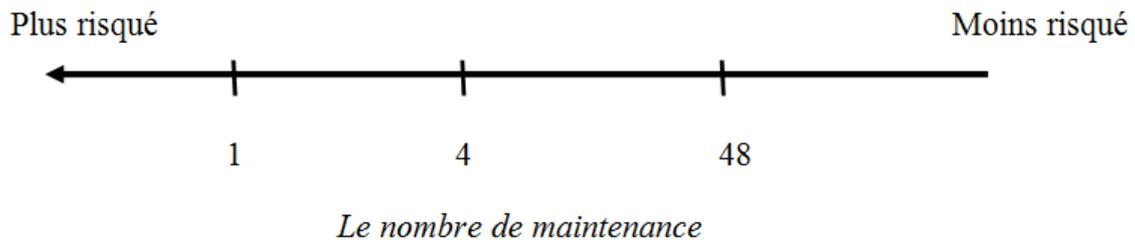
Les critères pris en considération pour la minimisation du risque explosion sont :

-C1 : Le nombre de maintenance

La maintenance, permet d'assurer la sûreté et le bon fonctionnement des différents filtres et canaux de transfert du Gaz. Ce rôle indispensable s'engage à son tour sur la voie de la performance, à travers des démarches de progrès permettant d'exécuter la maintenance avec

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

les moyens les plus adéquats. Ainsi, le nombre de maintenance est l'un des facteurs les plus importants qui agit sur la fiabilité des outils à maintenir afin de minimiser l'apparition des risques:



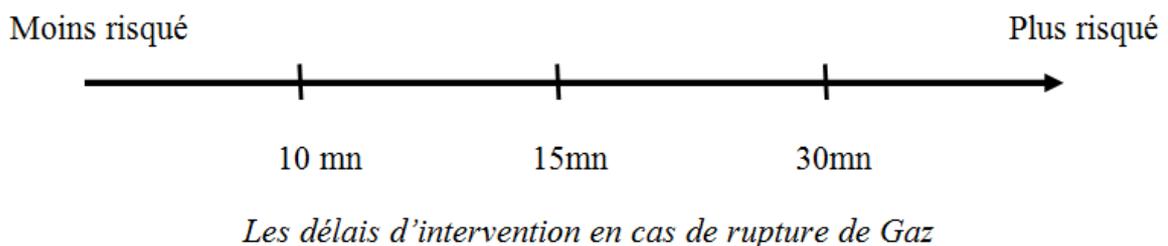
1: Pas de maintenance,

4 : Maintenance trimestrielle,

48 : Maintenance hebdomadaire.

-C2 : Les délais d'intervention en cas de rupture de Gaz

Ce critère est l'un des principaux facteurs qui permet de valoriser la pertinence des services offerts par les agents de protection. Une intervention effectuée dans des temps larges peut ruiner la qualité du service et engendrer par conséquent des résultats non souhaités (explosion,...), le choix du décideur est pris d'une façon stricte :



10 mn : Court délais d'intervention,

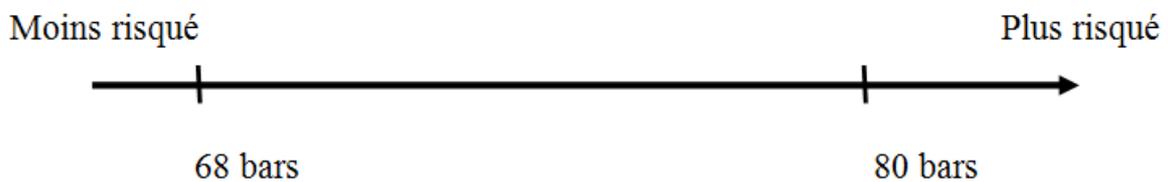
15mn : Moyen délais d'intervention,

30 mn : Large délais d'intervention.

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

-C3: La surpression du Gaz naturel

Le Gaz est comprimé à des pressions qui sont qualifiées de moyennes dans le domaine industriel. La pression maximale de service (P.M.S.) doit être fixée de façon à éviter la surpression ou la sous pression de Gaz naturel dans les canaux. Ainsi, l'apparition dans la canalisation d'une pression supérieure à la pression maximale de service (P.M.S.) peut théoriquement conduire à des fuites de Gaz naturel dans les canaux, ce qui maximise les risques d'explosions.



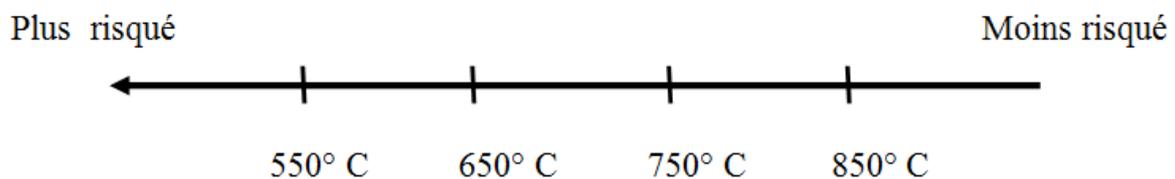
La suppression de Gaz naturel

68 bars: Pression de Gaz naturel normale,

80 bars: Suppression de Gaz naturel.

-C4 : La température de méthane dans le Gaz naturel

Le méthane est le composant principal du Gaz naturel, il est inodore et très inflammable. C'est un fort gaz à effet de serre, le méthane a un pouvoir direct est très corrosif. Le méthane agit dans le Gaz naturel à haute température (environ 850 ° C), le méthane réagit avec la vapeur en présence d'un catalyseur, le nickel, pour produire le gaz.



La température de méthane dans le Gaz naturel

550 ° C : Température de méthane très faible,

650 ° C : Température de méthane faible

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

750 ° C : Température de méthane moyenne,

850 ° C: Température de méthane élevée.

Etape 2 : Les fonctions de satisfaction relatives à chacun des critères

Afin de faciliter la résolution de ce programme, on a retenu les mêmes formes des fonctions de satisfaction illustré par [AOUNI B. et al 1990] dans le chapitre 3. On tient à souligner que les fonctions de satisfaction peuvent varier d'un décideur à un autre. Toutefois, le décideur a été appelé à identifier le niveau à partir duquel il se considère totalement satisfait ou insatisfait.

Le problème est de trouver une solution optimale de la fiabilité humaine permettant de minimiser les risques d'explosion en agissant sur les variables correspondants :

Posons : X_1 : Nombre de maintenance,

X_2 : Délais d'intervention en cas de rupture de Gaz,

X_3 : La surpression du Gaz naturel,

X_4 : La température de méthane dans le Gaz naturel.

Les limites admissibles de ces variables sont données dans le Tableau. 25 :

<i>Variables</i>	<i>Limite admissible</i>
X_1^* : nombre de maintenance	48
X_2^* : Délais d'intervention en cas de rupture de Gaz	10
X_3^* : La surpression du Gaz naturel	68
X_4^* : La température de méthane dans le Gaz naturel	850

Tableau. 25 Limite admissible des variables des Risques Explosion

-Fonction de satisfaction du critère C1 :

Le décideur cherche un nombre de maintenance qui lui permet de couvrir le maximum d'entretien et minimiser les risques d'explosion. La fonction de satisfaction de cet attribut est présentée sous forme d'une fonction linéaire avec zone d'indifférence vue la nature discrète de cette variable, ce qui explique la nature discontinue de la fonction choisie. On vise à se

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

rapprocher des zones qui disposent d'un nombre important de maintenance. Le responsable du service Santé, Sécurité et Environnement a fixé comme but pour sa satisfaction $X_1^* = 48$, c'est-à-dire le nombre de maintenance satisfaisant sera effectué pendant 48 semaines par an. On a retenu la fonction de satisfaction suivante (**Figure. 84**)

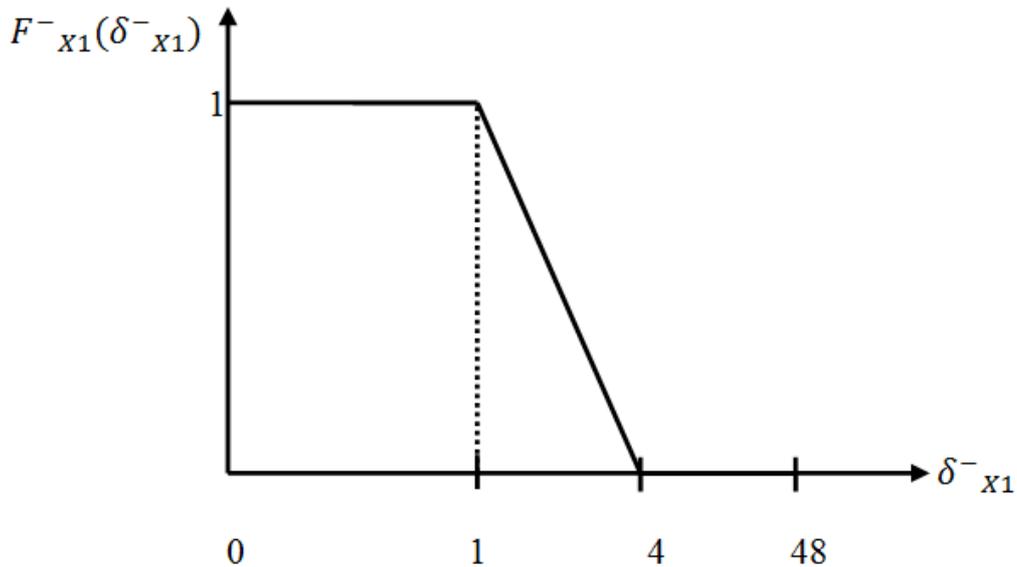


Figure. 84 La fonction de satisfaction du critère C1 : nombre de maintenance

Le décideur atteint sa satisfaction totale lorsque est $F_{x1}^{-}(\delta_{x1}^{-})$ est à son niveau maximal, et la déviation négative de ce critère δ_{x1}^{-} se situe à l'intérieur de l'intervalle $[0,1]$. Le seuil de veto associé à ce critère est fixé à 48, c'est-à-dire au moment où la maintenance se fait de manière hebdomadaire, la probabilité d'apparition des risques explosion devient faible.

La fonction de satisfaction $F_{x1}^{-}(\delta_{x1}^{-})$ peut être écrite comme suit :

$$F_{x1}^{-}(\delta_{x1}^{-}) = \begin{cases} f_1(\delta_{x1}^{-}) = 1, & \text{si } 0 \leq \delta_{x1}^{-} \leq 1, \\ f_2(\delta_{x1}^{-}) = 1.33 - 0.33\delta_{x1}^{-}, & \text{si } 1 \leq \delta_{x1}^{-} \leq 4, \\ f_3(\delta_{x1}^{-}) = 0, & \text{si } 4 \leq \delta_{x1}^{-} \leq 48. \end{cases}$$

La représentation équivalente de cette fonction nécessite l'introduction des trois variables binaires β_{11} , β_{12} et β_{13} . Ces variables sont définies comme suit :

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

$$\beta_{11} = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq \delta^-_{x1} \leq 1, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{12} = \begin{cases} 1, & \text{si } 1 \leq \delta^-_{x1} \leq 4, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{13} = \begin{cases} 1, & \text{si } 4 \leq \delta^-_{x1} \leq 48, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

Ainsi, la fonction peut avoir la forme suivante :

$$\begin{aligned} F^-_{x1}(\delta^-_{c1}) &= \beta_{11} f_1(\delta^-_{x1}) + \beta_{12} f_2(\delta^-_{x1}) + \beta_{13} f_3(\delta^-_{x1}) \\ &= (1) \beta_{11} + (1.33 - 0.33 \delta^-_{x1}) \beta_{12} + (0) \beta_{13} \\ &= \beta_{11} + (1.33 - 0.33 \delta^-_{x1}) \beta_{12} \\ &= \beta_{11} + 1.33 \beta_{12} - 0.33 \beta_{12} \delta^-_{x1} \end{aligned}$$

La représentation linéaire équivalente au programme mathématique qui vise à maximiser la fonction de satisfaction de la déviation négative relative à ce critère se décrit comme suit :

$$\text{Maximiser } Z = \beta_{11} + 1.33 \beta_{12} - 0.33 \beta_{12} \delta^-_{x1}$$

Sujet à :

$$\beta_{12} + 4 \beta_{13} - \delta^-_{x1} \leq 0$$

$$\delta^-_{x1} - \beta_{11} - 4 \beta_{12} - 48 \beta_{13} \leq 0$$

$$\beta_{11} + \beta_{12} + \beta_{13} = 1$$

$$\beta_{11}, \beta_{12} \text{ et } \beta_{13} \in \{0,1\}; \delta^-_{c1} \geq 0; \delta^-_{x1} \leq 48.$$

-Fonction de satisfaction du critère C2 :

Le temps d'intervention des agents de protection en cas de rupture de Gaz doit être minimum pour aboutir à la satisfaction. La fonction de satisfaction de cet attribut est présentée sous forme d'une fonction de Quasi -critère. On vise à se rapprocher de l'optimalité (délai d'intervention court). Le responsable du service Santé, Sécurité et Environnement a fixé comme but pour sa satisfaction $X_2^* = 10$.

On a retenu la fonction de satisfaction suivante (**Figure.85**)

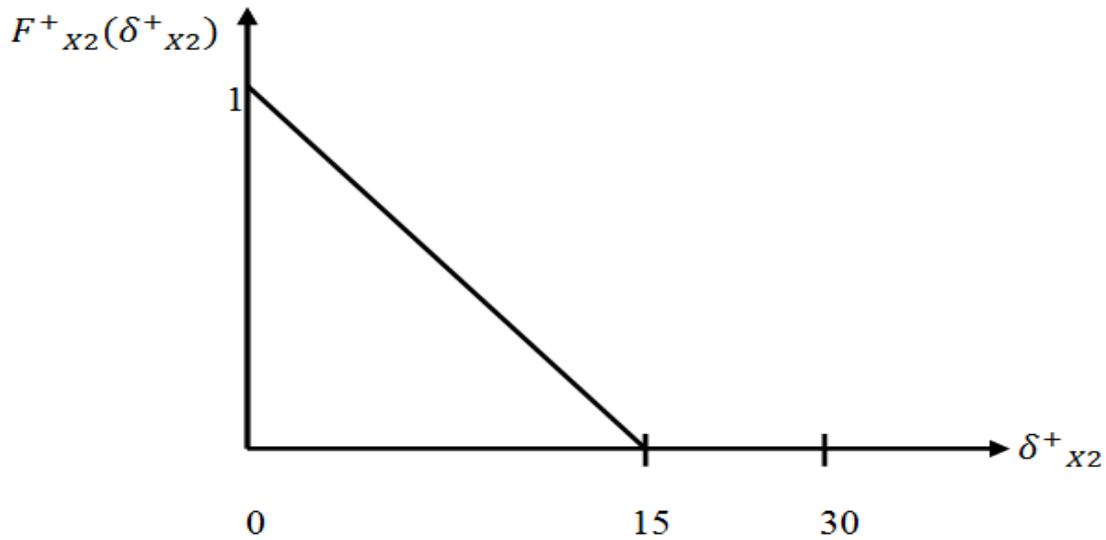


Figure. 85 La fonction de satisfaction du critère C2 : Délais d'intervention en cas de rupture de Gaz

Le décideur atteint sa satisfaction totale lorsque la déviation par rapport au but $X_2^* = 10$ est nulle sa satisfaction est décroissante pour les déviations appartenant à l'intervalle $[0,15]$.

Par ailleurs, le décideur est totalement insatisfait pour toute valeur dépassant le seuil de veto fixé à 30.

La fonction de satisfaction $F_{x2}^+(\delta_{x2}^+)$ peut être écrite comme suit :

$$F_{x2}^+(\delta_{x2}^+) = \begin{cases} f_1(\delta_{x2}^+) = 1 - 0.06 \delta_{x2}^+, & \text{si } 0 \leq \delta_{x2}^+ \leq 15, \\ f_2(\delta_{x2}^+) = 0, & \text{si } 15 \leq \delta_{x2}^+ \leq 30. \end{cases}$$

La représentation équivalente de cette fonction nécessite l'introduction des deux variables binaires β_{21}, β_{22} . Ces variables sont définies comme suit :

$$\beta_{21} = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq \delta_{x2}^+ \leq 15, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{22} = \begin{cases} 1, & \text{si } 15 \leq \delta_{x2}^+ \leq 30, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

Ainsi, la fonction peut avoir la forme suivante :

$$\begin{aligned} F_{x2}^+(\delta_{x2}^+) &= \beta_{21} f_1(\delta_{x2}^+) + \beta_{22} f_2(\delta_{x2}^+) \\ &= (1 - 0.06 \delta_{x2}^+) \beta_{21} + (0) \beta_{22} \end{aligned}$$

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

$$= \beta_{21} - 0.06\delta^+_{x2}\beta_{21}.$$

La représentation équivalente au programme mathématique qui vise à maximiser la fonction de satisfaction se décrit comme suit :

$$\text{Maximiser } Z = \beta_{21} - 0.06\delta^+_{x2}\beta_{21}$$

Sujet à :

$$\beta_{21} + 15\beta_{22} - \delta^+_{x2} \leq 0$$

$$\delta^+_{x2} - 15\beta_{21} - 30\beta_{22} \leq 0$$

$$\beta_{21} + \beta_{22} = 1$$

$$\beta_{21}, \beta_{22} \in \{0,1\}; \delta^+_{x2} \geq 0; \delta^+_{x2} \leq 30.$$

-Fonction de satisfaction du critère C3 :

La suppression de gaz naturel constitue un risque très grave de fatigue des voies respiratoire. Pour ce faire, le décideur cherche à minimiser les niveaux de surpression. La fonction de satisfaction de cet attribut est présentée sous forme d'une fonction Quasi- critère. Le responsable du service Santé, Sécurité et Environnement a fixé comme but pour sa satisfaction $X_3^* = 68$ bars.

On a retenu la fonction de satisfaction suivante (**Figure. 86**)

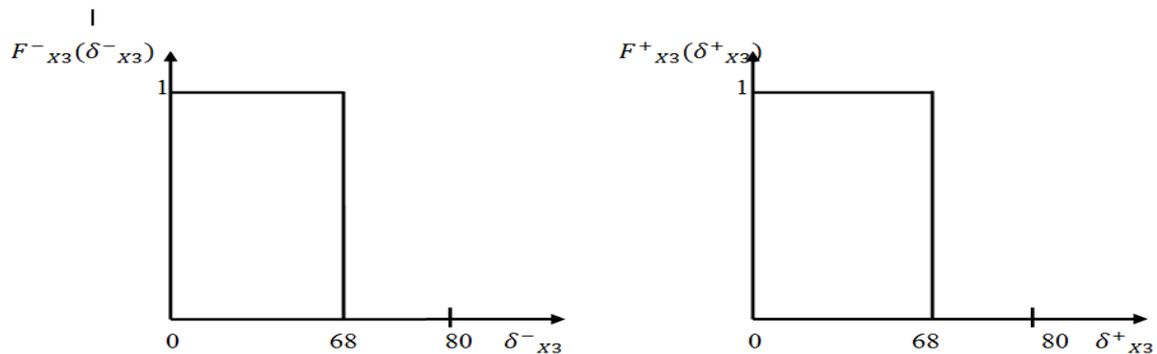


Figure. 86 La fonction de satisfaction du critère C3 : Surpression de Gaz naturel

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

Le décideur atteint sa satisfaction totale lorsque les déviations par rapport au but $X_3^* = 68$, est nulle, sa satisfaction est décroissante pour les déviations $\delta^-_{X_3}$ ou $\delta^+_{X_3}$ appartenant à l'intervalle $[0, 68]$.

Par ailleurs, le décideur est totalement insatisfait pour toute valeur dépassant le seuil de veto fixé à 80 bars.

La fonction de satisfaction $F^-_{X_3}(\delta^-_{X_3})$ peut être écrite comme suit :

$$F^-_{X_3}(\delta^-_{X_3}) = \begin{cases} f_1(\delta^-_{X_3}) = 1, & \text{si } 0 \leq \delta^-_{X_3} \leq 68, \\ f_2(\delta^-_{X_3}) = 0, & \text{si } 67.7 \leq \delta^-_{X_3} \leq 80. \end{cases}$$

La représentation équivalente de cette fonction nécessite l'introduction des deux variables binaires β_{31}, β_{32} . Ces variables sont définies comme suit :

$$\beta_{31} = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq \delta^-_{X_3} \leq 68, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{32} = \begin{cases} 1, & \text{si } 68 \leq \delta^-_{X_3} \leq 80, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

Ainsi, la fonction peut avoir la forme suivante :

$$\begin{aligned} F^-_{X_3}(\delta^-_{X_3}) &= \beta_{31} f_1(\delta^-_{X_3}) + \beta_{32} f_2(\delta^-_{X_3}) \\ &= (1) \beta_{31} + (0) \beta_{32} \\ &= \beta_{31}. \end{aligned}$$

La fonction de satisfaction $F^+_{X_3}(\delta^+_{X_3})$ peut être écrite comme suit :

$$F^+_{X_3}(\delta^+_{X_3}) = \begin{cases} f_1(\delta^+_{X_3}) = 1, & \text{si } 0 \leq \delta^+_{X_3} \leq 68, \\ f_2(\delta^+_{X_3}) = 0, & \text{si } 68 \leq \delta^+_{X_3} \leq 80. \end{cases}$$

La représentation équivalente de cette fonction nécessite l'introduction des deux variables binaires $\beta_{31}^*, \beta_{32}^*$. Ces variables sont définies comme suit :

$$\beta_{31}^* = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq \delta^+_{X_3} \leq 68, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{32}^* = \begin{cases} 1, & \text{si } 68 \leq \delta^+_{X_3} \leq 80, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

Ainsi, la fonction peut avoir la forme suivante :

$$\begin{aligned} F^+_{X_3}(\delta^+_{X_3}) &= \beta_{31}^* f_1(\delta^+_{X_3}) + \beta_{32}^* f_2(\delta^+_{X_3}) \\ &= (1) \beta_{31}^* + (0) \beta_{32}^* \\ &= \beta_{31}^*. \end{aligned}$$

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

La représentation équivalente au programme mathématique qui vise à maximiser la fonction de satisfaction se décrit comme suit :

$$\text{Maximiser } Z = \beta_{31} + \beta_{31}^*$$

Sujet à :

$$68 \beta_{32} - \delta_{x3}^- \leq 0$$

$$\delta_{x3}^- - 68 \beta_{31} - 80 \beta_{32} \leq 0$$

$$68 \beta_{32}^* - \delta_{x3}^+ \leq 0$$

$$\delta_{x3}^+ - 68 \beta_{31}^* - 80 \beta_{32}^* \leq 0$$

$$\beta_{31} + \beta_{32} + \beta_{31}^* + \beta_{32}^* = 1$$

$$\beta_{31}, \beta_{32}, \beta_{31}^* \text{ et } \beta_{32}^* \in \{0,1\}; \delta_{x3}^+ \text{ et } \delta_{x3}^- \geq 0; \delta_{x3}^+ \text{ et } \delta_{x3}^- \leq 80.$$

-Fonction de satisfaction du critère C4 :

La température de méthane dans les composants de Gaz naturel doit être optimale. La fonction de satisfaction de cet attribut est présentée sous forme d'une fonction en escalier vue la nature discrète de cette variable, ce qui explique la nature discontinue de la fonction choisie. Le responsable du service Santé, Sécurité et Environnement a fixé comme but pour sa satisfaction $X_4^* = 850$ ° C.

On a retenu la fonction de satisfaction suivante (**Figure. 87**)

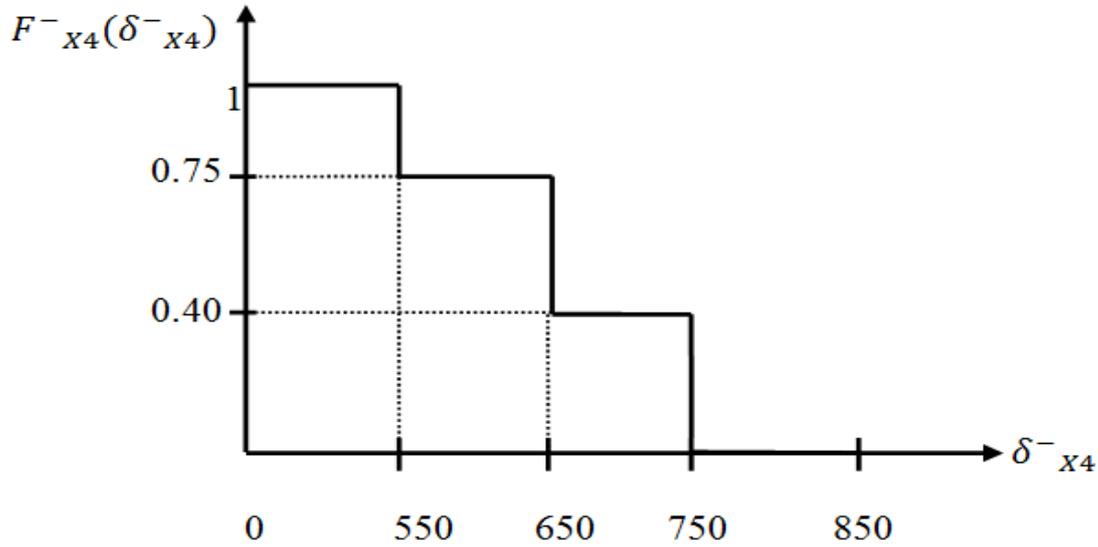


Figure. 87 La fonction de satisfaction du critère C4 : La température de méthane dans le Gaz naturel

Le décideur atteint sa satisfaction totale lorsque est $F^-_{x4}(\delta^-_{x4})$ est à son niveau maximal, et la déviation négative de ce critère δ^-_{x4} se situe à l'intérieur de l'intervalle $[0,550]$. Dès qu'on dépasse ce seuil dit d'indifférence, la satisfaction du décideur diminue. De plus, le seuil de veto associé à ce critère est fixé à 850°C .

La fonction de satisfaction $F^-_{x4}(\delta^-_{x4})$ peut être écrite comme suit :

$$F^-_{x4}(\delta^-_{x4}) = \begin{cases} f_1(\delta^-_{x4}) = 1, & \text{si } 0 \leq \delta^-_{x4} \leq 550, \\ f_2(\delta^-_{x4}) = 0.75, & \text{si } 550 \leq \delta^-_{x4} \leq 650, \\ f_3(\delta^-_{x4}) = 0.40, & \text{si } 650 \leq \delta^-_{x4} \leq 750, \\ f_4(\delta^-_{x4}) = 0 & \text{si } 750 \leq \delta^-_{x4} \leq 850. \end{cases}$$

La représentation équivalente de cette fonction nécessite l'introduction des quatre variables binaires $\beta_{41}, \beta_{42}, \beta_{43}$ et β_{44} . Ces variables sont définies comme suit :

$$\beta_{41} = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq \delta^-_{x4} \leq 550, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{42} = \begin{cases} 1, & \text{si } 550 \leq \delta^-_{x4} \leq 650, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases},$$

$$\beta_{43} = \begin{cases} 1, & \text{si } 650 \leq \delta^-_{x4} \leq 750, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{44} = \begin{cases} 1, & \text{si } 750 \leq \delta^-_{x4} \leq 850, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

Ainsi, la fonction peut avoir la forme suivante :

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

$$\begin{aligned}
 F_{x4}^-(\delta_{x4}^-) &= \beta_{41} f_1(\delta_{x4}^-) + \beta_{42} f_2(\delta_{x4}^-) + \beta_{43} f_3(\delta_{x4}^-) + \beta_{44} f_4(\delta_{x4}^-) \\
 &= (1) \beta_{41} + (0.75) \beta_{42} + (0.40) \beta_{43} + (0) \beta_{44} \\
 &= \beta_{41} + 0.75 \beta_{42} + 0.40 \beta_{43}.
 \end{aligned}$$

Le décideur cherche à maximiser son degré de satisfaction vis-à-vis de cet objectif. Puisque $F_{x4}^-(\delta_{x4}^-)$ ne comporte pas de termes non linéaires, la représentation équivalente au programme mathématique qui vise à maximiser la fonction de satisfaction se décrit comme suit :

$$\text{Maximiser } Z = \beta_{41} + 0.75 \beta_{42} + 0.40 \beta_{43}$$

Sujet à :

$$\begin{aligned}
 550 \beta_{42} + 650 \beta_{43} + 750 \beta_{44} - \delta_{x4}^- &\leq 0 \\
 \delta_{x4}^- - 550 \beta_{41} - 650 \beta_{42} - 750 \beta_{43} - 850 \beta_{44} &\leq 0 \\
 \beta_{41} + \beta_{42} + \beta_{43} + \beta_{44} &= 1 \\
 \beta_{41}, \beta_{42}, \beta_{43} \text{ et } \beta_{44} & \in [0,1]; \delta_{x4}^- \geq 0; \delta_{x4}^- \leq 850.
 \end{aligned}$$

Etape 3 : Application du modèle d'optimisation de la fiabilité humaine sous l'initiative de minimisation des risques explosion

$$\begin{aligned}
 \text{Maximiser } Z &= \beta_{11} + 1.33 \beta_{12} - 0.33 \beta_{12} \delta_{x1}^- + \beta_{21} - 0.06 \delta_{x2}^+ \beta_{21} + \beta_{31} + \beta_{31} + \beta_{41} + \\
 & \quad 0.75 \beta_{42} + 0.40 \beta_{43}
 \end{aligned}$$

Sujet à :

$$\begin{aligned}
 \beta_{12} + 4 \beta_{13} - \delta_{x1}^- &\leq 0 \\
 \delta_{x1}^- - \beta_{11} - 4 \beta_{12} - 48 \beta_{13} &\leq 0 \\
 \beta_{11} + \beta_{12} + \beta_{13} &= 1 \\
 \beta_{21} + 15 \beta_{22} - \delta_{x2}^+ &\leq 0 \\
 \delta_{x2}^+ - 15 \beta_{21} - 30 \beta_{22} &\leq 0 \\
 \beta_{21} + \beta_{22} &= 1 \\
 68 \beta_{32} - \delta_{x3}^- &\leq 0 \\
 \delta_{x3}^- - 68 \beta_{31} - 80 \beta_{32} &\leq 0
 \end{aligned}$$

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

$$\begin{aligned}
 &68 \beta_{32^*} - \delta^+_{X3} \leq 0 \\
 &\delta^+_{X3} - 68 \beta_{31^*} - 80 \beta_{32^*} \leq 0 \\
 &\beta_{31} + \beta_{32} + \beta_{31^*} + \beta_{32^*} = 1 \\
 &550 \beta_{42} + 650 \beta_{43} + 750 \beta_{44} - \delta^-_{X4} \leq 0 \\
 &\delta^-_{X4} - 550 \beta_{41} - 650 \beta_{42} - 750 \beta_{43} - 850 \beta_{44} \leq 0 \\
 &\beta_{41} + \beta_{42} + \beta_{43} + \beta_{44} = 1 \\
 &\beta_{11}, \beta_{12} \text{ et } \beta_{13} = \{0,1\}; \delta^-_{X1} \geq 0; \delta^-_{X1} \leq 48. \\
 &\beta_{21}, \beta_{22} = \{0,1\}; \delta^+_{X2} \geq 0; \delta^+_{X2} \leq 30. \\
 &\beta_{31}, \beta_{32}, \beta_{31^*} \text{ et } \beta_{32^*} = \{0,1\}; \delta^+_{X3} \text{ et } \delta^-_{X3} \geq 0; \delta^+_{X3} \text{ et } \delta^-_{X3} \leq 80. \\
 &\beta_{41}, \beta_{42}, \beta_{43} \text{ et } \beta_{44} = \{0,1\}; \delta^-_{X4} \geq 0; \delta^-_{X4} \leq 850.
 \end{aligned}$$

En utilisant le progiciel LINGO version 10, la solution optimale obtenue pour la minimisation du risque explosion est dans le tableau suivant:

<i>Les variables</i>	<i>Résultat correspondant</i>
X_1	48
X_2	10
X_3	68
X_4	850
Z^*	3.94

Tableau. 26 Solution optimale pour la minimisation du Risque Explosion

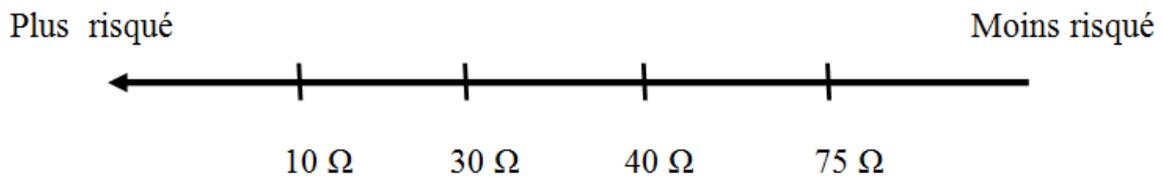
La solution trouvée est satisfaisante avec la prise en charge des préférences du décideur. Il est évident qu'avec l'application des fonctions de satisfactions, la solution est beaucoup améliorée. Le niveau de satisfaction atteint pour les 4 objectifs est de 99%. Ce niveau réalisé de satisfaction implique que toutes les spécifications sont respectées.

3. 5.2 Minimisation des risques d'incendie

Etape 1 : Evaluation des critères

-C1 : La résistance de transfert dans les tuyaux

Une résistance est un composant électronique ou électrique dont la principale caractéristique est d'opposer une plus ou moins grande résistance (mesurée en ohms) à la circulation du courant électrique. La résistance de transfert dans les tuyaux influe d'une façon directe sur le processus de transfert d'acide de Gaz dans les tuyaux de l'unité d'Amine :



La résistance de transfert dans les tuyaux

10 Ω : Absence de résistance,

30 Ω: Résistance Faible,

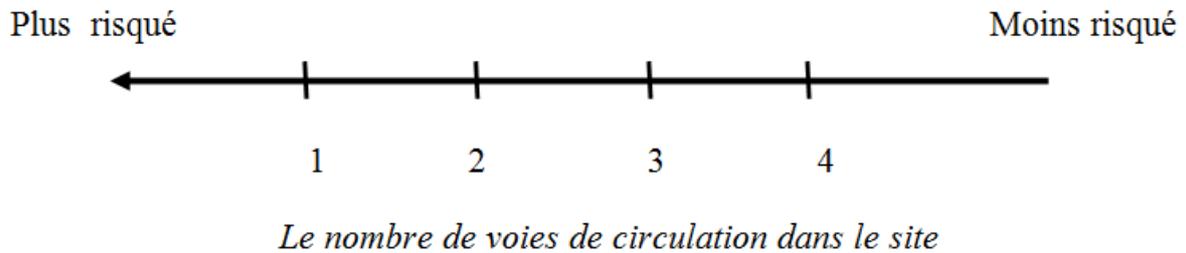
40 Ω: Résistance Moyenne,

75 Ω: Résistance pondérée.

-C2 : Les voies de circulation dans le site

La conception des voies de circulation à l'intérieur du site de traitement de Gaz doit être organisée de façon à éviter les risques d'incendie. Ainsi, afin de faciliter le déplacement des travailleurs chargés de la fonction de traitement, il convient de prévoir des allées de circulation à double sens allant jusqu'à derrière les bâtiments, qui leur permettent de se rendre à des zones d'intervention sans passer à l'intérieurs.

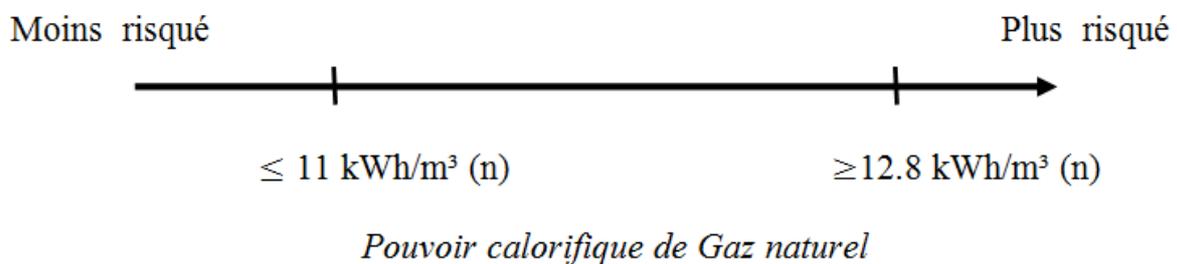
Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie



- 1 : Une voie,
- 2: Deux voies,
- 3: Trois voies,
- 4 : Quatre voies.

-C3 : Pouvoir calorifique de Gaz naturel

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur exprimée en Kilo Watt - heure (kWh) ou Mégajoule (MJ), qui serait dégagée par la combustion complète de 1 mètre cube normal ($m^3(n)$) de Gaz sec dans l'air à une pression absolue constante et égale à 1,01325 bar. La mesure de pouvoir calorifique supérieur (PCS) et du pouvoir calorifique inférieur (PCI), nécessite une précision, car toute mesure incorrecte influe d'une façon directe sur les voies respiratoires des travailleurs à l'intérieur du site de traitement de Gaz Hannibal.



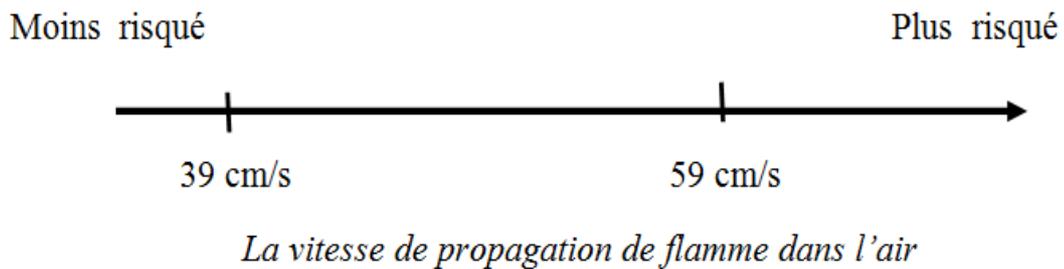
Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

11: Le pouvoir calorifique ne dépasse pas 10.5 kWh/m³(n),

12.8 : Le pouvoir calorifique ne dépasse pas 12.8 kWh/m³(n).

-C4 : La vitesse de propagation de flamme dans l'air

La vitesse à laquelle la flamme se propage aux surfaces combustibles voisines joue un rôle de premier plan dans le développement de tout incendie. La vitesse de propagation dépend, d'une part, des propriétés qui caractérisent l'inflammabilité et, de l'autre, de l'interaction entre la flamme existante et la surface qui se trouve devant le front de l'onde. Lorsqu'un incendie se développe dans une pièce, le feu s'étend plus rapidement par suite du rayonnement thermique, qui croît lui-même à mesure que les flammes progressent. Cela contribue à l'intensification de l'incendie jusqu'au stade de l'embrasement général.



39 cm/s : Faible vitesse,

59 cm/s : Grande vitesse.

Étape 2 : Les fonctions de satisfaction relatives à chacun des critères

Le problème est de trouver une solution optimale de la fiabilité humaine permettant de minimiser les risques d'incendie en agissant sur les variables correspondants.

Posons : **Y₁** : La résistance de transfert dans les tuyaux,

Y₂ : Les voies de circulation dans le site,

Y₃ : Pouvoir calorifique de Gaz naturel,

Y₄ : La vitesse de propagation de flamme dans l'air.

Les limites admissibles sont données dans le Tableau. 27.

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

<i>Variables</i>	<i>Limite admissible</i>
Y_1^* : La résistance de transfert dans les tuyaux	75
Y_2^* : Les voies de circulation dans le site	4
Y_3^* : Pouvoir calorifique de Gaz naturel	11
Y_4^* : La vitesse de propagation de flamme dans l'air	39

Tableau. 27 Limite admissible des variables du Risque Incendie

-Fonction de satisfaction du critère C1 :

Le décideur cherche une résistance de transfert dans les tuyaux qui lui permet un chargement maximum de Gaz liquide afin de minimiser les risques d'explosion à travers le déchargement des tuyaux de transfert qui s'échauffent vite par une faible résistance. La fonction de satisfaction de cet attribut est présentée sous forme d'une fonction en escalier vue la nature discrète de cette variable, ce qui explique la nature discontinue de la fonction choisie. On vise à se rapprocher des zones qui disposent d'une résistance plus élevée. Le responsable du service Santé, Sécurité et Environnement a fixé comme but pour sa satisfaction $Y_1^* = 75$, c'est-à-dire au moment où la résistance de transfert dans les tuyaux atteint 75 Ω le chargement du Gaz liquide atteint son maximum.

On a retenu la fonction de satisfaction suivante (**Figure. 88**)

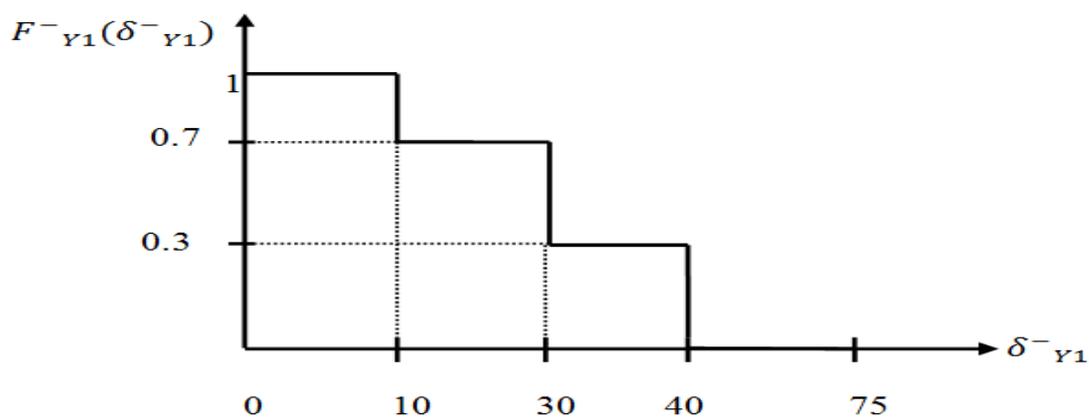


Figure. 88 La fonction de satisfaction du critère C1 : La résistance de transfert dans les tuyaux

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

Le décideur atteint sa satisfaction totale lorsque est $F^-_{Y1}(\delta^-_{Y1})$ est à son niveau maximal, et la déviation négative de ce critère δ^-_{Y1} se situe à l'intérieur de l'intervalle $[0,10]$. Dès qu'on dépasse ce seuil dit d'indifférence, la satisfaction du décideur diminue.

La fonction de satisfaction $F^-_{Y1}(\delta^-_{Y1})$ peut être écrite comme suit :

$$F^-_{Y1}(\delta^-_{Y1}) = \begin{cases} f_1(\delta^-_{Y1}) = 1, & \text{si } 0 \leq \delta^-_{Y1} \leq 10, \\ f_2(\delta^-_{Y1}) = 0.7, & \text{si } 10 \leq \delta^-_{Y1} \leq 30, \\ f_3(\delta^-_{Y1}) = 0.3, & \text{si } 30 \leq \delta^-_{Y1} \leq 40, \\ f_4(\delta^-_{Y1}) = 0 & \text{si } 40 \leq \delta^-_{Y1} \leq 75. \end{cases}$$

La représentation équivalente de cette fonction nécessite l'introduction des quatre variables binaires β_{11}, β_{12} et β_{13} et β_{14} . Ces variables sont définies comme suit :

$$\beta_{11} = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq \delta^-_{Y1} \leq 10, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \beta_{12} = \begin{cases} 1, & \text{si } 10 \leq \delta^-_{Y1} \leq 30, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \beta_{13} = \begin{cases} 1, & \text{si } 30 \leq \delta^-_{Y1} \leq 40, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \\ \beta_{14} = \begin{cases} 1, & \text{si } 40 \leq \delta^-_{Y1} \leq 75, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

Ainsi, la fonction peut avoir la forme suivante :

$$\begin{aligned} F^-_{Y1}(\delta^-_{Y1}) &= \beta_{11} f_1(\delta^-_{Y1}) + \beta_{12} f_2(\delta^-_{Y1}) + \beta_{13} f_3(\delta^-_{Y1}) + \beta_{14} f_4(\delta^-_{Y1}) \\ &= (1) \beta_{11} + (0.7) \beta_{12} + (0.3) \beta_{13} + (0) \beta_{14} \\ &= \beta_{11} + 0.7 \beta_{12} + 0.3 \beta_{13} \end{aligned}$$

Le décideur cherche à maximiser son degré de satisfaction vis-à-vis de cet objectif. Puisque $F^-_{Y1}(\delta^-_{Y1})$ ne comporte pas de termes non linéaires, la représentation équivalente au programme mathématique qui vise à maximiser la fonction de satisfaction est :

$$\text{Maximiser } Z = \beta_{11} + 0.7 \beta_{12} + 0.3 \beta_{13}$$

Sujet à :

$$\beta_{12} + 30 \beta_{13} + 40 \beta_{14} - \delta^-_{Y1} \leq 0$$

$$\delta^-_{Y1} - \beta_{11} - 30 \beta_{12} - 40 \beta_{13} - 75 \beta_{14} \leq 0$$

$$\beta_{11} + \beta_{12} + \beta_{13} + \beta_{14} = 1$$

$$\beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{13} \text{ et } \beta_{14} \in \{0,1\}; \delta^-_{Y1} \geq 0; \delta^-_{Y1} \leq 75.$$

-Fonction de satisfaction du critère C2 :

Afin d'éviter les difficultés d'accès des travailleurs de l'intérieurs à l'extérieurs du site de traitement de Gaz, le décideur cherche à maximiser le nombre des voies de circulation à double sens ce qui permet de minimiser les trébuchements en transportant des produits inflammable. La fonction de satisfaction de cet attribut est présentée sous forme d'une fonction en escalier avec comme but pour sa satisfaction $Y_2^* = 4$.

On obtient la fonction de satisfaction suivante (**Figure. 89**)

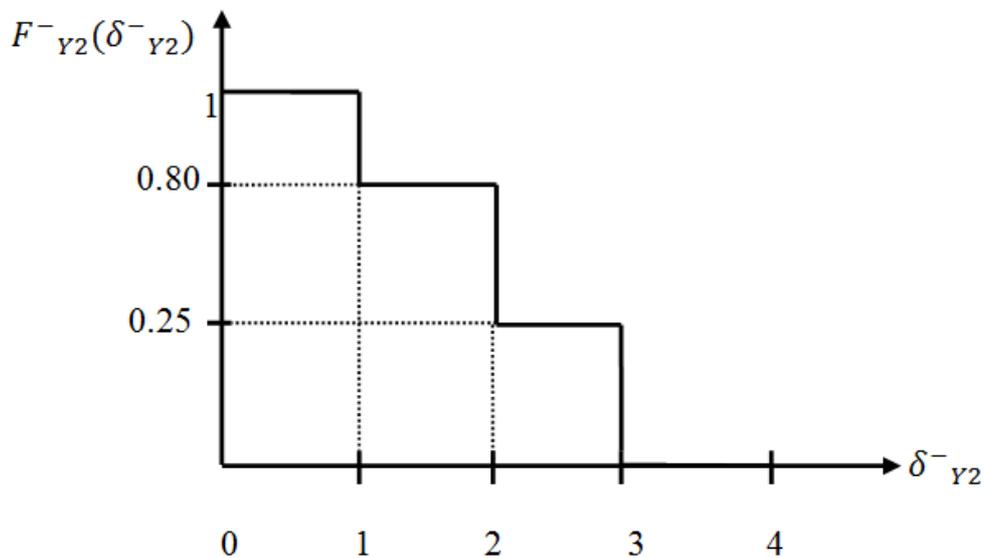


Figure. 89 La fonction de satisfaction du critère C2 : les voies de circulation

Le décideur atteint sa satisfaction totale lorsque est $F_{Y_2}^-(\delta_{Y_2}^-)$ est à son niveau maximal, et la déviation négative de ce critère $\delta_{Y_2}^-$ se situe à l'intérieur de l'intervalle $[0,1]$. Dès qu'on dépasse le seuil fixé à 4, la satisfaction du décideur diminue.

La fonction de satisfaction $F_{Y_2}^-(\delta_{Y_2}^-)$ s'écrit :

$$F_{Y_2}^-(\delta_{Y_2}^-) = \begin{cases} f_1(\delta_{Y_2}^-) = 1, & \text{si } 0 \leq \delta_{Y_2}^- \leq 1, \\ f_2(\delta_{Y_2}^-) = 0.8, & \text{si } 1 \leq \delta_{Y_2}^- \leq 2, \\ f_3(\delta_{Y_2}^-) = 0.25, & \text{si } 2 \leq \delta_{Y_2}^- \leq 3, \\ f_4(\delta_{Y_2}^-) = 0 & \text{si } 3 \leq \delta_{Y_2}^- \leq 4. \end{cases}$$

La représentation équivalente de cette fonction nécessite l'introduction des quatre variables binaires β_{21} , β_{22} et β_{23} et β_{24} Ces variables sont définies comme suit :

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

$$\beta_{21} = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq \delta^-_{Y2} \leq 1, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{22} = \begin{cases} 1, & \text{si } 1 \leq \delta^-_{Y2} \leq 2, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{23} = \begin{cases} 1, & \text{si } 2 \leq \delta^-_{Y2} \leq 3, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

$$\beta_{24} = \begin{cases} 1, & \text{si } 3 \leq \delta^-_{Y2} \leq 4, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

Et la fonction s'écrit :

$$\begin{aligned} F^-_{Y2}(\delta^-_{Y2}) &= \beta_{21} f_1(\delta^-_{Y2}) + \beta_{22} f_2(\delta^-_{Y2}) + \beta_{23} f_3(\delta^-_{Y2}) + \beta_{24} f_4(\delta^-_{Y2}) \\ &= (1) \beta_{21} + (0.8) \beta_{22} + (0.25) \beta_{23} + (0) \beta_{24} \\ &= \beta_{21} + 0.8 \beta_{22} + 0.25 \beta_{23} \end{aligned}$$

L'objectif du décideur cherche est de maximiser son degré de satisfaction. Puisque $F^-_{Y2}(\delta^-_{Y2})$ ne comporte pas de termes non linéaires, la reformulation du programme mathématique est comme suit :

$$\text{Maximiser } Z = \beta_{21} + 0.8 \beta_{22} + 0.25 \beta_{23}$$

Sujet à :

$$\begin{aligned} \beta_{22} + 2 \beta_{23} + 3 \beta_{24} - \delta^-_{Y2} &\leq 0 \\ \delta^-_{Y2} - \beta_{21} - 2 \beta_{22} - 3 \beta_{23} - 4 \beta_{24} &\leq 0 \\ \beta_{21} + \beta_{22} + \beta_{23} + \beta_{24} &= 1 \end{aligned}$$

$$\beta_{21}, \beta_{22}, \beta_{23} \text{ et } \beta_{24} \in \{0,1\}; \delta^-_{Y2} \geq 0; \delta^-_{Y2} \leq 4.$$

-Fonction de satisfaction du critère C3:

Le décideur cherche à minimiser le pouvoir calorifique du Gaz naturel afin qu'il soit égale à 11 kWh/m³(n). La fonction de satisfaction de cet attribut est présentée sous forme d'une fonction de Quasi -critère. On vise à se rapprocher de l'optimalité (minimisation du pouvoir calorifique).

Pourvu, que le décideur cherche une valeur exacte de satisfaction, on a retenu deux fonction de satisfaction (**Figure. 90**)

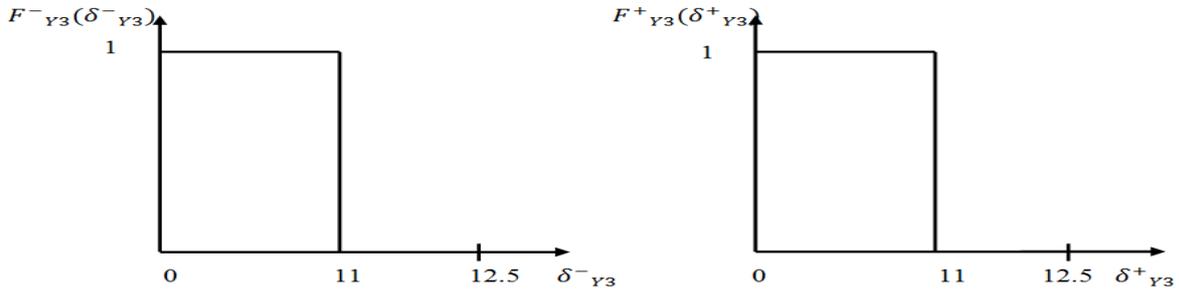


Figure. 90 La fonction de satisfaction du critère C3 : Pouvoir calorifique de Gaz naturel

La satisfaction est décroissante pour les déviations δ^-_{Y3} ou δ^+_{Y3} appartenant à l'intervalle $[0,11]$. Par ailleurs, le décideur est totalement insatisfait pour toute valeur dépassant le seuil de véto fixé à 12.5.

$F^-_{Y3}(\delta^-_{Y3})$ s'écrit :

$$F^-_{Y3}(\delta^-_{Y3}) = \begin{cases} f_1(\delta^-_{Y3}) = 1, & \text{si } 0 \leq \delta^-_{Y3} \leq 10.5, \\ f_2(\delta^-_{Y3}) = 0, & \text{si } 10.5 \leq \delta^-_{Y3} \leq 12.8. \end{cases}$$

La représentation équivalente de cette fonction nécessite l'introduction des deux variables binaires β_{31}, β_{32} . Ces variables sont définies comme suit :

$$\beta_{31} = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq \delta^-_{Y3} \leq 11, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{32} = \begin{cases} 1, & \text{si } 11 \leq \delta^-_{Y3} \leq 12.8, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

La fonction peut avoir la forme suivante :

$$\begin{aligned} F^-_{Y3}(\delta^-_{Y3}) &= \beta_{31} f_1(\delta^-_{Y3}) + \beta_{32} f_2(\delta^-_{Y3}) \\ &= (1) \beta_{31} + (0) \beta_{32} \\ &= \beta_{31}. \end{aligned}$$

$F^+_{Y3}(\delta^+_{Y3})$ s'écrit :

$$F^+_{Y3}(\delta^+_{Y3}) = \begin{cases} f_1(\delta^+_{Y3}) = 1, & \text{si } 0 \leq \delta^+_{Y3} \leq 11, \\ f_2(\delta^+_{Y3}) = 0, & \text{si } 11 \leq \delta^+_{Y3} \leq 12.8. \end{cases}$$

La représentation équivalente de cette fonction nécessite l'introduction des deux variables binaires $\beta_{31}^*, \beta_{32}^*$. Ces variables sont définies comme suit :

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

$$\beta_{31^*} = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq \delta^+_{Y3} \leq 11, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{32^*} = \begin{cases} 1, & \text{si } 11 \leq \delta^+_{Y3} \leq 12.8, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

La fonction peut avoir la forme suivante :

$$\begin{aligned} F^+_{Y3}(\delta^+_{Y3}) &= \beta_{31^*} f_1(\delta^+_{Y3}) + \beta_{32^*} f_2(\delta^+_{Y3}) \\ &= (1) \beta_{31^*} + (0) \beta_{32^*} \\ &= \beta_{31^*}. \end{aligned}$$

La représentation équivalente au programme mathématique est comme suit :

$$\text{Maximiser } Z = \beta_{31} + \beta_{31^*}$$

Sujet à :

$$(0)\beta_{31^*} + 11\beta_{32^*} - \delta^+_{Y3} \leq 0$$

$$\delta^+_{Y3} - 11\beta_{31^*} - 12.8\beta_{32^*} \leq 0$$

$$(0)\beta_{31^*} + 11\beta_{32^*} - \delta^+_{Y3} \leq 0$$

$$\delta^+_{Y3} - 11\beta_{31^*} - 12.8\beta_{32^*} \leq 0$$

$$\beta_{31} + \beta_{32} + \beta_{31^*} + \beta_{32^*} = 1$$

$$\beta_{31}, \beta_{32}, \beta_{31^*} \text{ et } \beta_{32^*} \in \{0,1\}; \delta^+_{Y3} \geq 0; \delta^+_{Y3} \leq 12.8.$$

-Fonction de satisfaction du critère C4 :

La vitesse de propagation de flamme dans l'air doit être minimisée, et la fonction de satisfaction de cet attribut est présentée sous forme d'une fonction Quasi-critère. Le décideur a fixé comme but pour sa satisfaction $Y_4^* = 39$ cm/s.

On a retenu la fonction de satisfaction suivante (**Figure. 91**)

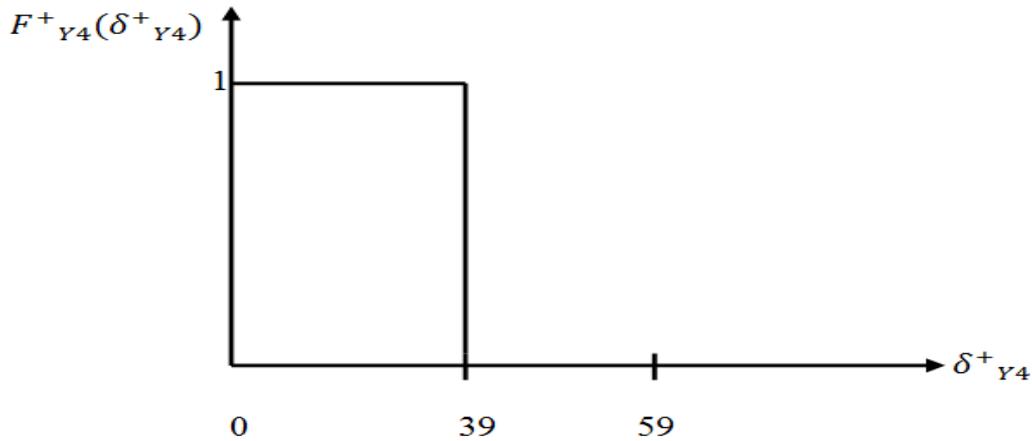


Figure. 91 La fonction de satisfaction du critère C4 : La vitesse de propagation de flamme dans l'air

La satisfaction est décroissante pour les déviations appartenant à l'intervalle $[0, 39]$.

Par ailleurs, le décideur est totalement insatisfait pour toute valeur dépassant le seuil de veto fixé à 59.

$F^+_{Y4}(\delta^+_{Y4})$ peut être écrite comme suit :

$$F^+_{Y4}(\delta^+_{Y4}) = \begin{cases} f_1(\delta^+_{Y4}) = 1, & \text{si } 0 \leq \delta^+_{Y4} \leq 0.39, \\ f_2(\delta^+_{Y4}) = 0, & \text{si } 10 \leq \delta^+_{Y4} \leq 0.59. \end{cases}$$

La représentation équivalente de cette fonction nécessite l'introduction des deux variables binaires β_{41}, β_{42} . Ces variables sont définies comme suit :

$$\beta_{41} = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq \delta^+_{Y4} \leq 0.39, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{42} = \begin{cases} 1, & \text{si } 0.39 \leq \delta^+_{Y4} \leq 0.59, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

Ainsi, la fonction peut avoir la forme suivante :

$$\begin{aligned} F^+_{Y4}(\delta^+_{Y4}) &= \beta_{41} f_1(\delta^+_{Y4}) + \beta_{42} f_2(\delta^+_{Y4}) \\ &= (1) \beta_{41} + (0) \beta_{42} \\ &= \beta_{41}. \end{aligned}$$

La représentation équivalente au programme mathématique qui vise à maximiser la fonction de satisfaction se décrit comme suit :

$$\text{Maximiser } Z = \beta_{41}$$

Sujet à :

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

$$\begin{aligned}
 (39) \beta_{42} - \delta^+_{Y4} &\leq 0 \\
 \delta^+_{Y4} - (39) \beta_{41} - (59) \beta_{42} &\leq 0 \\
 \beta_{41} + \beta_{42} &= 1 \\
 \beta_{41}, \beta_{42} & \in \{0,1\}; \delta^+_{Y4} \geq 0; \delta^+_{Y4} \leq 59.
 \end{aligned}$$

Etape 3 : Application du modèle d'optimisation de la fiabilité sous l'initiative de minimisation du risque incendie :

$$\text{Maximiser } Z = \beta_{11} + 0.7 \beta_{12} + 0.3 \beta_{13} + \beta_{21} + 0.8 \beta_{22} + 0.25 \beta_{23} + \beta_{31} + \beta_{31^*} + \beta_{41}$$

Sujet à :

$$\begin{aligned}
 \beta_{12} + 30 \beta_{13} + 40 \beta_{14} - \delta^-_{Y1} &\leq 0 \\
 \delta^-_{Y1} - \beta_{11} - 30 \beta_{12} - 40 \beta_{13} - 75 \beta_{14} &\leq 0 \\
 \beta_{11} + \beta_{12} + \beta_{13} + \beta_{14} &= 1 \\
 \beta_{22} + 2 \beta_{23} + 3 \beta_{24} - \delta^-_{Y2} &\leq 0 \\
 \delta^-_{Y2} - \beta_{21} - 2 \beta_{22} - 3 \beta_{23} - 4 \beta_{24} &\leq 0 \\
 \beta_{21} + \beta_{22} + \beta_{23} + \beta_{24} &= 1 \\
 11 \beta_{32} - \delta^-_{Y3} &\leq 0 \\
 \delta^-_{Y3} - 11 \beta_{31} - 12.8 \beta_{32} &\leq 0 \\
 (0) \beta_{31^*} + 1 \beta_{32^*} - \delta^+_{Y3} &\leq 0 \\
 \delta^+_{Y3} - 11 \beta_{31^*} - 12.8 \beta_{32^*} &\leq 0 \\
 \beta_{31} + \beta_{32} + \beta_{31^*} + \beta_{32^*} &= 1 \\
 39 \beta_{42} - \delta^+_{Y4} &\leq 0 \\
 \delta^+_{Y4} - 39 \beta_{41} - (59) \beta_{42} &\leq 0 \\
 \beta_{41} + \beta_{42} &= 1 \\
 \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{13} \text{ et } \beta_{14} & \in \{0,1\}; \delta^-_{Y1} \geq 0; \delta^-_{Y1} \leq 75. \\
 \beta_{21}, \beta_{22}, \beta_{23} \text{ et } \beta_{24} & \in \{0,1\}; \delta^-_{Y2} \geq 0; \delta^-_{Y2} \leq 4. \\
 \beta_{31}, \beta_{32}, \beta_{31^*} \text{ et } \beta_{32^*} & \in \{0,1\}; \delta^+_{Y3} \text{ et } \delta^-_{Y3} \geq 0; \delta^+_{Y3} \text{ et } \delta^-_{Y3} \leq 12.8.
 \end{aligned}$$

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

$$\beta_{41}, \beta_{42} = \{0,1\}; \delta^+_{Y_4} \geq 0; \delta^+_{Y_4} \leq 0.59.$$

En utilisant le progiciel LINGO version 10, la solution optimale obtenue pour la minimisation du risque Incendie dans le Tableau. 28 :

<i>Les variables</i>	<i>Résultat correspondant</i>
Y_1	75
Y_2	4
Y_3	11
Y_4	39
Z^*	4

Tableau. 28 Solution optimale pour la minimisation du Risque Incendie

La solution trouvée est satisfaisante avec la prise en charge des préférences du décideur. Il est évident qu'avec l'application des fonctions de satisfactions, la solution est beaucoup améliorée. Le niveau de satisfaction atteint pour les 4 objectifs est de 100%. Ce niveau réalisé de satisfaction implique que toutes les spécifications sont respectées.

3. 5.3 Minimisation des risques de fatigue respiratoire

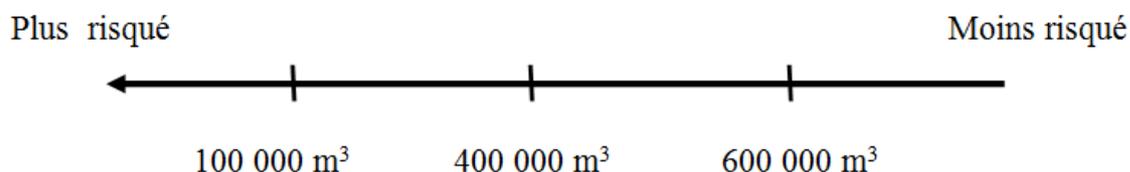
Etape 1 : Evaluation des critères

-C1 : *Volume des cavités de stockage du Gaz naturel*

Le stockage de Gaz dans l'usine de traitement de Gaz Hannibal est un stockage souterrain, à travers la création d'un ensemble de cavités creusées dans d'épaisses et profondes couches de sel gemme. Imperméables et non poreuses, elles présentent une remarquable étanchéité. Les cavités sont obtenues en injectant de l'eau qui dissout une partie du sel extrait sous forme de saumure. Mélange d'eau et de sel, la saumure peut être valorisée auprès d'industries qui l'utilisent en tant que matière première. La place est alors libre pour le gaz naturel qui est injecté et stocké sous forme gazeuse à une pression élevée, puis soutiré par simple détente. Ainsi, le volume de la cavité de stockage du Gaz naturel doit être spécifié par des études bien

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

détaillé. Il influe d'une façon directe sur la protection des travailleurs lors de soutirage du Gaz.



Volume des cavités de stockage de Gaz naturel

100 000 m³ : Volume minimum de stockage,

400 000 m³ : Volume moyen de stockage,

600 000 m³ : Volume maximum de stockage.

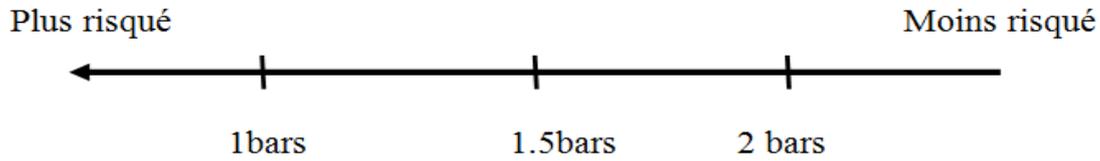
-C2 : Diamètre du filtre de cyclone

A la suite des épreuves hydrauliques, une oxydation superficielle des parois se produit et des poussières d'oxydes de fer peuvent se détacher des parois des tubes sous l'action du frottement du Gaz. Il est à noter que ce phénomène d'oxydation est stoppé dès que la canalisation est en service. Le risque dû à la présence de poussières dans le gaz est celui de l'abrasion de certains organes du réseau de transport tels que les robinets où la vitesse d'écoulement est particulièrement rapide. Cette abrasion peut ainsi entraîner une mauvaise étanchéité des robinets, ce qui ne permettrait plus d'isoler deux tronçons.

Le risque dû à la présence de poussières dans le Gaz est celui de l'abrasion de certains organes tels que les robinets où la vitesse d'écoulement est particulièrement rapide. Le «filtre-cyclone» à corbeille rotative, robuste, livrable du stock et à auto-nettoyage motorisé, permet la séparation en continu de particules solides dans les fluides, sans que le nettoyage ne nécessite une interruption du fonctionnement. Les corbeilles interchangeables avec différentes mailles permettent une séparation adaptée et sélective des particules.

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

lorsque la vitesse de la fuite de Gaz correspond à la vitesse du son, à une pression d'au moins 2bars.



Pression du détecteur des fuites dans les canaux

1bars : Pression du détecteur des fuites faible,

1.5 bars: Pression du détecteur des fuites moyenne,

2bars : Pression du détecteur des fuites élevée.

Étape 2 : Les fonctions de satisfaction relatives à chacun des critères

Le problème est de trouver une solution optimale de la fiabilité humaine permettant de minimiser les risques de fatigue respiratoire en agissant sur les critères correspondants.

Posons : W_1 : Volume des cavités de stockage du Gaz naturel,

W_2 : Diamètre du filtre de cyclone,

W_3 : Importance des protecteurs munis de coquille,

W_4 : Pression du détecteur des fuites.

Les limites admissibles sont données dans le Tableau. 29.

<i>Variables</i>	<i>Limite admissible</i>
W_1^* : Volume des cavités de stockage du Gaz naturel	600 000
W_2^* : Diamètre du filtre de cyclone	2000
W_3^* : Importance des protecteurs munis de coquille	2
W_4^* : Pression du détecteur des fuites	2

Tableau. 29 Limite admissible des variables du Risque Fatigue Respiratoire

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

-Fonction de satisfaction du critère C1 :

Le stockage souterrain du Gaz naturel doit être effectué dans des cavités de volume maximum lors du soutirage.

Le décideur cherche à maximiser les volumes des cavités de La fonction de satisfaction de cet attribut est présentée sous forme d'une fonction de préférence linéaire avec zone d'indifférence.

On a retenu la fonction de satisfaction suivante (**Figure. 92**)

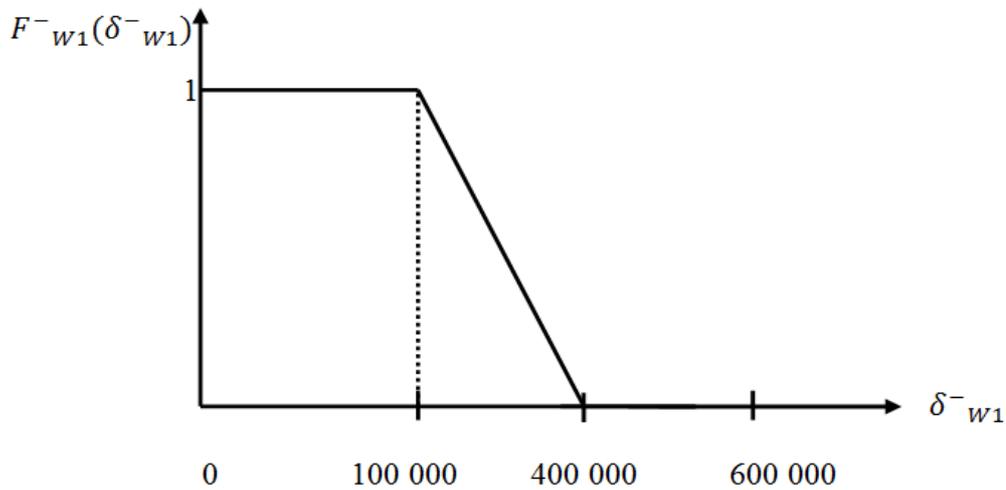


Figure. 92 La fonction de satisfaction du critère C1 : Le volume des cavités de stockage du Gaz naturel

Le décideur atteint sa satisfaction totale lorsque est $F_{w1}^{-}(\delta_{w1}^{-})$ est à son niveau maximal, et la déviation négative de ce critère δ_{c1}^{-} se situe à l'intérieur de l'intervalle $[0, 100\,000]$.

Le seuil est fixé à 600 000.

$F_{w1}^{-}(\delta_{w1}^{-})$ peut être écrite comme suit :

$$F_{w1}^{-}(\delta_{w1}^{-}) = \begin{cases} f_1(\delta_{w1}^{-}) = 1, & \text{si } 0 \leq \delta_{w1}^{-} \leq 100\,000, \\ f_2(\delta_{w1}^{-}) = 1.33 - \frac{1}{300000} \delta_{w1}^{-}, & \text{si } 100\,000 \leq \delta_{w1}^{-} \leq 400\,000, \\ f_3(\delta_{w1}^{-}) = 0, & \text{si } 400\,000 \leq \delta_{w1}^{-} \leq 600\,000. \end{cases}$$

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

La représentation équivalente de cette fonction nécessite l'introduction des trois variables binaires β_{11} , β_{12} et β_{13} . Ces variables sont définies comme suit :

$$\beta_{11} = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq \delta^-_{w1} \leq 100\,000, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{12} = \begin{cases} 1, & \text{si } 100\,000 \leq \delta^-_{w1} \leq 400\,000, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases},$$

$$\beta_{13} = \begin{cases} 1, & \text{si } 400\,000 \leq \delta^-_{w1} \leq 600\,000, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

Ainsi, la fonction peut avoir la forme suivante :

$$\begin{aligned} F^-_{w1}(\delta^-_{w1}) &= \beta_{11} f_1(\delta^-_{w1}) + \beta_{12} f_2(\delta^-_{w1}) + \beta_{13} f_3(\delta^-_{w1}) \\ &= (1) \beta_{11} + (1.33 - \frac{1}{300000} \delta^-_{w1}) \beta_{12} + (0) \beta_{13} \\ &= \beta_{11} + (1.33 - \frac{1}{300000} \delta^-_{w1}) \beta_{12} \\ &= \beta_{11} + 1.33 \beta_{12} - \frac{1}{300000} \beta_{12} \delta^-_{w1} \end{aligned}$$

La reformulation du programme mathématique qui vise à maximiser la fonction de satisfaction est comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Maximiser } Z &= \beta_{11} + 1.33 \beta_{12} - \frac{1}{300000} \beta_{12} \delta^-_{w1} \\ \text{Sujet à :} \\ 100\,000 \beta_{12} + 400\,000 \beta_{13} - \delta^-_{w1} &\leq 0 \\ \delta^-_{w1} - 100\,000 \beta_{11} - 400\,000 \beta_{12} - 600\,000 \beta_{13} &\leq 0 \\ \beta_{11} + \beta_{12} + \beta_{13} &= 1 \\ \beta_{11}, \beta_{12} \text{ et } \beta_{13} &= \{0,1\}; \delta^-_{w1} \geq 0; \delta^-_{w1} \leq 600\,000. \end{aligned}$$

-Fonction de satisfaction du critère C2 :

Le décideur cherche à maximiser le diamètre du filtre de cyclone afin de minimiser les risques de fatigue respiratoire. La fonction de satisfaction de cet attribut est présentée sous forme d'une fonction en Quasi-critère.

On a retenu la fonction de satisfaction suivante (**Figure. 93**)

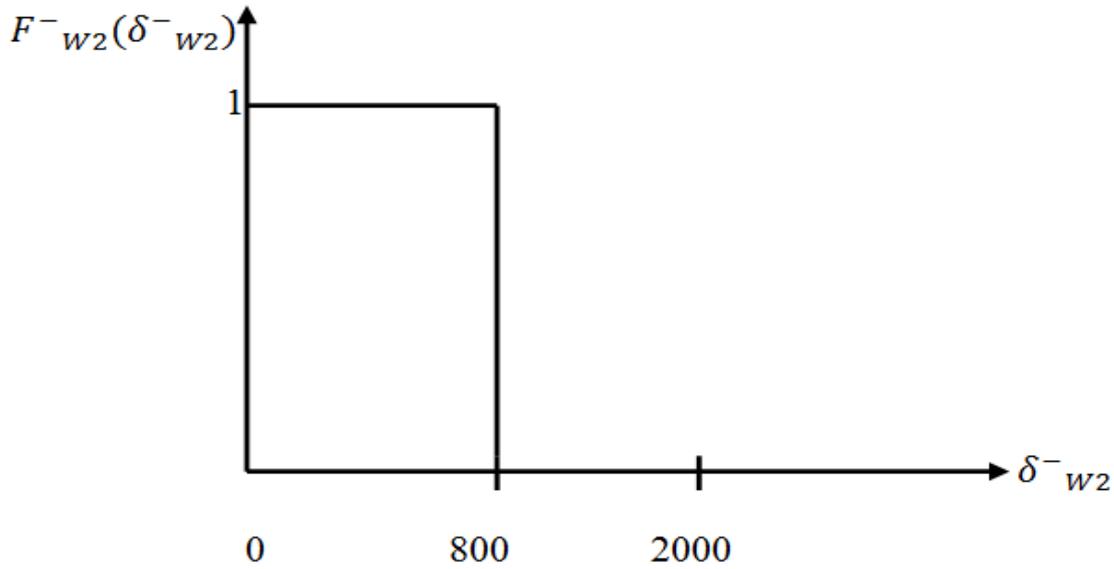


Figure. 93 La fonction de satisfaction du critère C2 : Le diamètre du filtre de cyclone

Le décideur atteint sa satisfaction totale lorsque est $F^-_{w2}(\delta^-_{w2})$ est à son niveau maximal, et la déviation négative de ce critère δ^-_{w2} se situe à l'intérieur de l'intervalle $[0, 800]$. Le seuil de veto associé à ce critère est fixé à 2000.

La fonction de satisfaction $F^-_{w2}(\delta^-_{w2})$ peut être écrite comme suit :

$$F^-_{w2}(\delta^-_{w2}) = \begin{cases} f_1(\delta^-_{w2}) = 1, & \text{si } 0 \leq \delta^-_{w2} \leq 800, \\ f_2(\delta^-_{w2}) = 0, & \text{si } 800 \leq \delta^-_{w2} \leq 2000. \end{cases}$$

Avec deux variables binaires β_{21}, β_{22} définies comme suit :

$$\beta_{21} = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq \delta^-_{w2} \leq 800, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{22} = \begin{cases} 1, & \text{si } 800 \leq \delta^-_{w2} \leq 2000, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

La fonction peut avoir la forme suivante :

$$\begin{aligned} F^-_{w2}(\delta^-_{w2}) &= \beta_{21} f_1(\delta^-_{w2}) + \beta_{22} f_2(\delta^-_{w2}) \\ &= (1) \beta_{21} + (0) \beta_{22} \\ &= \beta_{21}. \end{aligned}$$

La représentation équivalente au programme mathématique est :

$$\text{Maximiser } Z = \beta_{21}$$

Sujet à :

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

$$\begin{aligned} (800) \beta_{22} - \delta^-_{c2} &\leq 0 \\ \delta^-_{w2} - (800) \beta_{21} - (2000) \beta_{22} &\leq 0 \\ \beta_{21} + \beta_{22} &= 1 \\ \beta_{21}, \beta_{22} &\in \{0,1\}; \delta^-_{w2} \geq 0; \delta^-_{w2} \leq 2000. \end{aligned}$$

-Fonction de satisfaction du critère C3:

Le décideur cherche à maximiser la sensibilisation des travailleurs à utiliser les protecteurs munis de coquille. La fonction de satisfaction de cet attribut est présentée sous forme d'une fonction de Quasi -critère.

On a retenu la fonction de satisfaction suivante (**Figure. 94**)

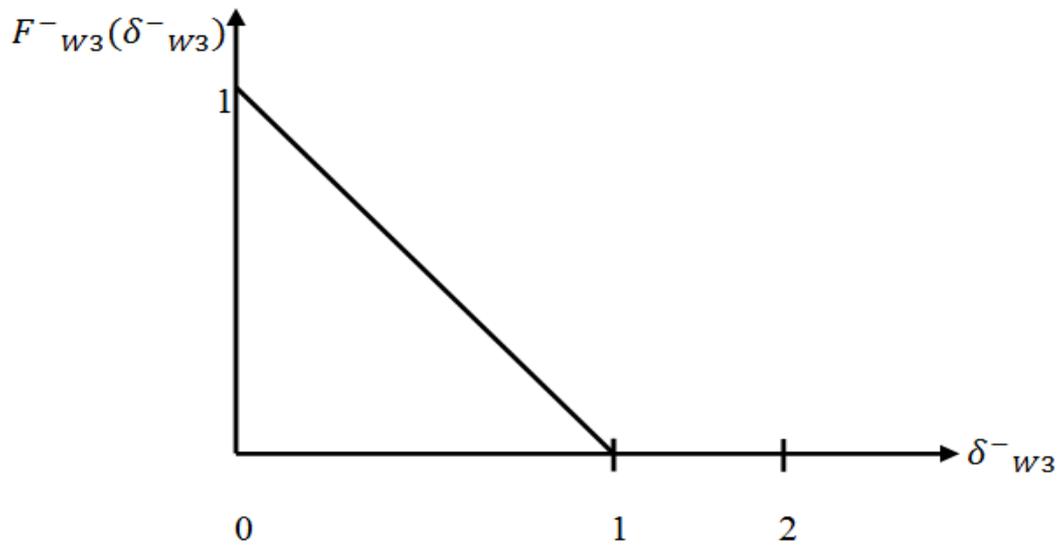


Figure. 94 La fonction de satisfaction du critère C3 : Importance des protecteurs munis de coquille

Le décideur atteint sa satisfaction totale lorsque est $F^-_{w3}(\delta^-_{w3})$ est à son niveau maximal, et la déviation négative de ce critère δ^-_{w3} se situe à l'intérieur de l'intervalle $[0, 1]$. Le seuil de veto associé à ce critère est fixé à 2.

$F^-_{w3}(\delta^-_{w3})$ peut être écrite comme suit :

$$F^-_{w3}(\delta^-_{w3}) = \begin{cases} f_1(\delta^-_{w3}) = 1 - \delta^-_{c3}, & \text{si } 0 \leq \delta^-_{w3} \leq 1, \\ f_2(\delta^-_{w3}) = 0, & \text{si } 1 \leq \delta^-_{w3} \leq 2. \end{cases}$$

Avec deux variables binaires β_{31}, β_{32} définies comme suit :

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

$$\beta_{31} = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq \delta^-_{w3} \leq 1, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{32} = \begin{cases} 1, & \text{si } 1 \leq \delta^-_{w3} \leq 2, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

Ainsi, la fonction peut avoir la forme suivante :

$$\begin{aligned} F^-_{w3}(\delta^-_{w3}) &= \beta_{31} f_1(\delta^-_{w3}) + \beta_{32} f_2(\delta^-_{w3}) \\ &= (1 - \delta^-_{w3}) \beta_{31} + (0) \beta_{32} \\ &= \beta_{31} - 1 - \delta^-_{w3} \beta_{31} \end{aligned}$$

La programmation mathématique qui vise à maximiser la fonction de satisfaction se décrit comme suit :

$$\text{Maximiser } Z = \beta_{31} - 1 - \delta^-_{w3} \beta_{31}$$

Sujet à :

$$\beta_{31} + \beta_{32} - \delta^-_{w3} \leq 0$$

$$\delta^-_{w3} - \beta_{31} - 2\beta_{32} \leq 0$$

$$\beta_{31} + \beta_{32} = 1$$

$$\beta_{31}, \beta_{32} \in \{0,1\}; \delta^-_{w3} \geq 0; \delta^-_{w3} \leq 2.$$

-Fonction de satisfaction du critère C4 :

la pression du détecteur des fuites doit être maximale afin d'éviter les problèmes de fatigues respiratoire des travailleurs à l'intérieurs du site de traitement de Gaz. La fonction de satisfaction de cet attribut est présentée sous forme d'une fonction en escalier vue la nature discrète de cette variable, ce qui explique la nature discontinue de la fonction choisie.

On a retenu la fonction de satisfaction suivante (**Figure. 95**)

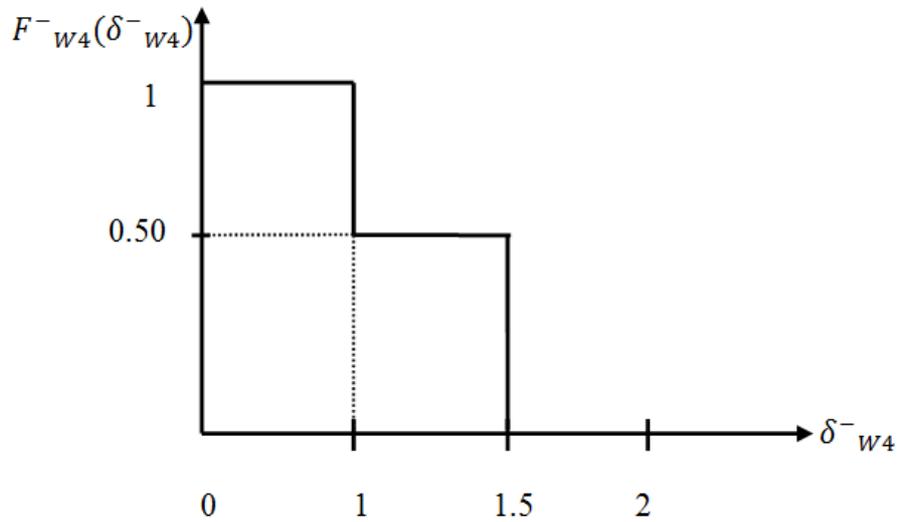


Figure. 95 La fonction de satisfaction du critère C4 : La pression du détecteur des fuites

Le décideur atteint sa satisfaction totale lorsque est $F^-_{w4}(\delta^-_{w4})$ est à son niveau maximal, et la déviation négative de ce critère δ^-_{w4} se situe à l'intérieur de l'intervalle $[0,1]$. Dès qu'on dépasse ce seuil, la satisfaction du décideur diminue. De plus, ce seuil est à fixé à 2.

La fonction de satisfaction $F^-_{w4}(\delta^-_{w4})$ peut être écrite comme suit :

$$F^-_{w4}(\delta^-_{w4}) = \begin{cases} f_1(\delta^-_{w4}) = 1, & \text{si } 0 \leq \delta^-_{w4} \leq 1, \\ f_2(\delta^-_{w4}) = 0.5, & \text{si } 1 \leq \delta^-_{w4} \leq 1.5, \\ f_3(\delta^-_{w4}) = 0, & \text{si } 1.5 \leq \delta^-_{w4} \leq 2. \end{cases}$$

La représentation équivalente de cette fonction nécessite l'introduction des trois variables binaires β_{41} , β_{42} et β_{43} variables sont définies comme suit :

$$\beta_{41} = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq \delta^-_{w4} \leq 1, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{42} = \begin{cases} 1, & \text{si } 1 \leq \delta^-_{w4} \leq 1.5, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases},$$

$$\beta_{43} = \begin{cases} 1, & \text{si } 1.5 \leq \delta^-_{w4} \leq 2, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

La fonction peut avoir la forme suivante :

$$\begin{aligned} F^-_{w4}(\delta^-_{w4}) &= \beta_{41} f_1(\delta^-_{w4}) + \beta_{42} f_2(\delta^-_{w4}) + \beta_{43} f_3(\delta^-_{w4}) \\ &= (1) \beta_{41} + (0.5) \beta_{42} + (0) \beta_{43} \\ &= \beta_{41} + 0.5 \beta_{42}. \end{aligned}$$

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

Le décideur cherche à maximiser son degré de satisfaction vis-à-vis de cet objectif. Puisque $F^-_{W4}(\delta^-_{W4})$ ne comporte pas de termes non linéaires, la représentation équivalente au programme mathématique qui vise à maximiser la fonction de satisfaction se décrit comme suit :

$$\text{Maximiser } Z = \beta_{41} + 0.5\beta_{42}$$

Sujet à :

$$\beta_{42} + \beta_{43} - \delta^-_{W4} \leq 0$$

$$\delta^-_{W4} - (1)\beta_{41} - (1.5)\beta_{42} - (2)\beta_{43} \leq 0$$

$$\beta_{41} + \beta_{42} + \beta_{43} = 1$$

$$\beta_{41}, \beta_{42} \text{ et } \beta_{43} \in \{0,1\}; \delta^-_{W4} \geq 0; \delta^-_{W4} \leq 2.$$

Etape 3 : Application du modèle d'optimisation de la fiabilité humaine sous l'initiative de minimisation du risque fatigue respiratoire

$$\text{Maximiser } Z = \beta_{11} + 1.33\beta_{12} - \frac{1}{300000}\beta_{12}\delta^-_{W1} + \beta_{21} + \beta_{31} - 1 - \delta^-_{W3}\beta_{31} + \beta_{41} + 0.5\beta_{42}$$

Sujet à :

$$100\,000\beta_{12} + 400\,000\beta_{13} - \delta^-_{W1} \leq 0$$

$$\delta^-_{W1} - 100\,000\beta_{11} - 400\,000\beta_{12} - 600\,000\beta_{13} \leq 0$$

$$\beta_{11} + \beta_{12} + \beta_{13} = 1$$

$$\beta_{21} + 800\beta_{22} - \delta^-_{W2} \leq 0$$

$$\delta^-_{W2} - 800\beta_{21} - (2000)\beta_{22} \leq 0$$

$$\beta_{21} + \beta_{22} = 1$$

$$\beta_{31} + \beta_{32} - \delta^-_{W3} \leq 0$$

$$\delta^-_{W3} - \beta_{31} - 2\beta_{32} \leq 0$$

$$\beta_{31} + \beta_{32} = 1$$

$$\beta_{42} + \beta_{43} - \delta^-_{W4} \leq 0$$

$$\delta^-_{W4} - 1\beta_{41} - 1.5\beta_{42} - 2\beta_{43} \leq 0$$

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

$$\beta_{41} + \beta_{42} + \beta_{43} = 1$$

$$\beta_{11}, \beta_{12} \text{ et } \beta_{13} = \{0,1\}; \delta^-_{w_1} \geq 0; \delta^-_{w_1} \leq 600\,000.$$

$$\beta_{21}, \beta_{22} = \{0,1\}; \delta^-_{w_2} \geq 0; \delta^-_{w_2} \leq 2000.$$

$$\beta_{31}, \beta_{32} = \{0,1\}; \delta^-_{w_3} \geq 0; \delta^-_{w_3} \leq 2.$$

$$\beta_{41}, \beta_{42} \text{ et } \beta_{43} = \{0,1\}; \delta^-_{w_4} \geq 0; \delta^-_{w_4} \leq 2.$$

En utilisant le progiciel LINGO version 10, la solution optimale obtenue pour la minimisation du risque fatigue respiratoire est dans le tableau suivant :

<i>Les variables</i>	<i>Résultat correspondant</i>
W_1	600000
W_2	2000
W_3	2
W_4	2
Z^*	4

Tableau. 30 Solution optimale pour la minimisation du Risque Fatigue Respiratoire

La solution trouvée est satisfaisante avec la prise en charge des préférences du décideur. Il est évident qu'avec l'application des fonctions de satisfactions, la solution est beaucoup améliorée. Le niveau de satisfaction atteint pour les 4 objectifs est de 100%. Ce niveau réalisé de satisfaction implique que toutes les spécifications sont respectées.

3. 5.4 Minimisation des risques d'atteinte cellulaire irréversible

Étape 1 : Evaluation des critères

-C1 : *Densité de la population près des zones de stockage de Gaz combustible*

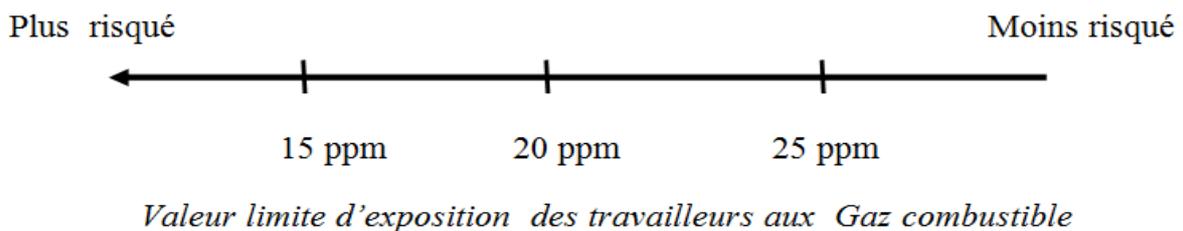
L'accent est mis sur la liaison entre les incidences et la densité de la population des travailleurs près des zones de stockage de Gaz combustibles. En d'autre terme, une forte concentration des travailleurs près des zones de stockage présente un risque majeur d'atteinte cellulaire irréversible:

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

-C3 : Valeur limite d'exposition des travailleurs aux Gaz combustible

L'émission de vapeurs dangereuses dans l'atmosphère de travail est souvent due à l'utilisation des solvants organiques, la plupart des cas d'exposition professionnelle relève, en effet d'opération transversale comme le traitement de Gaz naturel.

La valeur limite d'exposition des travailleurs représente la concentration dans l'air d'un composé chimique que peut respirer une personne pendant un temps déterminé sans risque d'altération de sa santé, même si des modifications physiologiques réversibles sont parfois tolérées. Aucune atteinte organique ou fonctionnelle de caractère irréversible ou prolongée n'est raisonnablement prévisible à ce niveau d'exposition. La valeur limite d'exposition des travailleurs aux Gaz combustible est exprimée par ppm (partie par million).



15 ppm : Procédé manuel,

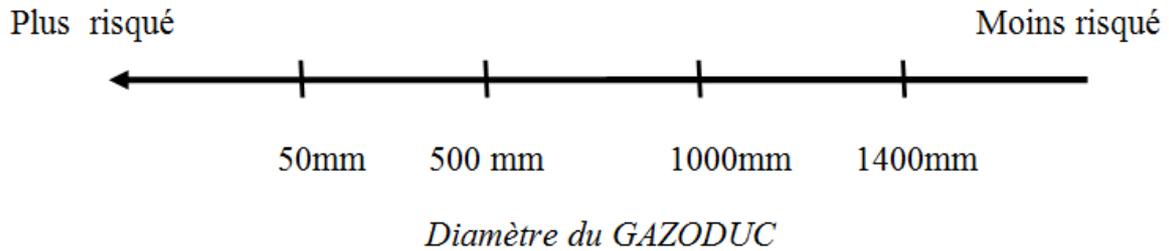
20 ppm : Procédé standard,

25 ppm : Procédé actualisé.

-C4 : Diamètre du GAZODUC

Un Gazoduc est une canalisation destinée au transport de Gaz naturel sous pression. La majorité des Gazoducs acheminent du Gaz naturel entre les zones d'extraction et les zones de consommation ou d'exportation. On estime la longueur totale des Gazoducs dans le monde à un million de kilomètres, soit plus de 25 fois la circonférence terrestre. Les Gazoducs sont en majorité terrestres, soit enfouis à environ un mètre de profondeur dans les zones habitées.

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie



50mm: Le diamètre de GAZUDOC très insuffisant,

500 mm: Le diamètre de GAZUDOC insuffisant,

1000mm: Le diamètre de GAZUDOC moyennement suffisant,

1400mm : Le diamètre de GAZUDOC suffisant.

Étape 2 : Les fonctions de satisfaction relatives à chacun des critères

Le problème est de trouver une solution optimale de la fiabilité humaine permettant de minimiser les risques d'atteinte cellulaire irréversible en agissant sur les variables correspondants.

Posons : Z_1 : Densité de la population près des stocks de Gaz combustible,

Z_2 : Etanchéité de la canalisation du Gaz naturel,

Z_3 : Valeur limite d'exposition des travailleurs aux Gaz combustible,

Z_4 : Diamètre du GAZODUC.

Les limites admissibles sont données dans le Tableau. 31.

<i>Variables</i>	<i>Limite admissible</i>
Z_1^* : Densité de la population près des stocks de Gaz combustible	10
Z_2^* : Etanchéité de la canalisation du Gaz naturel	3
Z_3^* : Valeur limite d'exposition des travailleurs aux Gaz combustible	25
Z_4^* : Diamètre du GAZODUC	1400

Tableau. 31 Limite admissible des variables du Risque Atteinte Cellulaire Irréversible

-Fonction de satisfaction du critère C1 :

Le décideur cherche à minimiser la densité de la population près des stocks de Gaz combustible afin de minimiser les risques d'incendie. La fonction de satisfaction de cet attribut est présentée sous forme d'une fonction Quasi-critère. Le responsable du service Santé, Sécurité et Environnement a fixé comme but pour sa satisfaction $Z_1^* = 10$, c'est-à-dire si près des stocks de Gaz combustible, il existe seulement 10 travailleurs, le décideur parvient à minimiser le maximum des risques d'incendie.

On a retenu la fonction de satisfaction suivante (**Figure. 96**)

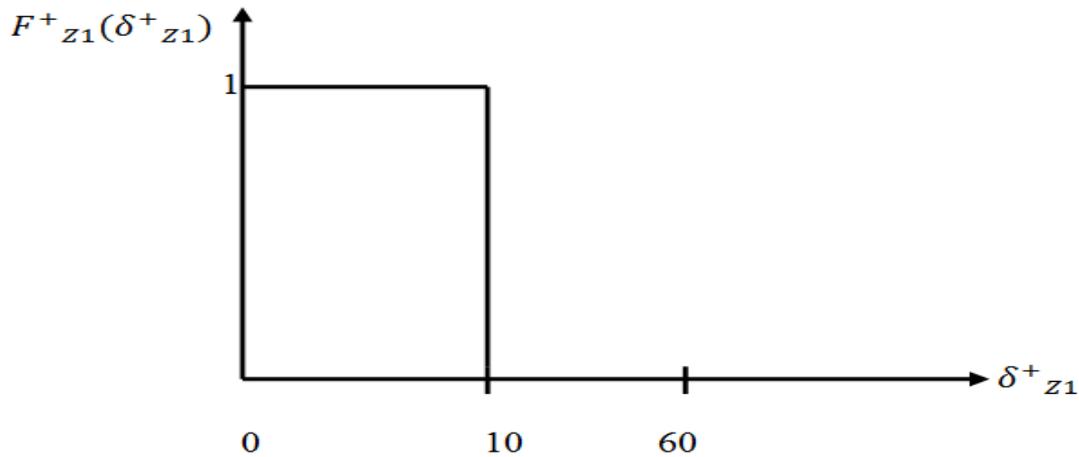


Figure. 96 La fonction de satisfaction du critère C1 : Densité de la population près des stocks de Gaz combustible

Le décideur atteint sa satisfaction totale lorsque la déviation par rapport au but $Z_1^* = 10$ est nulle, sa satisfaction est décroissante pour les déviations appartenant à l'intervalle $[0,10]$.

La fonction de satisfaction $F^+_{z1}(\delta^+_{z1})$ est écrite:

$$F^+_{z1}(\delta^+_{z1}) = \begin{cases} f_1(\delta^+_{z1}) = 1, & \text{si } 0 \leq \delta^+_{z1} \leq 10, \\ f_2(\delta^+_{z1}) = 0, & \text{si } 10 \leq \delta^+_{z1} \leq 60. \end{cases}$$

Avec des deux variables binaires β_{11}, β_{12} qui sont définies comme suit :

$$\beta_{11} = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq \delta^+_{z1} \leq 10, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{12} = \begin{cases} 1, & \text{si } 10 \leq \delta^+_{z1} \leq 60, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

Ainsi, la fonction peut avoir la forme suivante :

$$F^+_{z1}(\delta^+_{z1}) = \beta_{11} f_1(\delta^+_{z1}) + \beta_{12} f_2(\delta^+_{z1})$$

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

$$\begin{aligned} &= (1) \beta_{11} + (0) \beta_{12} \\ &= \beta_{11}. \end{aligned}$$

Le programme mathématique qui vise à maximiser la fonction de satisfaction se décrit comme suit :

$$\begin{aligned} &\text{Maximiser } Z = \beta_{11} \\ &\text{Sujet à :} \\ &10 \beta_{12} - \delta^+_{z1} \leq 0 \\ &\delta^+_{z1} - 10\beta_{11} - 60 \beta_{12} \leq 0 \\ &\beta_{11} + \beta_{12} = 1 \\ &\beta_{11}, \beta_{12} \in \{0,1\}; \delta^+_{z1} \geq 0; \delta^+_{z1} \leq 60. \end{aligned}$$

-Fonction de satisfaction du critère C2 :

Le volume de la couche d'étanchéité de la canalisation du Gaz naturel doit être maximum, afin d'éviter la corrosion des canaux, provoquant des fatigues respiratoire des travailleurs à l'intérieurs du site de traitement de Gaz. La fonction de satisfaction de cet attribut est présentée sous forme d'une fonction en escalier vue la nature discrète de cette variable, ce qui explique la nature discontinue de la fonction choisie.

On a retenu la fonction de satisfaction suivante (**Figure. 97**)

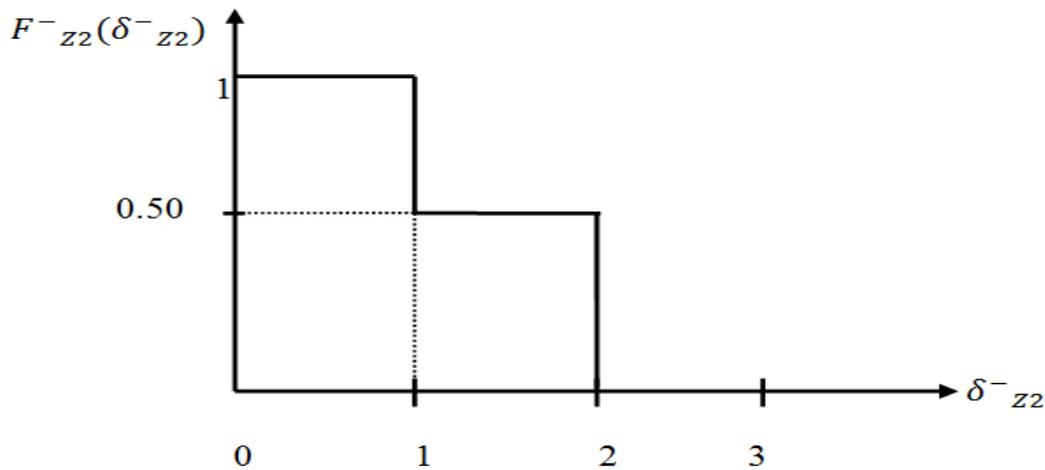


Figure. 97 La fonction de satisfaction du critère C2 : Etanchéité de la canalisation du Gaz naturel

Le décideur atteint sa satisfaction totale lorsque est $F^-_{z2}(\delta^-_{z2})$ est à son niveau maximal, et la déviation négative de ce critère δ^-_{z2} se situe à l'intérieur de l'intervalle $[0,1]$. Dès qu'on dépasse ce seuil, la satisfaction du décideur diminue.

La fonction de satisfaction $F^-_{z2}(\delta^-_{z2})$ est écrite :

$$F^-_{z2}(\delta^-_{z2}) = \begin{cases} f_1(\delta^-_{z2}) = 1, & \text{si } 0 \leq \delta^-_{z2} \leq 1, \\ f_2(\delta^-_{z2}) = 0.5, & \text{si } 1 \leq \delta^-_{z2} \leq 2, \\ f_3(\delta^-_{z2}) = 0, & \text{si } 2 \leq \delta^-_{z2} \leq 3. \end{cases}$$

Trois variables binaires β_{21} , β_{22} et β_{23} sont introduites :

$$\beta_{21} = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq \delta^-_{z2} \leq 1, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{22} = \begin{cases} 1, & \text{si } 1 \leq \delta^-_{z2} \leq 2, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{23} = \begin{cases} 1, & \text{si } 2 \leq \delta^-_{z2} \leq 3, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

Ainsi, la fonction peut avoir la forme suivante :

$$\begin{aligned} F^-_{z2}(\delta^-_{z2}) &= \beta_{21} f_1(\delta^-_{z2}) + \beta_{22} f_2(\delta^-_{z2}) + \beta_{23} f_3(\delta^-_{z2}) \\ &= (1) \beta_{21} + (0.5) \beta_{22} + (0) \beta_{23} \\ &= \beta_{21} + 0.5 \beta_{22}. \end{aligned}$$

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

Puisque $F^-_{z2}(\delta^-_{z2})$ ne comporte pas de termes non linéaires, la représentation équivalente au programme mathématique qui vise à maximiser la fonction de satisfaction se décrit comme suit :

$$\text{Maximiser } Z = \beta_{21} + 0.5\beta_{22}$$

Sujet à :

$$\beta_{22} + 2\beta_{23} - \delta^-_{z2} \leq 0$$

$$\delta^-_{z2} - \beta_{21} - 2\beta_{22} - 3\beta_{23} \leq 0$$

$$\beta_{21} + \beta_{22} + \beta_{23} + \beta_{24} = 1$$

$$\beta_{21}, \beta_{22} \text{ et } \beta_{23} \in \{0,1\}; \delta^-_{z2} \geq 0; \delta^-_{z2} \leq 3.$$

-Fonction de satisfaction du critère C3 :

Le travailleur est exposé à plusieurs produits dangereux. Pour ce faire, le décideur cherche à fixer la valeur limite d'exposition compatible pour chaque combustible. La fonction de satisfaction de cet attribut est présentée sous forme d'une fonction de préférence linéaire avec zone d'indifférence.

On a retenu les fonctions de satisfactions suivantes (**Figure. 98**)

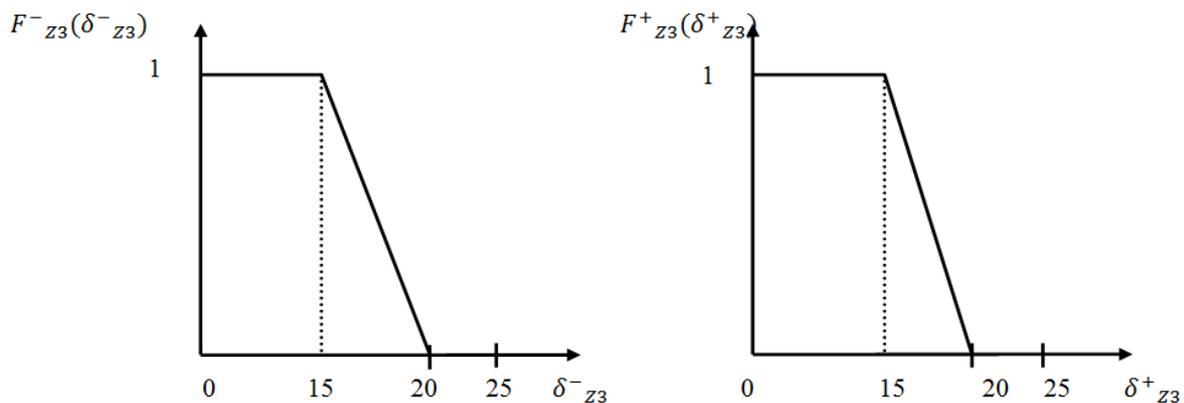


Figure. 98 La fonction de satisfaction du critère C3 : Valeur limite d'exposition des travailleurs aux Gaz combustible

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

Le décideur atteint sa satisfaction totale lorsque les déviations δ^-_{z3} ou δ^+_{z3} se situe à l'intérieur de l'intervalle $[0, 15]$. Le seuil de veto associé à ce critère est fixé à 25 ppm.

$F^-_{z3}(\delta^-_{z3})$ peut être écrite comme suit :

$$F^-_{z3}(\delta^-_{z3}) = \begin{cases} f_1(\delta^-_{z3}) = 1, & \text{si } 0 \leq \delta^-_{z3} \leq 15, \\ f_2(\delta^-_{z3}) = 4 - 0.2 \delta^-_{z3} & \text{si } 15 \leq \delta^-_{z3} \leq 20, \\ f_3(\delta^-_{z3}) = 0, & \text{si } 20 \leq \delta^-_{z3} \leq 25. \end{cases},$$

Avec trois variables binaires β_{31} , β_{32} et β_{33} . Ces sont définies comme suit :

$$\beta_{31} = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq \delta^-_{z3} \leq 15, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{32} = \begin{cases} 1, & \text{si } 15 \leq \delta^-_{z3} \leq 20, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases},$$

$$\beta_{33} = \begin{cases} 1, & \text{si } 20 \leq \delta^-_{z3} \leq 25, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

Ainsi, la fonction peut avoir la forme suivante :

$$\begin{aligned} F^-_{z3}(\delta^-_{z3}) &= \beta_{31} f_1(\delta^-_{z3}) + \beta_{32} f_2(\delta^-_{z3}) + \beta_{33} f_3(\delta^-_{z3}) \\ &= (1) \beta_{31} + (4 - 0.2 \delta^-_{z3}) \beta_{32} + (0) \beta_{33} \\ &= \beta_{31} + (4 - 0.2 \delta^-_{z3}) \beta_{32} \\ &= \beta_{31} + 4 \beta_{32} - 0.2 \beta_{32} \delta^-_{z3} \end{aligned}$$

La fonction de satisfaction $F^+_{z3}(\delta^+_{z3})$ peut être écrite comme suit :

$$F^+_{z3}(\delta^+_{z3}) = \begin{cases} f_1(\delta^+_{z3}) = 1, & \text{si } 0 \leq \delta^+_{z3} \leq 15, \\ f_2(\delta^+_{z3}) = 4 - 0.2 \delta^+_{z3}, & \text{si } 15 \leq \delta^+_{z3} \leq 20, \\ f_3(\delta^+_{z3}) = 0, & \text{si } 20 \leq \delta^+_{z3} \leq 25. \end{cases}$$

Avec trois variables binaires β_{31}^* , β_{32}^* et β_{33}^* qui sont définies comme suit :

$$\beta_{31}^* = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq \delta^+_{z3} \leq 15, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{32}^* = \begin{cases} 1, & \text{si } 15 \leq \delta^+_{z3} \leq 20, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases},$$

$$\beta_{33}^* = \begin{cases} 1, & \text{si } 20 \leq \delta^+_{z3} \leq 25, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

Ainsi, la fonction peut avoir la forme suivante :

$$\begin{aligned}
 F^+_{z3}(\delta^+_{z3}) &= \beta_{31}^* f_1(\delta^+_{z3}) + \beta_{32}^* f_2(\delta^+_{z3}) + \beta_{33}^* f_3(\delta^+_{z3}) \\
 &= (1) \beta_{31}^* + (4 - 0.2 \delta^+_{z3}) \beta_{32}^* + (0) \beta_{33}^* \\
 &= \beta_{31}^* + (4 - 0.2 \delta^+_{z3}) \beta_{32}^* \\
 &= \beta_{31}^* + 4 \beta_{32}^* - 0.2 \beta_{32}^* \delta^+_{z3}
 \end{aligned}$$

La représentation linéaire équivalente au programme mathématique qui vise à maximiser la fonction de satisfaction de la déviation négative relative à ce critère se décrit comme suit :

$$\text{Maximiser } Z = \beta_{31} + 4 \beta_{32} - 0.2 \beta_{32} \delta^-_{z3} + \beta_{31}^* + 4 \beta_{32}^* - 0.2 \beta_{32}^* \delta^+_{z3}$$

Sujet à :

$$15 \beta_{32} + 20 \beta_{33} - \delta^-_{z3} \leq 0$$

$$\delta^-_{z3} - 15 \beta_{31} - 20 \beta_{32} - 25 \beta_{33} \leq 0$$

$$15 \beta_{32}^* + 20 \beta_{33}^* - \delta^-_{z3} \leq 0$$

$$\delta^-_{z3} - 15 \beta_{31}^* - 20 \beta_{32}^* - 25 \beta_{33}^* \leq 0$$

$$\beta_{31} + \beta_{32} + \beta_{33} + \beta_{31}^* + \beta_{32}^* + \beta_{33}^* = 1$$

$$\beta_{31}, \beta_{32}, \beta_{33}, \beta_{31}^*, \beta_{32}^*, \beta_{33}^* \in \{0,1\}; \delta^-_{z3} \text{ et } \delta^+_{z3} \geq 0; \delta^-_{z3} \text{ et } \delta^+_{z3} \leq 25.$$

-Fonction de satisfaction du critère C4 :

Le diamètre du GAZUDOC doit être maximum pour mieux assurer le transport du Gaz traité dans les canaux. La fonction de satisfaction de cet attribut est présentée sous forme d'une fonction en escalier vue la nature discrète de cette variable, ce qui explique la nature discontinue de la fonction choisie.

On a retenu la fonction de satisfaction suivante (**Figure. 99**)

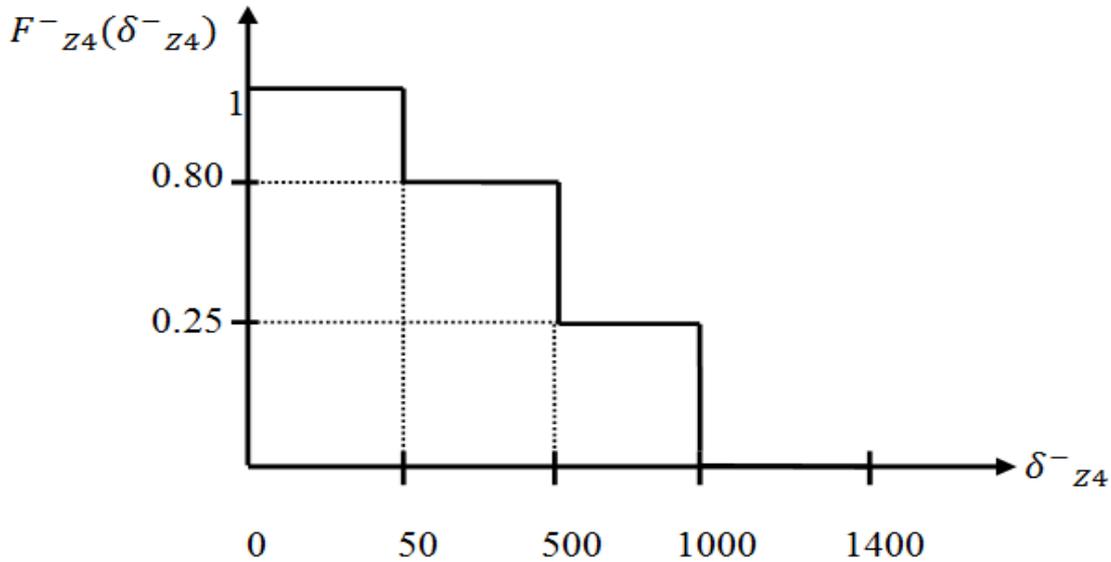


Figure. 99 La fonction de satisfaction du critère C4 : Le diamètre du GAZUDOC

Le décideur atteint sa satisfaction totale lorsque est $F^-_{z4}(\delta^-_{z4})$ est à son niveau maximal, et la déviation négative de ce critère δ^-_{z4} se situe à l'intérieur de l'intervalle $[0,50]$. Dès qu'on dépasse ce seuil dit d'indifférence, la satisfaction du décideur diminue.

La fonction de satisfaction $F^-_{z4}(\delta^-_{z4})$ peut être écrite comme suit :

$$F^-_{z4}(\delta^-_{z4}) = \begin{cases} f_1(\delta^-_{z4}) = 1, & \text{si } 0 \leq \delta^-_{z4} \leq 50, \\ f_2(\delta^-_{z4}) = 0.80, & \text{si } 50 \leq \delta^-_{z4} \leq 500, \\ f_3(\delta^-_{z4}) = 0.25, & \text{si } 500 \leq \delta^-_{z4} \leq 1000, \\ f_4(\delta^-_{z4}) = 0 & \text{si } 1000 \leq \delta^-_{z4} \leq 1400. \end{cases}$$

Quatre variables binaires $\beta_{41}, \beta_{42}, \beta_{43}$ et β_{44} Ces variables sont définies comme suit :

$$\beta_{41} = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq \delta^-_{z4} \leq 50, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{42} = \begin{cases} 1, & \text{si } 50 \leq \delta^-_{z4} \leq 500, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases},$$

$$\beta_{43} = \begin{cases} 1, & \text{si } 500 \leq \delta^-_{z4} \leq 1000, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{44} = \begin{cases} 1, & \text{si } 1000 \leq \delta^-_{z4} \leq 1400, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

Ainsi, la fonction peut avoir la forme suivante :

$$F^-_{z4}(\delta^-_{z4}) = \beta_{41} f_1(\delta^-_{z4}) + \beta_{42} f_2(\delta^-_{z4}) + \beta_{43} f_3(\delta^-_{z4}) + \beta_{44} f_4(\delta^-_{z4})$$

$$= (1) \beta_{41} + (0.80) \beta_{42} + (0.25) \beta_{43} + (0) \beta_{44}$$

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

$$= \beta_{41} + 0.80\beta_{42} + 0.25\beta_{43}.$$

Le décideur cherche à maximiser son degré de satisfaction vis-à-vis de cet objectif. Puisque $F_{z4}^-(\delta_{z4}^-)$ ne comporte pas de termes non linéaires, la représentation équivalente au programme mathématique qui vise à maximiser la fonction de satisfaction se décrit comme suit :

$$\text{Maximiser } Z = \beta_{41} + 0.80\beta_{42} + 0.25\beta_{43}$$

Sujet à :

$$50\beta_{42} + 500\beta_{43} + 1000\beta_{44} - \delta_{z4}^- \leq 0$$

$$\delta_{z4}^- - 50\beta_{41} - 500\beta_{42} - 1000\beta_{43} - 1400\beta_{44} \leq 0$$

$$\beta_{41} + \beta_{42} + \beta_{43} + \beta_{44} = 1$$

$$\beta_{41}, \beta_{42}, \beta_{43} \text{ et } \beta_{44} \in [0,1]; \delta_{z4}^- \geq 0; \delta_{z4}^- \leq 1400.$$

Etape 3 : Application du modèle d'optimisation de la fiabilité humaine sous l'initiative de minimisation du risque atteinte cellulaire irréversible

$$\text{Maximiser } Z = \beta_{11} + \beta_{21} + 0.5\beta_{22} + \beta_{31} + 4\beta_{32} - 0.2\beta_{32}\delta_{z3}^- + \beta_{31} + 4\beta_{32} + 0.2\beta_{32}\delta_{z3}^+ + \beta_{41} + 0.80\beta_{42} + 0.25\beta_{43}$$

Sujet à :

$$10\beta_{12} - \delta_{z1}^+ \leq 0$$

$$\delta_{z1}^+ - 10\beta_{11} - 60\beta_{12} \leq 0$$

$$\beta_{11} + \beta_{12} = 1$$

$$\beta_{22} + 2\beta_{23} - \delta_{z2}^- \leq 0$$

$$\delta_{z2}^- - \beta_{21} - 2\beta_{22} - 3\beta_{23} \leq 0$$

$$\beta_{21} + \beta_{22} + \beta_{23} + \beta_{24} = 1$$

$$15\beta_{32} + 20\beta_{33} - \delta_{z3}^- \leq 0$$

$$\delta_{z3}^- - 15\beta_{31} - 20\beta_{32} - 25\beta_{33} \leq 0$$

$$15\beta_{32}^* + 20\beta_{33}^* - \delta_{z3}^- \leq 0$$

$$\delta_{z3}^- - 15\beta_{31}^* - 20\beta_{32}^* - 25\beta_{33}^* \leq 0$$

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

$$\beta_{31} + \beta_{32} + \beta_{33} + \beta_{31^*} + \beta_{32^*} + \beta_{33^*} = 1$$

$$50 \beta_{42} + 500 \beta_{43} + 1000 \beta_{44} - \delta_{z_4}^- \leq 0$$

$$\delta_{z_4}^- - 50 \beta_{41} - 500 \beta_{42} - 1000 \beta_{43} - 1400 \beta_{44} \leq 0$$

$$\beta_{41} + \beta_{42} + \beta_{43} + \beta_{44} = 1$$

$$\beta_{11}, \beta_{12} = \{0,1\}; \delta_{z_1}^+ \geq 0; \delta_{z_1}^+ \leq 60.$$

$$\beta_{21}, \beta_{22} \text{ et } \beta_{23} = \{0,1\}; \delta_{z_2}^- \geq 0; \delta_{z_2}^- \leq 3.$$

$$\beta_{31}, \beta_{32}, \beta_{33}, \beta_{31^*}, \beta_{32^*}, \beta_{33^*} = \{0,1\}; \delta_{z_3}^- \text{ et } \delta_{z_3}^+ \geq 0; \delta_{z_3}^- \text{ et } \delta_{z_3}^+ \leq 25.$$

$$\beta_{41}, \beta_{42}, \beta_{43} \text{ et } \beta_{44} = \{0,1\}; \delta_{z_4}^- \geq 0; \delta_{z_4}^- \leq 1400.$$

En utilisant le progiciel LINGO version 10, la solution optimale obtenue pour la minimisation du risque atteinte cellulaire irréversible:

<i>Les variables</i>	<i>Résultat correspondant</i>
Z_1	10
Z_2	3
Z_3	25
Z_4	1350
Z^*	3.45

Tableau. 32 Solution optimale pour la minimisation du risque Atteinte cellulaire irréversible

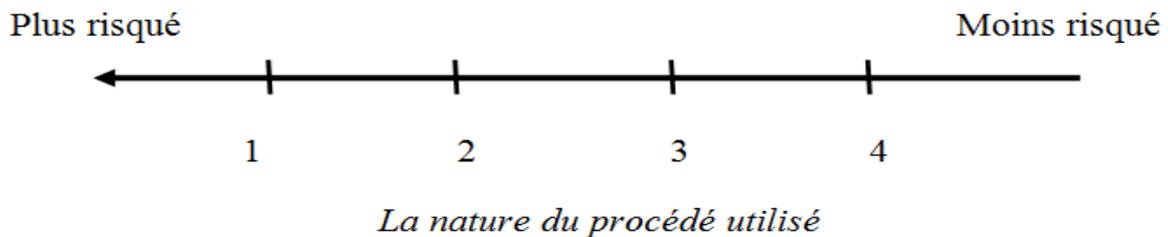
La solution trouvée est satisfaisante avec la prise en charge des préférences du décideur. Il est évident qu'avec l'application des fonctions de satisfactions, la solution est beaucoup améliorée. Le niveau de satisfaction atteint pour les 4 objectifs est de 99.45%. Ce niveau réalisé de satisfaction implique que toutes les spécifications sont respectées.

3. 5.5 Minimisation des risques d'arrêt cardiaque

Etape 1 : Evaluation des critères

-C1 : La nature du procédé utilisé

Le procédé utilisé dans l'usine de traitement de Gaz Hannibal, est un procédé de type énergivores, extensifs susceptible d'émettre dans l'atmosphère des substances dangereuses pour les travailleurs dans le site, nuisible à l'environnement et corrosif. Pour ce faire le procédé ne doit pas être généralisé pour toutes les opérations dans le site de traitement de Gaz, il diffère selon l'opération à réaliser et le temps d'application :



1 : Procédé manuel,

2 : Procédé standard,

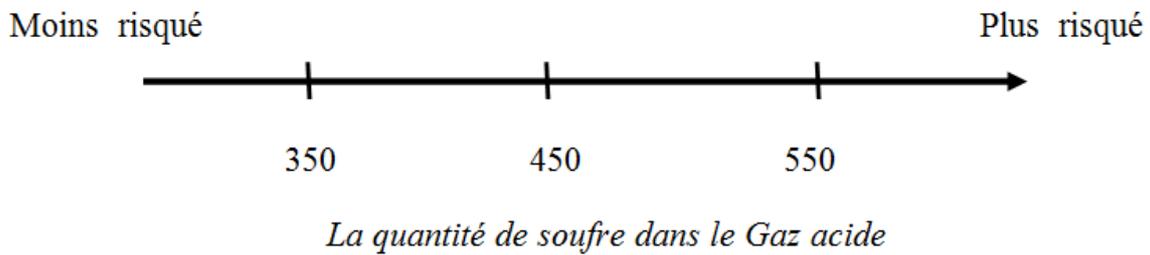
3 : Procédé non actualisé,

4: Procédé informatisé.

-C2 : La quantité du soufre dans le Gaz acide

La teneur en soufre rend le gaz acide hautement toxique, provoquant une corrosion du fer et un dysfonctionnement du matériel, ainsi qu'une irritation néfaste de la peau des travailleurs à l'intérieur du site. L'extraction et la transformation de ce Gaz exigent au responsable de fixés des quantités minimum et indispensable pour le Gaz acide, afin de minimiser les risques d'arrêt cardiaque.

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie



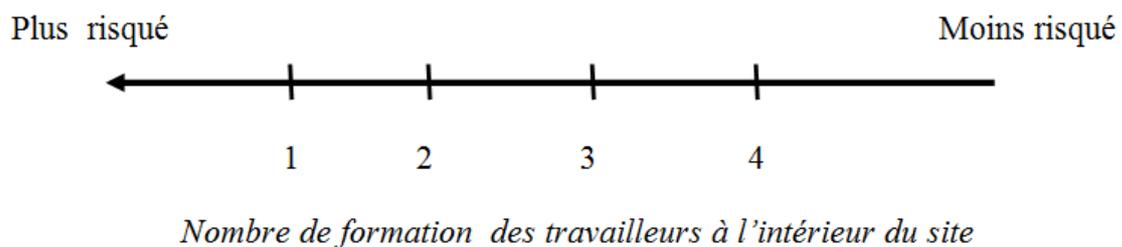
350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$: Quantité de soufre acceptable,

450 $\mu\text{g}/\text{m}^3$: Quantité de soufre élevée,

550 $\mu\text{g}/\text{m}^3$: Quantité de soufre risquée.

-C3 : Nombre de formation des travailleurs à l'intérieur du site

La formation est reconnue à l'usine de traitement de Gaz Hannibal comme une contribution essentielle pour assurer la sécurité de l'exploitation et la prévention des risques qui pourrait exposer le personnel sur site .Des exercices de formation sont effectués sur une base régulière, impliquant tous les aspects de la Plan d'intervention d'urgence:



1 : Formation semestrielle,

2 : Formation trimestrielle,

3: Formation mensuelle,

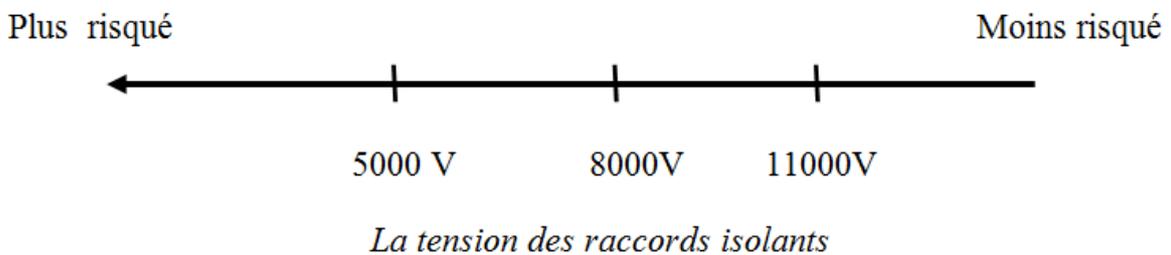
4 : Formation hebdomadaire.

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

-C4 : La tension des raccords isolants

La fuite de Gaz qui en résulte d'une chute d'un câble à haute tension sur les installations aériennes ou à proximité d'une canalisation enterrée peut s'enflammer du fait de la présence d'un arc électrique. Ce qui risque électrocution de personnes.

Pour éviter les conséquences d'une induction ou d'une conduction électrique, des raccords isolants peuvent être installés. Ces dispositions permettent d'éviter l'électrocution des personnes susceptibles d'intervenir en cas de risque de procuration d'électrocution.



5000 V : Tension des raccords isolants faible,

8000V : Tension des raccords isolants moyenne,

11000V: Tension des raccords isolants élevée.

Etape 2 : Les fonctions de satisfaction relatives à chacun des critères

Le problème est de trouver une solution optimale de la fiabilité humaine permettant de minimiser les risques d'arrêt cardiaque en agissant sur les critères correspondants.

Posons : V_1 : La nature du procédé utilisé,

V_2 : La quantité de soufre dans le Gaz acide,

V_3 : Nombre de formation des travailleurs à l'intérieur du site,

V_4 : La tension des raccords isolants.

Les limites admissibles sont données dans le Tableau. 33.

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

Variables	Limite admissible
V_1^* : La nature du procédé utilisé	4
V_2^* : La quantité de soufre dans le Gaz acide	350
V_3^* : Nombre de formation des travailleurs à l'intérieur du site	4
V_4^* : La tension des raccords isolants	11000

Tableau. 33 Limite admissible des variables du Risque Arrêt cardiaque

-Fonction de satisfaction du critère C1 :

Selon le décideur le procédé appliqué dans les différentes activités de l'usine de traitement de Gaz, ne doit pas être standardisé, il diffère selon le type d'activité et selon la période d'application du processus concerné, c'est-à-dire, pour que le décideur soit satisfait le processus doit être spécifique, actualisé et informatisé afin de minimiser les risques d'arrêt cardiaque. La fonction de satisfaction de cet attribut est présentée sous forme d'une fonction en escalier.

On a retenu la fonction de satisfaction suivante (**Figure. 100**)

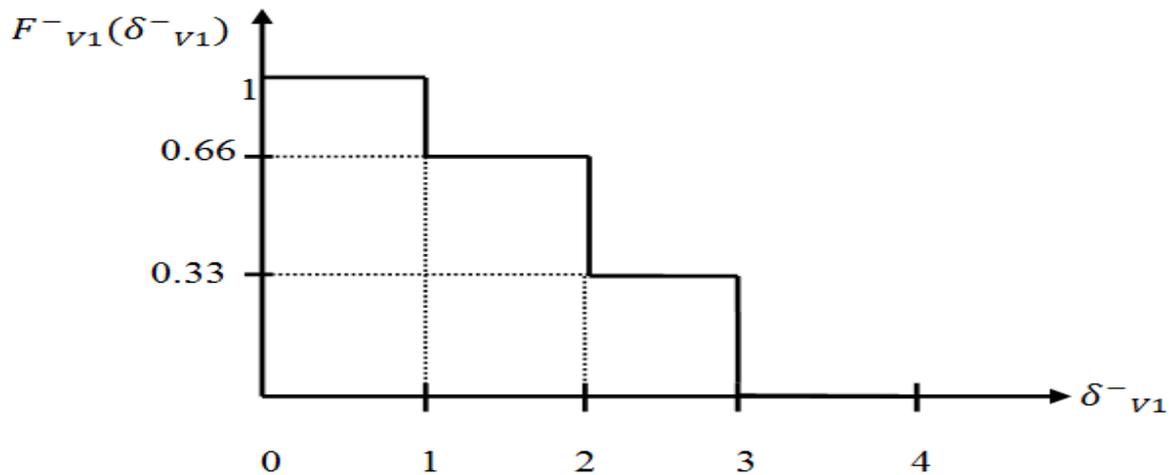


Figure. 100 La fonction de satisfaction du critère C1 : La nature du procédé utilisé

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

Le décideur atteint sa satisfaction totale lorsque est $F^{-}_{v_1}(\delta^{-}_{v_1})$ est à son niveau maximal, et la déviation négative de ce critère $\delta^{-}_{v_1}$ se situe à l'intérieur de l'intervalle $[0,1]$. Dès qu'on dépasse ce seuil dit d'indifférence, la satisfaction du décideur diminue.

$F^{-}_{v_1}(\delta^{-}_{v_1})$ peut être écrite comme suit :

$$F^{-}_{v_1}(\delta^{-}_{v_1}) = \begin{cases} f_1(\delta^{-}_{v_1}) = 1, & \text{si } 0 \leq \delta^{-}_{v_1} \leq 1, \\ f_2(\delta^{-}_{v_1}) = 0.66, & \text{si } 1 \leq \delta^{-}_{v_1} \leq 2, \\ f_3(\delta^{-}_{v_1}) = 0.33, & \text{si } 2 \leq \delta^{-}_{v_1} \leq 3, \\ f_4(\delta^{-}_{v_1}) = 0 & \text{si } 3 \leq \delta^{-}_{v_1} \leq 4. \end{cases}$$

Avec l'introduction de quatre variables binaires $\beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{13}$ et β_{14} :

$$\beta_{11} = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq \delta^{-}_{v_1} \leq 1, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \beta_{12} = \begin{cases} 1, & \text{si } 1 \leq \delta^{-}_{v_1} \leq 2, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \beta_{13} = \begin{cases} 1, & \text{si } 2 \leq \delta^{-}_{v_1} \leq 3, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

$$\beta_{14} = \begin{cases} 1, & \text{si } 3 \leq \delta^{-}_{v_1} \leq 4, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

Ainsi, la fonction peut avoir la forme suivante :

$$\begin{aligned} F^{-}_{v_1}(\delta^{-}_{v_1}) &= \beta_{11} f_1(\delta^{-}_{v_1}) + \beta_{12} f_2(\delta^{-}_{v_1}) + \beta_{13} f_3(\delta^{-}_{v_1}) + \beta_{14} f_4(\delta^{-}_{v_1}) \\ &= (1) \beta_{11} + (0.66) \beta_{12} + (0.33) \beta_{13} + (0) \beta_{14} \\ &= \beta_{11} + 0.66 \beta_{12} + 0.33 \beta_{13} \end{aligned}$$

Le décideur cherche à maximiser son degré de satisfaction vis-à-vis de cet objectif. $F^{-}_{v_1}(\delta^{-}_{v_1})$ ne comporte pas de termes non linéaires, la représentation équivalente de la programme mathématique qui vise à maximiser la fonction de satisfaction se décrit comme suit :

$$\text{Maximiser } Z = \beta_{11} + 0.66 \beta_{12} + 0.33 \beta_{13}$$

Sujet à :

$$\begin{aligned} \beta_{12} + 2 \beta_{13} + 3 \beta_{14} - \delta^{-}_{v_1} &\leq 0 \\ \delta^{-}_{v_1} - \beta_{11} - 2 \beta_{12} - 3 \beta_{13} - 4 \beta_{14} &\leq 0 \\ \beta_{11} + \beta_{12} + \beta_{13} + \beta_{14} &= 1 \end{aligned}$$

$$\beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{13} \text{ et } \beta_{14} \in \{0,1\}; \delta^{-}_{v_1} \geq 0; \delta^{-}_{v_1} \leq 4.$$

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

-Fonction de satisfaction du critère C2 :

la quantité de soufre dans le Gaz acide doit être minimiser. La fonction de satisfaction de cet attribut est présentée sous forme d'une fonction de préférence linéaire avec zone d'indifférence. Le responsable du service Santé, Sécurité et Environnement a fixé comme but pour sa satisfaction $V_2^* = 350 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

On a retenu la fonction de satisfaction suivante (**Figure. 101**)

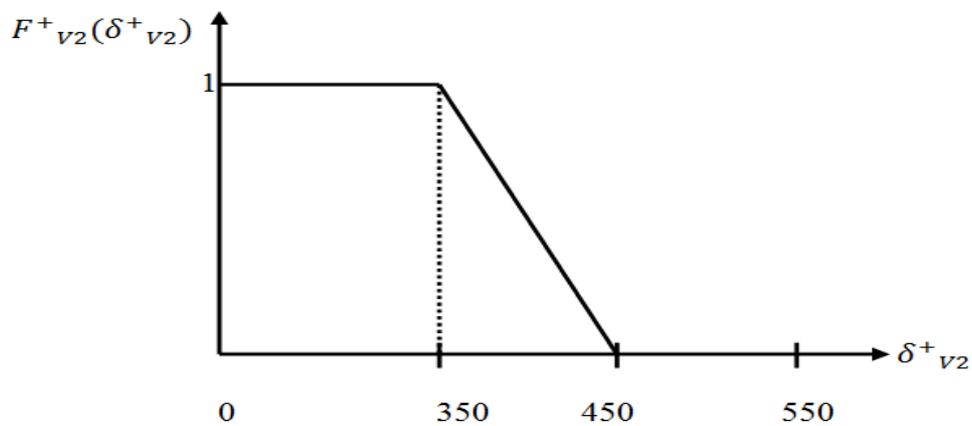


Figure. 101 La fonction de satisfaction du critère C2 : Quantité de soufre dans le Gaz acide

Le décideur est satisfait lorsque la déviation positive par rapport au but est égale à 350, sa satisfaction est décroissante pour les déviations appartenant à l'intervalle $[0,350]$.

La fonction de satisfaction $F^+_{v2}(\delta^+_{v2})$ peut être écrite comme suit :

$$F^+_{v2}(\delta^+_{v2}) = \begin{cases} f_1(\delta^+_{v2}) = 1, & \text{si } 0 \leq \delta^+_{v2} \leq 350, \\ f_2(\delta^+_{v2}) = 9 - 0.02 \delta^+_{v2}, & \text{si } 350 \leq \delta^+_{v2} \leq 450, \\ f_3(\delta^+_{v2}) = 0, & \text{si } 450 \leq \delta^+_{v2} \leq 550. \end{cases}$$

Trois variables binaires β_{21} , β_{22} et β_{23} sont définies comme suit :

$$\beta_{21} = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq \delta^+_{v2} \leq 350, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{22} = \begin{cases} 1, & \text{si } 350 \leq \delta^+_{v2} \leq 450, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases},$$

$$\beta_{23} = \begin{cases} 1, & \text{si } 450 \leq \delta^+_{v2} \leq 550, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

Ainsi, la fonction peut avoir la forme suivante :

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

$$\begin{aligned}
 F^+_{v_2}(\delta^+_{v_2}) &= \beta_{21} f_1(\delta^+_{v_2}) + \beta_{22} f_2(\delta^+_{v_2}) + \beta_{23} f_3(\delta^+_{v_2}) \\
 &= (1) \beta_{21} + (9 - 0.02 \delta^+_{v_2}) \beta_{22} + (0) \beta_{23} \\
 &= \beta_{21} + (9 - 0.02 \delta^+_{v_2}) \beta_{22} \\
 &= \beta_{21} + 9 \beta_{22} - 0.02 \beta_{22} \delta^+_{v_2}
 \end{aligned}$$

La représentation linéaire équivalente au programme mathématique se décrit comme suit :

$$\text{Maximiser } Z = \beta_{21} + 9 \beta_{22} - 0.02 \beta_{22} \delta^+_{v_2}$$

Sujet à :

$$350 \beta_{22} + 450 \beta_{23} - \delta^+_{v_2} \leq 0$$

$$\delta^+_{v_2} - 350 \beta_{21} - 450 \beta_{22} - 550 \beta_{23} \leq 0$$

$$\beta_{21} + \beta_{22} + \beta_{23} = 1$$

$$\beta_{21}, \beta_{22}, \beta_{23} \in \{0,1\}; \delta^+_{v_2} \geq 0; \delta^+_{v_2} \leq 550.$$

-Fonction de satisfaction du critère C3 :

Afin d'éviter les risques d'arrêt cardiaque provenant d'une inattention du travailleur à l'intérieur du site, le décideur cherche à sensibiliser les travailleurs par la maximisation des séances de formations. La fonction de satisfaction de cet attribut est présentée sous forme d'une fonction en escalier vue la nature discrète de cette variable, ce qui explique la nature discontinue de la fonction choisie.

On a retenu la fonction de satisfaction suivante (**Figure. 102**)

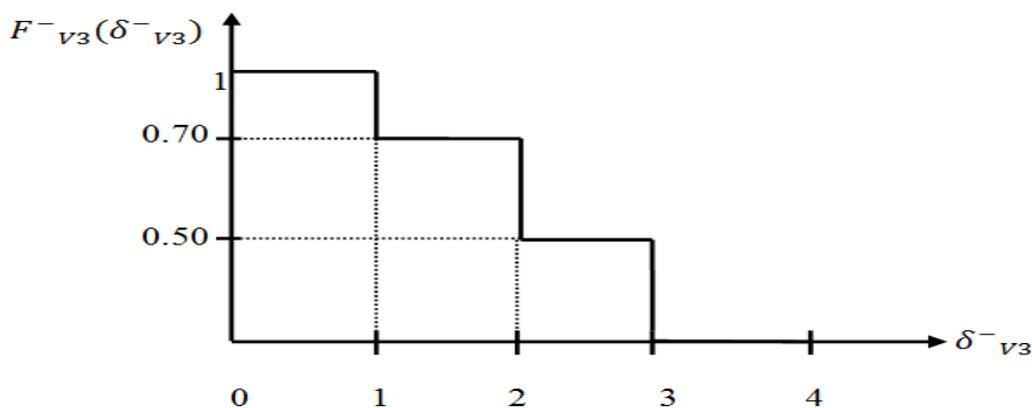


Figure. 102 La fonction de satisfaction du critère C3 : Le nombre de formation

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

Le décideur abouti à la satisfaction totale lorsque $F^{-}_{v3}(\delta^{-}_{v3})$ est à son niveau maximal, et la déviation négative de ce critère δ^{-}_{v3} se situe à l'intérieur de l'intervalle $[0,1]$. Dès qu'on dépasse ce seuil dit d'indifférence.

La fonction de satisfaction $F^{-}_{v3}(\delta^{-}_{v3})$ peut être écrite comme suit :

$$F^{-}_{v3}(\delta^{-}_{v3}) = \begin{cases} f_1(\delta^{-}_{v3}) = 1, & \text{si } 0 \leq \delta^{-}_{v3} \leq 1, \\ f_2(\delta^{-}_{v3}) = 0.7, & \text{si } 1 \leq \delta^{-}_{v3} \leq 2, \\ f_3(\delta^{-}_{v3}) = 0.5, & \text{si } 2 \leq \delta^{-}_{v3} \leq 3, \\ f_4(\delta^{-}_{v3}) = 0 & \text{si } 3 \leq \delta^{-}_{v3} \leq 4. \end{cases}$$

Quatre variables binaires $\beta_{31}, \beta_{32}, \beta_{33}$ et β_{34} sont introduite:

$$\beta_{31} = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq \delta^{-}_{v3} \leq 1, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{32} = \begin{cases} 1, & \text{si } 1 \leq \delta^{-}_{v3} \leq 2, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{33} = \begin{cases} 1, & \text{si } 2 \leq \delta^{-}_{v3} \leq 3, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

$$\beta_{34} = \begin{cases} 1, & \text{si } 3 \leq \delta^{-}_{v3} \leq 4, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

Ainsi, la fonction peut avoir la forme suivante :

$$\begin{aligned} F^{-}_{v3}(\delta^{-}_{v3}) &= \beta_{31} f_1(\delta^{-}_{v3}) + \beta_{32} f_2(\delta^{-}_{v3}) + \beta_{33} f_3(\delta^{-}_{v3}) + \beta_{34} f_4(\delta^{-}_{v3}) \\ &= (1) \beta_{31} + (0.7) \beta_{32} + (0.5) \beta_{33} + (0) \beta_{34} \\ &= \beta_{31} + 0.7 \beta_{32} + 0.5 \beta_{33}. \end{aligned}$$

Le décideur cherche à maximiser son degré de satisfaction vis-à-vis de cet objectif. Puisque $F^{-}_{v3}(\delta^{-}_{v3})$ ne comporte pas de termes non linéaires, la représentation équivalente au programme mathématique qui vise à maximiser la fonction de satisfaction se décrit comme suit :

$$\text{Maximiser } Z = \beta_{31} + 0.7 \beta_{32} + 0.5 \beta_{33}$$

Sujet à :

$$\beta_{32} + 2 \beta_{33} + 3 \beta_{34} - \delta^{-}_{v3} \leq 0$$

$$\delta^{-}_{v3} - \beta_{31} - 2 \beta_{32} - 3 \beta_{33} - 4 \beta_{34} \leq 0$$

$$\beta_{31} + \beta_{32} + \beta_{33} + \beta_{34} = 1$$

$$\beta_{31}, \beta_{32}, \beta_{33} \text{ et } \beta_{34} \in \{0,1\}; \delta^{-}_{v3} \geq 0; \delta^{-}_{v3} \leq 4.$$

-Fonction de satisfaction du critère C4 :

Le décideur cherche à maximiser la tension des raccords isolants afin de minimiser l'électrocution des personnes provoquant des risques d'arrêt cardiaque. La fonction de satisfaction de cet attribut est présentée sous forme d'une fonction de préférence linéaire avec zone d'indifférence.

On a déterré la fonction de satisfaction suivante (**Figure. 103**)

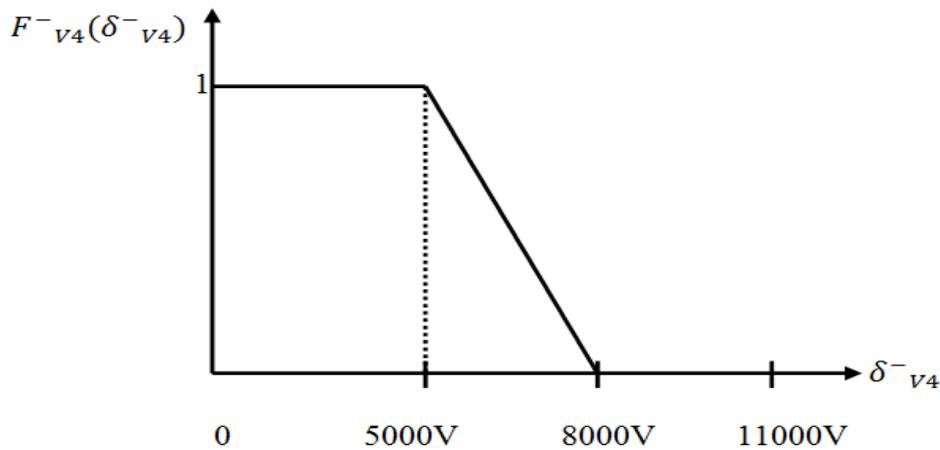


Figure. 103 La fonction de satisfaction du critère C4 : Tension des raccords isolants

Le décideur est satisfait totale lorsque la déviation positive par rapport au but est égale à 11000V, sa satisfaction est décroissante pour les déviations appartenant à l'intervalle [0,5000].

La fonction de satisfaction $F_{v4}^{-}(\delta_{v4}^{-})$ peut être écrite comme suit :

$$F_{v4}^{-}(\delta_{v4}^{-}) = \begin{cases} f_1(\delta_{v4}^{-}) = 1, & \text{si } 0 \leq \delta_{v4}^{-} \leq 5000, \\ f_2(\delta_{v4}^{-}) = 2.26 - 0.0003 \delta_{v4}^{-} & \text{si } 5000 \leq \delta_{v4}^{-} \leq 8000, \\ f_3(\delta_{v4}^{-}) = 0, & \text{si } 8000 \leq \delta_{v4}^{-} \leq 11000. \end{cases}$$

Avec, β_{41} , β_{42} et β_{43} sont trois variables binaires introduites:

$$\beta_{41} = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq \delta_{v4}^{-} \leq 5000, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}, \quad \beta_{42} = \begin{cases} 1, & \text{si } 5000 \leq \delta_{v4}^{-} \leq 8000, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases},$$

$$\beta_{43} = \begin{cases} 1, & \text{si } 8000 \leq \delta_{v4}^{-} \leq 11000, \\ 0, & \text{Autrement} \end{cases}$$

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

Ainsi, la fonction peut avoir la forme suivante :

$$\begin{aligned}
 F_{V_4}^-(\delta_{V_4}^-) &= \beta_{41} f_1(\delta_{V_4}^-) + \beta_{42} f_2(\delta_{V_4}^-) + \beta_{43} f_3(\delta_{V_4}^-) \\
 &= (1) \beta_{41} + (2.26 - 0.0003 \delta_{V_4}^-) \beta_{42} + (0) \beta_{43} \\
 &= \beta_{41} + (2.26 - 0.0003 \delta_{V_4}^-) \beta_{42} \\
 &= \beta_{41} + 9 \beta_{42} - 0.02 \beta_{42} \delta_{V_4}^-
 \end{aligned}$$

Le programme mathématique qui vise à maximiser la fonction de satisfaction de la déviation positive relative à ce critère se décrit comme suit :

$$\text{Maximiser } Z = \beta_{41} + 9 \beta_{42} - 0.02 \beta_{42} \delta_{V_4}^-$$

Sujet à :

$$5000 \beta_{42} + 8000 \beta_{43} - \delta_{V_4}^- \leq 0$$

$$\delta_{V_4}^- - 5000 \beta_{41} - 8000 \beta_{42} - 11000 \beta_{43} \leq 0$$

$$\beta_{41} + \beta_{42} + \beta_{43} = 1$$

$$\beta_{41}, \beta_{42}, \beta_{43} \in \{0,1\}; \delta_{V_4}^- \geq 0; \delta_{V_4}^- \leq 11000.$$

Etape 3 : Application du modèle d'optimisation de la fiabilité humaine sous l'initiative de minimisation du risque arrêt cardiaque.

$$\text{Maximiser } Z = \beta_{11} + 0.66 \beta_{12} + 0.33 \beta_{13} + \beta_{21} + 9 \beta_{22} - 0.02 \beta_{22} \delta_{V_2}^+ + \beta_{31} + 0.7 \beta_{32} +$$

$$0.5 \beta_{33} + \beta_{41} + 9 \beta_{42} - 0.02 \beta_{42} \delta_{V_4}^-$$

Sujet à :

$$\beta_{12} + 2 \beta_{13} + 3 \beta_{14} - \delta_{V_1}^- \leq 0$$

$$\delta_{V_1}^- - \beta_{11} - 2 \beta_{12} - 3 \beta_{13} - 4 \beta_{14} \leq 0$$

$$\beta_{11} + \beta_{12} + \beta_{13} + \beta_{14} = 1$$

$$350 \beta_{22} + 450 \beta_{23} - \delta_{V_2}^+ \leq 0$$

$$\delta_{V_2}^+ - 350 \beta_{21} - 450 \beta_{22} - 550 \beta_{23} \leq 0$$

$$\beta_{21} + \beta_{22} + \beta_{23} = 1$$

$$\beta_{32} + 2 \beta_{33} + 3 \beta_{34} - \delta_{V_3}^- \leq 0$$

$$\delta_{V_3}^- - \beta_{31} - 2 \beta_{32} - 3 \beta_{33} - 4 \beta_{34} \leq 0$$

$$\beta_{31} + \beta_{32} + \beta_{33} + \beta_{34} = 1$$

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

$$\begin{aligned}
 &5000 \beta_{42} + 8000 \beta_{43} - \delta_{v_4}^- \leq 0 \\
 &\delta_{v_4}^- - 5000 \beta_{41} - 8000 \beta_{42} - 11000 \beta_{43} \leq 0 \\
 &\beta_{41} + \beta_{42} + \beta_{43} = 1 \\
 &\beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{13} \text{ et } \beta_{14} = \{0,1\}; \delta_{v_1}^- \geq 0; \delta_{v_1}^- \leq 4. \\
 &\beta_{21}, \beta_{22}, \beta_{23} = \{0,1\}; \delta_{v_2}^+ \geq 0; \delta_{v_2}^+ \leq 550. \\
 &\beta_{31}, \beta_{32}, \beta_{33} \text{ et } \beta_{34} = \{0,1\}; \delta_{v_3}^- \geq 0; \delta_{v_3}^- \leq 4. \\
 &\beta_{41}, \beta_{42}, \beta_{43} = \{0,1\}; \delta_{v_4}^- \geq 0; \delta_{v_4}^- \leq 11000.
 \end{aligned}$$

En utilisant le progiciel LINGO version 10, la solution optimale obtenue pour la minimisation du risque arrêt cardiaque :

<i>Les variables</i>	<i>Résultat correspondant</i>
V_1	4
V_2	350
V_3	4
V_4	11000
Z^*	4

Tableau. 34 Solution optimale pour la minimisation du Risque Arrêt Cardiaque

La solution trouvée est satisfaisante avec la prise en charge des préférences du décideur. Il est évident qu'avec l'application des fonctions de satisfactions, la solution est beaucoup améliorée. Le niveau de satisfaction atteint pour les 4 objectifs est de 100 %. Ce niveau réalisé de satisfaction implique que toutes les spécifications sont respectées.

L'étape de d'optimisation de la fiabilité humaine appliqué à l'aide du modèle de programmation mathématique multiple « Goal Programming » a permis de résoudre les problèmes de minimisation de chaque type de risque, en s'appuyant sur les critères correspondant pour obtenir la fiabilité humaine optimale. (ANNEXE 3)

L'étape suivante « Contrôle et suivi », consiste à tenir le niveau de fiabilité optimale obtenu constant ou bien l'améliorer.

3.6 Contrôle et suivi

Après avoir obtenu les résultats de la fiabilité humaine optimale, il faut contrôler si ces résultats ont été exécutés et si les délais d'exécution des mesures ont été respectés.

Il s'agit non seulement de vérifier si les risques ont pu être éliminés ou écartés entièrement à travers un contrôle des résultats optimaux, mais aussi si aucun nouveau risque n'a été créé suite à l'application des mesures. Cette étape est réalisée à partir de la création d'un programme appelé « Programme d'exécution de suivi des risques ». Ce programme permet d'exécuter le suivi de chaque type de risque d'une façon séparé et ceci selon le classement hiérarchique réalisé (ANNEXE 4). La figure ci-dessous schématise le processus d'exécution de suivi des risques :

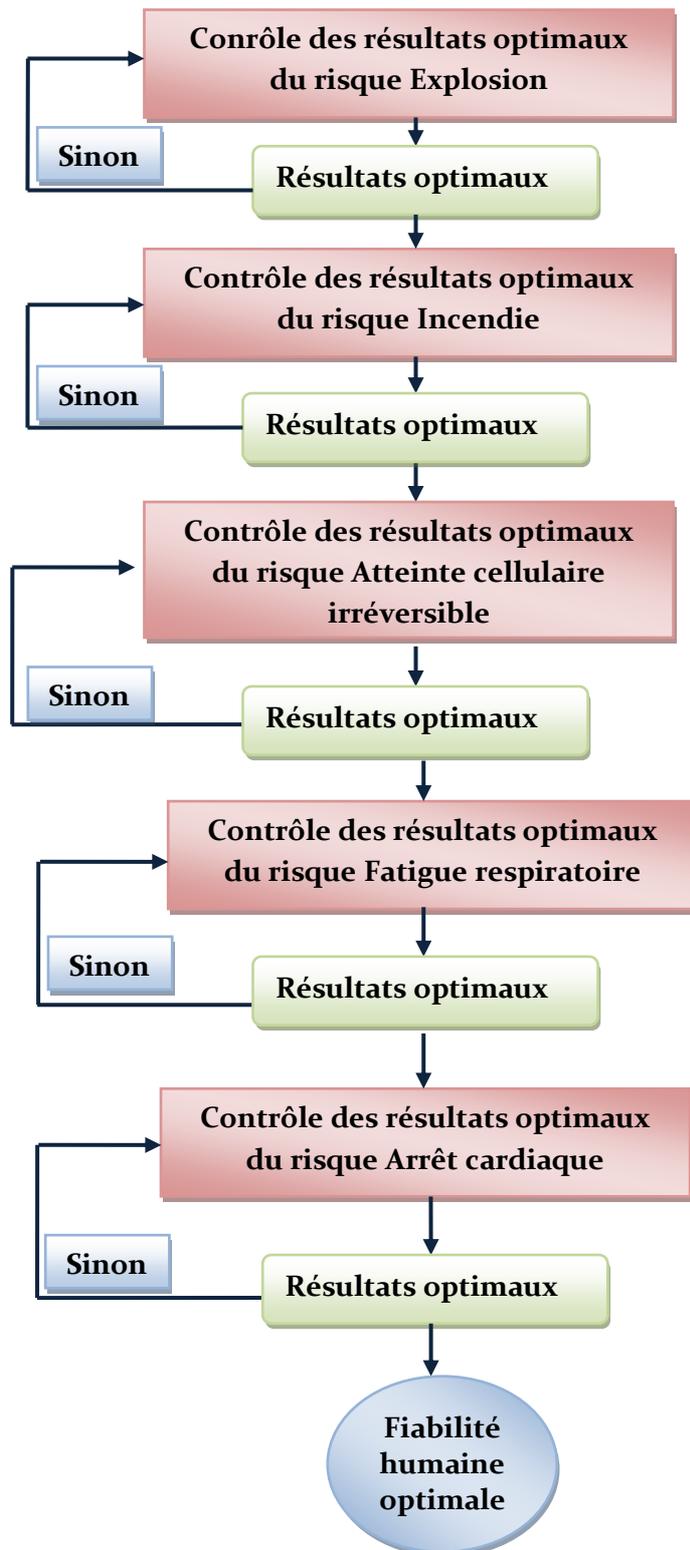


Figure 104. Processus d'exécution du programme de suivi des risques

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

Les résultats d'exécution du programme de suivi des risques sont résumés comme suit :

- **Processus de suivi de la fiabilité humaine optimal :**

Cas n°	Solutions optimaux	Les valeurs entrantes	Contrôle des risques	Décision
Cas n° 4-1	$(X_1 \geq 48)$; $(X_2 \leq 10)$; $(X_3 \leq 68)$; $(X_4 \geq 850)$.	$X_1= 50$; $X_2= 10$; $X_3= 68$; $X_4= 900$.	R1 vérifiée	Passer pour vérifier R2
Cas n° 4-2	$(Y_1 \geq 75)$; $(Y_2 \geq 4)$; $(Y_3 \leq 11)$; $(Y_4 \leq 39)$.	$Y_1= 80$; $Y_2= 4$; $Y_3= 10$; $Y_4= 39$.	R2 vérifiée	Passer pour vérifier R3
Cas n° 4-3	$(W_1 \geq 600000)$; $(W_2 \geq 200)$; $(W_3 \geq 2)$; $(W_4 \geq 2)$.	$W_1=600000$; $W_2=400$; $W_3=2$; $W_4=5$.	R3 vérifiée	Passer pour vérifier R4
Cas n° 4-4	$(Z_1 \leq 10)$; $(Z_2 \geq 3)$; $(Z_3 \geq 25)$; $(Z_4 \geq 1350)$.	$Z_1= 9$; $Z_2= 3$; $Z_3= 27$; $Z_4= 1400$.	R4 vérifiée	Passer pour vérifier R5
Cas n° 4-5	$(V_1 \geq 4)$; $(V_2 \leq 350)$; $(V_3 \geq 4)$; $(V_4 \geq 1100)$.	$V_1= 5$; $V_2= 200$; $V_3= 5$; $V_4= 1200$.	R5 vérifiée	Le processus de suivi de la fiabilité humaine est optimal

Tableau. 35 Tableau de contrôle et suivi des solutions optimaux de la fiabilité humain

Chapitre 5 : Expérimentation du modèle d'optimisation multicritère de la fiabilité humaine dans British Gaz Tunisie

- **Processus de suivi de la fiabilité humaine non optimal :**

Cas n°	Les valeurs entrantes	Contrôle des risques	Décision
Cas n° 4-6	$X_1= 40$; $X_2= 12$; $X_3= 68$; $X_4= 850$.	R1 n'est pas vérifiée	Programme de suivi est bloqué, retourné pour optimiser R1
Cas n° 4-7	R1 vérifiée Passer pour vérifier R2		
	$Y_1= 70$; $Y_2=3$; $Y_3= 11$; $Y_4=39$.	R2 n'est pas vérifiée	Programme de suivi est bloqué, retourné pour optimiser R2
Cas n° 4-8	R2 vérifiée Passer pour vérifier R3		
	$W_1= 500000$; $W_2=300$; $W_3=2$; $W_4=2$.	R3 n'est pas vérifiée	Programme de suivi est bloqué, retourné pour optimiser R3
Cas n° 4-9	R3 vérifiée Passer pour vérifier R4		
	$Z_1= 9$; $Z_2=2$; $Z_3=25$; $Z_4=1350$.	R4 n'est pas vérifiée	Programme de suivi est bloqué, retourné pour optimiser R4
Cas n° 4-10	R4 vérifiée Passer pour vérifier R5		
	$V_1= 2$; $V_2=400$; $V_3=4$; $V_4=1100$.	R5 n'est pas vérifiée	Programme de suivi est bloqué, retourné pour optimiser R5

Tableau. 36 Tableau de contrôle et suivi des solutions non optimaux de la fiabilité humaine

Conclusion

L'expérimentation du modèle d'optimisation de la fiabilité humaine a permis d'analyser et de réduire les risques professionnels au sein des sites de traitement de Gaz « British Gaz Tunisie ». Le modèle se base sur l'application de l'approche multicritère d'aide à la décision, tout en prenant en compte les évaluations subjectives et objectives. Ainsi nous avons étudié les tâches que les opérateurs humains faisaient sur leur prise de décision lors de la détermination des critères de choix des optimalité pour la minimisation des risques.

En présentant le modèle d'optimisation de la fiabilité humaine, nous avons présenté la formalisation d'une démarche de gestion du risque global. Une telle démarche repose essentiellement sur l'utilisation d'une méthode d'analyse des risques et d'une méthode multicritère d'aide à la décision. Le modèle qui en résulte permet d'identifier et d'évaluer le risque professionnel supporté par les sites de traitement de Gaz, mais aussi de définir des limites de la fiabilité optimale pour minimiser chaque type de risque identifié.

Conclusion Générale et perspectives

Vue le domaine des sciences du danger et de la gestion des risques, la contribution de notre travail est la proposition d'un modèle d'optimisation de la fiabilité humaine. Du point de vue de l'entreprise, notre contribution va dans le sens du développement d'une base de traitement des risques et d'un programme de suivi d'exécution de ces risques. Outre le modèle proposé constitue une combinaison des méthodes de gestion des risques intégrant une méthodologie multicritère d'aide à la décision. Notre contribution se décline en cinq chapitres :

Dans le premier chapitre nous avons présenté la problématique de la fiabilité, L'étude de la fiabilité peut être abordée selon différents créneaux selon le concept de base à prendre en considération : le système, l'environnement...l'opérateur. Ainsi, les opérateurs font partie intégrante du système de travail, leurs comportements modifient les conditions d'utilisations des systèmes. La fiabilité humaine entend que l'une des composantes de la fiabilité intervient de façon déterminante et à plusieurs niveaux pour assurer la sécurité, du système globale. Outre, avoir un opérateur ou un système homme-tâche fiable ne suffit pas pour avoir un système global sûr ; cela dépend de la façon dont cette capacité humaine est employée en vue de la réalisation des deux types d'objectifs dépendant du système : optimisation de la fiabilité et minimisation des risques.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté l'analyse des risques qui visent à identifier les causes d'un événement indésirable et ses conséquences. Les outils et les méthodes d'analyse des risques permettent d'étudier et d'évaluer les risques en considérant la fiabilité comme étant l'objectif final à atteindre. L'évaluation des risques est une approche structurée qui consiste à identifier, classer et hiérarchiser les risques en vue de mettre en place des actions de prévention pertinentes. Le risque résulte de la combinaison de la probabilité d'occurrence et de la gravité d'un dommage pouvant survenir dans une situation dangereuse .

Plus généralement l'évaluation des risques est une combinaison d'une mesure de l'occurrence et d'une mesure des conséquences. Les causes des événements indésirables résultent de la combinaison de défaillances de composants techniques et d'erreurs humaines.

Dans le troisième chapitre, nous avons effectué une étude bibliographique sur les méthodes de sélection et d'agrégation et d'optimisation mathématique multicritère, et ceci afin de considérer l'aspect analytique de notre problème de recherche. Ainsi, les méthodes de sélection et d'agrégation multicritère sont classées en 3 catégories : les méthodes de l'approche unique de synthèse, les méthodes de surclassement de synthèse et les méthodes interactives. Les méthodes d'optimisation mathématique multicritère sont classées en 4 catégories : la méthode de critère globale, la programmation mathématique à objectif multiple, le compromise programming et le goal programming. La principale difficulté d'un problème multicritère est qu'il s'agit d'un problème mathématiquement sans solution objective. Il n'existe pas, en général, d'action meilleure que toutes les autres. Mais ces méthodes multicritères agréent de fournir à un décideur des outils lui permettant de progresser dans la résolution du problème de décision ou plusieurs points de vue, souvent contradictoires, doivent être pris en compte.

Dans le quatrième chapitre nous avons présenté notre modèle de recherche de la problématique « Modèle d'optimisation de la fiabilité humaine », sous l'initiative de processus de minimisation des risques professionnels. L'apport dans le modèle proposé réside dans la méthodologie et les outils utilisés au niveau de chaque étape. Ainsi, notre contribution (intégration de l'approche multicritère d'aide à la décision) dans les étapes classiques d'analyse des risques est comme suit :

Le premier volet est relatif à l'évaluation des risques. Notre contribution à ce niveau est le classement des risques professionnels par application de la méthode multicritère AHP. Une telle hiérarchisation a permis une meilleure évaluation des degrés de gravité de chaque risque par rapport à l'autre.

Le deuxième volet, correspond aux traitements des risques. Notre contribution à ce niveau est l'application du Goal programming avec les fonctions de satisfaction pour minimiser les risques professionnels. Ainsi, le modèle de Goal programming avec les fonctions de satisfaction a permis d'agir sur les critères permettant d'optimiser la fiabilité pour minimiser les causes d'apparitions de chaque type de risque, tous en laissant le décideur au cœur de l'analyse.

Le troisième volet, est relatif à l'étape de contrôle et suivi des résultats optimaux. Notre contribution à ce niveau est la mise en œuvre d'un programme d'exécution de suivi des risques.

Le cinquième chapitre, a présenté notre étude expérimentale d'optimisation de la fiabilité humaine dans les sites de traitement de Gaz « British Gaz Tunisie ». Une telle démarche repose essentiellement sur l'utilisation d'une méthode d'analyse des risques et d'une méthode multicritère d'aide à la décision. Le modèle qui en résulte permet d'identifier et d'évaluer le risque professionnel supporté par les sites de traitement de Gaz, mais aussi de définir des limites de la fiabilité optimale pour minimiser chaque type de risque identifié. Le modèle présenté a permis un apport important pour « British Gaz Tunisie ».

Ce travail ouvre des perspectives de recherche intéressantes de plusieurs points de vue. Nous exposons d'abord les extensions possibles pour traiter le modèle d'optimisation de la fiabilité humaine pour d'autres types de risques (les risques de l'entreprises, les risques nucléaires...), ou encore d'élargir l'extension pour traiter le modèle d'optimisation de la fiabilité pour les risques de transport de matière dangereuse (transport routier, transport maritime...).

En plus, le modèle proposé est concentré à optimiser la fiabilité humaine, de façon à cerner les dangers provoquant des risques pour les opérateurs, une nouvelle perspective de recherche peut être adoptée en appliquant le modèle pour traiter l'optimisation de la fiabilité prévisionnelle, il s'agit donc d'assurer une optimisation dès la conception.

Une autre perspective de recherche consiste à informatiser un programme dans l'étape de traitement des risques réalisé par le Goal programming avec les fonctions de satisfactions. Ce programme permet à l'utilisateur, d'introduire les contraintes du système et la forme des fonctions de satisfaction. Il doit indiquer aussi à quel objectif et à quel type de déviations (positive ou négative) la fonction de satisfaction est associée. Un tel programme représente un outil de résolution plus convivial pour le décideur.

Bibliographie

[**ABRAMOVICI M. 1996**] ABRAMOVICI M.: « La prise en compte des facteurs organisationnels dans les méthodes d'analyse des risques », note de recherche n°96-07, Groupe de Recherche sur le Risque, l'Information et la Décision, Ecole Normale Supérieure, (1996).

[**ADVANTICA REPORT R. 8898 2007**] ADVANTICA REPORT. R8898: «Quantified Risk Assessment for Hannibal Sour Gas Project (includes Risks from Existing Hannibal and Hasdrubal Plant) », CE Humphreys, CG Robinson, R LaBand.

[**ADVANTICA REPORT. R 8956 2006**] ADVANTICA REPORT. R8956: «Quantified Risk Assessment for the New Hasdrubal Treatment Facility», CE Humphreys, CG Robinson, R LaBand.

[**ALBADVI A. et al 2007**] ALBADVI A. CHAHARSOOGHI S K. ESFAHANIPOUR A.: «Decision making in stock trading: An application of PROMETHEE», European Journal of Operational Research 177 -673–683,(2007).

[**ALMEIDA AT. 2005**] ALMEIDA AT.: « Multicriteria modelling of repair contract based on utility and ELECTRE I method with dependability and service quality criteria, » Annals of Operations Research;138:113–26,(2005).

[**AMALBERTI R. 1998**] AMALBERTI R. : « Les Facteurs Humains à l'Aube de l'An 2000 », Phoebus, 5-12 (1998).

[**ANANDA J. et al 2005**] ANANDA J. HERATH. G: « Analysis Evaluating public risk preferences in forest land-use choices using multi-attribute utility theory», Ecological Economics 55- 408– 419, (2005).

[**ANDRE FJ. et al 2007**] ANDRE FJ. CARDENETE MA. ROMERO C.: « Using compromise programming for macroeconomic policymaking in a general equilibrium framework: theory and application to the Spanish economy», Journal of the Operational Research Society (2007).

[**AOUNI B. et al 2001**] AOUNI B. KETTANI O.: « Goal programming model, a glorious history and a promising future», European Journal of Operational Research 133 -225–231, (2001).

- [**AOUNI B. et al 2005**] AOUNI B. BEN ABDELAZIZ F. MARTEL J M.: « Decision-makers preferences modeling in the stochastic goal programming», European Journal of Operational Research 162 -610–618,(2005).
- [**AOUNI B. et al 2006**] AOUNI B. HASSAINE A. MARTELJ M.: «Les préférences du décideur dans le goal programming: état de l'art et perspectives futures », 6e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation – MOSIM (2006).
- [**ARMP. 2008**] ARMP.: «Terminologie OTAN utilisées dans les ARMP», publication internationale sur la fiabilité et sur la maintenabilité, Secrétariat internationale de l'OTAN, division investissement pour la défense, édition 2.
- [**AYADI D. et al 2007**] AYADI D. AZZABI L. KOBİ A. ROBLEDO C. CHABCHOUB H.: « Une approche multicritère d'aide à la décision pour l'analyse de la fiabilité des processus opérationnel du SMQ »7ème Congrès Qualité et Sûreté de Fonctionnement, QUALITA'2007.
- [**AYADI D. et al 2008a**] AYADI D. AZZABI L. KOBİ A. ROBLEDO C. CHABCHOUB H.: « Classification of Human Risks with the Method Analytical Hierarchy Process », Quality and Dependability the 11th international conference, September, (2008).
- [**AYADI D. et al 2008b**] AYADI D. AZZABI L. KOBİ A. ROBLEDO C. BOUJELBENE Y.: « The method analytic hierarchies process for the search and selection supplier», Ninth International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference, PSAM ,(2008).
- [**AYADI D. et al 2008 c**] AYADI D. AZZABI L. KOBİ A. ROBLEDO C. CHABCHOUB H. BOUJELBENE Y. « Pilotage des processus du système management de la qualité: une approche multicritère pour la prise de décision » conférence internationale Maîtrise et Management des Risques Industriels, M2RI 2008.
- [**AYADI D. et al 2009**] AYADI D. AZZABI L. KOBİ A. ROBLEDO C. CHABCHOUB H.: « Hiérarchisation des risques des matières dangereuses : application de la méthode Macbeth» 8ème Congrès Qualité et Sûreté de Fonctionnement, QUALITA'2009.
- [**AYADI D. et al 2010**] AYADI D. AZZABI L. KOBİ A. ROBLEDO C. CHABCHOUB H.: « Application de la méthode multicritère d'aide à la décision PROMETHEE pour le système HACCP », International Metrology Conference CAFMET,(2010).
- [**AZZABI L. et al 2007**] AZZABI L. AYADI D. KOBİ A. ROBLEDO C. CHABCHOUB H. BOUJELBENE Y.: « Improvement of human safety in the complex system: integration of Six Sigma methods» , 5th International Conference on Quality and Reliability, ICQR (2007).

[**AZZABI L. et al 2008a**] AZZABI L. AYADI D. KOBİ A. ROBLEDO C. BOUJELBENE Y.: « Application of Six Sigma and Promethee Multicriteria method To Select the Product System», the international conference a quality and dependability, (2008).

[**AZZABI L. et al 2008b**] AZZABI L. AYADI D. KOBİ A. ROBLEDO C. BOUJELBENE Y.: « Une approche multicritère pour la localisation des défauts de production», conférence internationale Maîtrise et Management des Risques Industriels, M2RI, (2008).

[**AZZABI L. et al 2008c**] AZZABI L. AYADI D. KOBİ A. ROBLEDO C. BOUJELBENE Y.: «Amélioration d'un système de production complexe: intégration de la méthode Six Sigma», International Metrology Conference CAFMET,(2008).

[**AZZABI L. et al 2009 a**] AZZABI L. AYADI D. KOBİ A. ROBLEDO C. CHABCHOUB, H. BOUJELBENE Y. «Six Sigma based multicriteria approach to improve decision setting», Int. J. Quality Engineering and Technology, Vol. 1, No. 1, 2009.

[**AZZABI L. et al 2009 b**] AZZABI L. AYADI D. KOBİ A. ROBLEDO C. BOUJELBENE Y. «Application of Six Sigma and Promethee Multicriteria method To Select the Product System» Quality assurance , N° 58, Avril -juin 2009.

[**AZZABI L. et al 2010**] AZZABI L. AYADI D. KOBİ A. ROBLEDO C. BOUJELBENE Y. « Outils multicritère d'aide à la décision pour le diagnostic des procédés industriels », International Metrology Conference CAFMET,(2010).

[**BACCHUS F. et al 1998**] BACCHUS F. VANBEEK P.: «On the conversion between non binary and binary constraints satisfaction problems», Proceeding of the 15th national conference on artificial intelligence, American association for artificial intelligence (AAAI'98), Madison, USA.

[**BARABADY J. et al 2008**] BARABADY J. KUMAR U.: « Reliability analysis of mining equipment: A case study of a crushing plant at Jajarm Bauxite Mine in Iran», Reliability Engineering et System Safety (2008).

[**BUFFERNE J. 2009**] **BUFFERNE J.** : «La fiabilité des équipements industriels», TECHNOLOGIE 161 ; Avril 2009, Techno méca

[**BENARD A. et al 1994**] BENARD A. FONTAN A. : « La gestion des risques dans l'entreprise », Editions Eyrolles, (1994).

[**BAZOVSKY. I 1961**] BAZOVSKY I.: «Reliability theory and practice». Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J, (1961).

[**BEN MENA. S 2000**] BEN MENA S.: «Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision » Biotechnol. Agron. Soc. Environ. (2000).

- [**BENAYOUN R. et al 1971**] BENAYOUN R. De MONTGOLFIER J. TERGNY J. LARICHEV O.: «Linear Programming with Multiple Objective Functions: STEP Method (STEM) », Mathematical Programming, N°1, pp366-375, (1971).
- [**BENNOUR M. 2004**] BENNOUR M.: « Contribution à la Modélisation et à l’Affectation des Ressources Humaines dans les Processus », thèse de doctorat, université Montpellier II , sciences et techniques du languedoc, (2004).
- [**BERNHARD K. et al 2007**] BERNHARD K. CATHARINA G. MARC F.: «State/event fault trees A safety analysis model for software-controlled systems», international journal of Reliability Engineering and system safety (2007).
- [**BERNHARD R. 2008**] BERNHARD R.: « Review of advances in human reliability analysis of errors of commission Part 2: EOC quantification», Reliability Engineering and System Safety 93, 1105–1122,(2008).
- [**BES MP. 1998**] BES M P. : « La capitalisation active des connaissances : principes, contexte et obstacles », Réalités Industrielles, pp. 38-51, décembre, (1998).
- [**BESSIERE C. 1999**] BESSIERE C.: «Non binary constraints », proceeding of principles and practices of constraints Programming, USA.
- [**BEUTHE M. et al 2000**] BEUTHE M. EECKHOUDT L. et SCANNELLA G.: « A practical multicriteria methodology for assessing risky public investments», Socio-Economic Planning Sciences 34, (2000).
- [**BGA. 2007**] BGA.: « BG Standard for Safety Risk Criteria», BGA-HSSE-SAF-ST-1527
- [**BIENVENU C. 1981**] BIENVENU C. : « L’homme ou l’automate ? », revue générale nucléaire, (1981).
- [**BOHOLM A. 1998**] BOHOLM. A: « Comarative studies of risk perception : a review of twenty years of research», Journal of Risk Research, 1, pp. 135-164, (1998).
- [**BOUYSSOU D. 1986**] BOUYSSOU D.: «Some remarks on the notion of compensation in MCDM», operational research.
- [**BOUYSSOU D. 1990**] BOUYSSOU D. : « Méthodes d’aide multicritère – fondements et mise en œuvre », Thèse de doctorat, Université de Paris-Dauphine, (1990).
- [**BRANS JP. et al 1986**].BRANS J P. VINCKE PH. MARESCHAL B.: «How to select and how to rank projects: the PROMETHEE methods», European journal of operational research, (1986).
- [**BRENOT J. et al 1994**] BRENOT J. HUBERT PH. ELJAMMAL MH.: « Critères d’acceptation du risque », Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, note SEGR/LSEES-

94/N°24, (1994).

[CABEAU E. 1999] CABEAU E.: «Introduction à la conception de la sûreté». Cahier technique n° 144, édition juin (1999).

[CHARNES A. et al 1961] CHARNES A. COOPER WW. : «Management Models and Industrial Applications of Linear Programming». Wiley, New York, 1961.

[CHARNES A. et al 1977] CHARNES A. COOPER WW. : «Goal Programming and Multiple Objectives Optimisations», European Journal of Operational Research, Vol. 1, 1, 1977 (39-54).

[CHARNES A. et al 1976] CHARNES A. COOPER W W. HARRALD J. KARWAN K. WALLANCE W.:«A Goal Interval Programming Model for Ressource Allocation in a Marine Environmental Protection Program», Journal of Environmental Economic and Managment, Vol. 3, 1976 (347-362).

[CAILLET R. 2003] CAILLET R. : «Analyse multicritère : étude et comparaison des méthodes existantes en vue d'une application en analyse de cycle de vie », série scientifique, centre interuniversitaire de recherche en analyse des organisations. Montréal, (2003).

[CEPIN M. 2008] CEPIN M.: «DEPEND-HRA—A method for consideration of dependency in human reliability analysis». Reliability Engineering and System Safety 93- 1452–1460,(2008).

[CEI. 1988] : NORME CEI INTERNATIONALE : «Clavier numérique pour systèmes électroniques domestiques (SED) », Première édition, International Electrotechnical Commission 3, rue de Varembe Geneva, Switzerland.

[CHAKHAR S. 2006] CHAKHAR S. : «cartographie décisionnelle multicritère : formalisation et implémentation informatique » , Thèse Pour l'obtention du titre de docteur en informatique, Université Paris Dauphine D.F.R. Sciences des Organisations, (2006).

[CHARBONNIER J. 1982] CHARBONNIER J.: «Pratique du Risk Management», Edition L'Argus, (1982).

[CHERIF MS. et al 2008] CHERIF M S. CHABCHOUB H. AOUNI B.: « Quality control system design through the goal programming model and the satisfaction functions», European Journal of Operational Research 186- 1084–1098,(2008).

[CLIVILLE V. et al 2006] CLIVILLE V. et BERRAH L. : « Une approche multicritère pour l'aide a la sélection de portefeuilles de projets » 6e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation - MOSIM'06 - du 3 au 5 avril, (2006).

[COOPER SE. et al 1996] COOPER S E. RAMY-SMITH AM. WREATHALL J.: «A

technique for human error analysis (ATHEANA) », NUREG/CR- 6350, USNRC,(1996).

[COURBON JC. 1993] COURBON J C. DUBOIS D. ROY B. : « Autour de l'aide à la décision et de l'intelligence artificielle », interrogés OMEROL. J.C , conférence AFCET, France.

[COURTOT H. 1998] COURTOT H. : « La gestion des risques dans les projets », Editions Economica, (1998).

[DARBELET M. et al 1995] DARBELET M. IZARD L. SCARAMUZZA M. : « Notions fondamentales de gestion d'entreprise », Editions Foucher, Paris, (1995).

[DAVID L. et al 1997] DAVID L. BARNAUD L. : « Quels risques assurer ? », Les presses de l'Ecole des Mines de Paris, (1997).

[DE LA GARZA C. 1995] DE LA GARZA C. : « Gestion individuelles et collectives du danger et du risque dans la maintenance d'infrastructures ferroviaires », thèse de doctorat, École Pratique des Hautes Études (E.P.H.E.), Paris, (1995).

[DE TERSSAC G. et al 1990] DE TERSSAC G. CHABAUD C.: « Référentiel opératif commun et fiabilité ». In J. Leplat & G. De terssac, Eds. Les facteurs humains de la fiabilité & pp. 111, 139. Marseille: Octares.(1990)

[DE. MARCOT T. 1979] DE MARCOT T.: « Structured analysis and system specification », Yourdon Inc. New- Jersey, (1979).

[DIDELOT A. 2001] DIDELOT A.: « Contribution à l'identification et modélisation au contrôle des risques dans le processus dès la conception », thèse de Doctorat de l'institut national de recherche et de sécurité, Vandoeuvre cedex, novembre (2001).

[DPPR. 1990] Les Risques Majeurs, documentation du Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, (1990).

[DUCEPT O. 2002] DUCEPT O. CHAZAL S.: «AMDEC et AEEL », université d'angers, DESS QUASSI, (2002).

[DUCHAINED F. 1991] DUCHAINED F.: «Optimisation de Forme Multi-Objectif sur Machines Parallèles avec Méta-Modèles et Coupleurs. Application aux Chambres de Combustion Aéronautiques », thèse de doctorat, spécialité dynamique des fluides, Institut National polytechnique Toulouse -France.

[DURAND T. 2002] DURAND T.: «Technologies organisationnelles pour l'entreprise». Direction générale de l'Industrie, des Technologies de l'information et des Postes, (2002).

[E COSTA CA. 1996] E COSTA C A. : « Les problématiques de l'aide à la décision : vers un enrichissement de la trilogie choix-tri-rangement», Recherche opérationnelle, vol. 30, n°2, pp.

191-216, (1996).

[**E COSTA CA. et al 1999**] BANA E COSTA A. VANSNICK J C.: «The MACBETH approach: Basic ideas, software and an application, in *Advances in Decision Analysis*», Kluwer Academic Publishers, (1999).

[**ECOSTA CA. et al 2003**] ECOSTA CA. VANSNICK JC.: « MACBETH, London School of Economics», Dpt of Operational Research, Working paper 03-56, (2003).

[**E COSTA CA. et al 1994**] E COSTA CA. VANSNICK JC.: «MACBETH: an interactive path towards the construction of cardinal value functions», *International Transactions in Operational Research*, vol. 1, n. 4, p. 489-500 CP uses the Constraint Satisfaction Problem (CSP) (Mackworth 1977) framework to model combinatorial optimization problems.

[**EDWARDS E. et al 1973**] EDWARDS E. LEES FP.: «Man and computer in process control », London. Inst. Chem. Eng, (1973).

[**EDWARDS W. 1971**] EDWARDS W.: « Social utilities». *Engineering Economist*, Summer Symposium Series 6, pp.119-129, (1971).

[**EHSANI A. et al 2008**] EHSANIA A. RANJBARA A M. JAFARIB A. FOTUHI-FIRUZABADA M.:«Reliability evaluation of deregulated electric power systems for planning applications». *Reliability Engineering and System Safety* 93 (2008).

[**EMBREY DE. 1986**] EMBREY D E.: «A systematic approach for assessing and reducing human error in process plants», human reliability associates Ltd, Delton,Wigan, Lanes, (1986).

[**EMBREY DE. et al 1984**] EMBREY D E. HUMPHREYS P . ROSA E. KIRWAN B . REA K. : «SLIM-MAUD, an approach to assessing human error probabilities using structured expert judgement», (NUREG/CR-3518), Washington, D.C., USNRC, (1984).

[**EWALD F. 1999**] EWALD F. : «Le risque dans la société contemporaine», in *Risque & Société*, pp. 42- 61, Editions Nucléon, (1999).

[**FADIER E. et al 1998**] FADIER E. NEBOIT M.: « Essai d'intégration de l'analyse ergonomique de l'activité dans l'analyse de la fiabilité opérationnelle pour la conception : approche méthodologique » acte des deuxièmes journées Recherches et Ergonomie conférence et communications,(1998).

[**FADIER E. et al 1994**] FADIER E. ARTIGNY B. POYET C. DRODDZ-VERLY C. NICOLET J L. GAROFF-MERCIER C. CHOLLET G. et ROUSSEL J G.: « L'état de l'art dans le domaine de la fiabilité humaine». *Collection ISdF*, Edition Octarès, juin, p 446, (1994).

- [**FADIER E. et al 2007**] FADIER E. DE LA GARZA C.: « Towards a proactive safety approach in the design process: The case of printing machinery », journal of Science Safety, volume 45, issue 1-2(2007).
- [**FADIER E. 1990**] FADIER E. : « Fiabilité humaine : méthode d'analyse et domaines d'application », (Chapitre 2). In J. LEPLAT, G. DE TERSSAC, "Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes", Octarès Ed., (1990).
- [**FADIER E. 2005**] FADIER E.: « complexité des interactions entre un modèle de sécurité et un modèle d'organisation », 7^{ème} édition du congrès international pluridisciplinaire Qualita, (2005).
- [**FADIER E. 1998**] FADIER E. : « L'intégration des facteurs humains dans la sûreté de fonctionnement » Phoebus, la revue de la sûreté de fonctionnement, numéro spécial, pp 59-78, (1998).
- [**FALVELL RB. 1976**] FLAVELL R B.: « A New Goal Programming Formulation», Omega, N°4, 1976.
- [**FREEMAN BN. et al 1990**] FREEMAN-BENSON B N. MALONEY J. et BORNING A.: «A incremental constraint solver », communications of the Association for computing machinery.
- [**FREUDER E. et al 1989**] FREUDER E. et QUINN M.: «Tacking advantage of stable sets of variables in constraint-satisfaction problem», proceeding of the 9th international joint conference on artificial intelligence.
- [**FRISCH F. 1999**] FRISCH F. : « Les études qualitatives », Editions d'Organisation, (1999).
- [**FUMEY M. 2001**] FUMEY M.: « Méthode d'Evaluation des Risques Agrégés : application au choix des investissements de renouvellement d'installations », Thèse système industrielle : l'institut national polytechnique de Toulouse, (2001).
- [**GANJAVI O. et al 2002**] GANJAVI O. AOUNI B. WANG Z. : « Technical note on balanced solutions in goal programming, compromise programming and reference point method», Journal of Operational Research Society, 53, p. 927-931, (2002).
- [**GARIN H. 1994**] GARIN H.: « AMDEC/AMDE/AEEL L'essentiel de la Méthode », AFNOR, (1994).
- [**GAUFRETEAU P. et al 2000**] GAUFRETEAU P. MOTHES F. NORMIER C. et CHOLLET M G. : « FHORTE© : méthode d'analyse et de développement des performances de la Fiabilité Humaine, Organisationnelle et Technique d'un système socio-

technique », (2000).

[**GEIBEN B. et al 1998**] GEIBEN B. NASSET J J. : « Sécurité – Sûreté : La gestion intégrée des risques dans les organisations », Editions d'Organisation, (1998).

[**GOGUELIN P. 1988**] GOGUELIN P.: « Risque et prise de risque : les concepts, in La prise de risque dans le travail » coordonné par Goguelin P., et Cuny X., pp 21-35, Octares éditions, France, (1988).

[**GRAU JY. et al 1995**] GRAU J Y. DOIREAU P. : « Erreur humaine et automatisation des cockpits ». Centre d'Études et de Recherche de Médecine Aérospatiale, Octobre. Rapport de recherche 95-33,(1995).

[**GUILLAUMAT L. et al 2006**] GUILLAUMAT L. HAMDOUN Z. :«Reliability model of drilled composite materials». Journal Composite Structures 74 -467–474(2006) .

[**GUIOCHET J. 2003**] GUIOCHET J. : « Maîtrise de la sécurité des systèmes de la robotique de service approche UML basée sur une analyse du risque système » Thèse en informatique : l'institut national des sciences appliquées de Toulouse, (2003).

[**GUITOUNI A. 2000**] GUITOUNI A.: « Méthodes Multicritère d'Aide à la Décision». Notes de cours MQT-60791, Université Laval, (2000).

[**GUITOUNI A. et al 1999**] GUITOUNI A. MARTEL J-M. VINCKE PH. : « Un Cadre de Référence pour le Choix d'une Procédure d'Agrégation Multicritère ». Document de travail, FSA-1999-013, Université Laval, Québec, Canada. 1999.

[**GUMUS AT. 2008**] GUMUS A T.: « Evaluation of hazardous waste transportation firms by using a two step fuzzy- AHP and TOPSIS methodology», Expert Systems with Applications, (2008).

[**HALLNAGEL E. 1998**] HALLNAGEL E.: «Cognitive reliability and error analysis method-CREAM», 1ère édition, Elsevier science Oxford-England, (1998).

[**HAMMER W. 1972**] HAMMER W. : « Handbook of system and product safety », prentice hall, Englewood cliffs, (1972).

[**HAMMAMI A. 2003**] HAMMAMI A.: «Modélisation technico-économique d'une chaîne logistique dans une entreprise réseau », Thèse de doctorat spécialité Génie industrielle, L'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.

[**HANNAN EL. 1985**] HANNAN E L.: « An assessment of some criticisms of goal programming », Computers and Operations Research, 12(6), p. 525-541(1985).

[**HARRIS D. et al 2005**] HARRIS D. STANTON N A. MARSHALL A. YOUNG M S. DEMAGALSKI J. SALMON P.: « Using SHERPA to predict design-induced error on the

flight deck», *Aerospace Science and Technology* 9, 525–532,(2005).

[**HENLEY J. et al 1981**] HENLEY J. KUMAMOTO H.: «Reliability engineering and risk assessment». Prentice Hall, Englewood Cliffs, (1981).

[**HOLLNAGEL E. 1996**] HOLLNAGEL E.: «Reliability of cognition: Foundations of Human Reliability Analysis », Academic Press London, (1996).

[**HUA Z. et al 2008**] HUA Z. et GONG B. et XU X. : « A DS–AHP approach for multi-attribute decision making problem with incomplete information», *Expert Systems with Applications* 34-2221–2227,(2008).

[**HUMPHREYS P. 1988**] HUMPHREYS P.:«Human reliability assessor’s guide», Safety and Reliability Directorate. United Kingdom Atomic Energy Authority, (1988).

[**HVILAND RP. 1961**] HVILAND. R.P: «Introduction to the theory of reliability». General Electric Report, Society of Automative Engineers Prepint,(1961).

[**IEEE. 1984**] IEEE.: « TRANSACTIONS ON RELIABILITY», April, volume R. 33,(1984).

[**IJIRI Y. 1965**] IJIRI Y.: « Management Goals and Accounting for Control», North Holland, Amsterdam, 1965.

[**ISBN 92-64-02090-X 2004**] ISBN 92-64-02090-X: « Le facteur humain : un défi pour les autorités de sûreté nucléaire», agence pour l’énergie nucléaire organisation de coopération et de développement économiques ,(2004).

[**ISO/CEI GUIDE 51 1999**] ISO/CEI Guide 51 : « Aspects liés à la sécurité - Principes directeurs pour les inclure dans les normes ». International Organization for Standardization,(1999).

[**LAGREZE E. et al 1987**] JACQUET-LAGREZE E. MEZIANI R. SLOWINSKI R. : «MOLP with an Interactive Assessment of a Piecewise Utility Function », *European Journal of Operational Research*, Vol 31, N°3, pp. 350-357, (1987).

[**JAHANSHAHLOO GR. et al 2008**] JAHANSHAHLOO G R. AFZALINEJAD M.: «Goal programming in the context of the assignment problem and a computationally effective solution method», *Applied Mathematics and Computation* 200 -34–40,(2008)

[**JAMBON F. 1992**] JAMBON F.: « Erreurs et interruptions du point de vue de l’ingénierie de l’interaction homme-machine », Thèse en informatique : Université Joseph Fourier - GRENOBLE 1, (1992).

[**JAMBON F. 1999**] JAMBON F.: « la prévision d’erreurs par la technique des fonctions de contraintes », Onzième conférence sur l’interaction Homme-Machine (IHM’99) Montpellier, France (1999).

[JAZIRI W. 2004] JAZIRI W.: « Modélisation et gestion des contraintes pour un problème d'optimisation sur –contraint : application à l'aide à la décision pour la gestion du risque de ruissellement », thèse de doctorat, spécialité informatique, Institut National des Sciences Appliqués de Rouen-France.

[JENNINCS RH. 1974] JENNINCS R H.: « Historic and modern practice in reliability engineering», AICHE Meeting , USA, (1974).

[JIMÉNEZ A. et al 2007] JIMÉNEZ A. MATEOS A. RÍOS-INSUA S.: « Missing consequences in multiattribute utility theory», the international journal of management science, (2007).

[JUSSIEN MN. 1997] JUSSIEN MN.: «Relaxation de contraintes pour les problèmes dynamiques », thèse de doctorat, université de Rennes 1-France.

[KANTOWITZ BH. et al 1983] KANTOWITZ B H. SORKIN RD.: « Human factors », John Wiley and Sons, (1983).

[KEENEY RL. 1992] KEENEY R L.: « Valued-focused thinking: A path to creative decision». Harvard University Press, Cambridge, USA, (1992).

[KENNEDY GAL. et al 2007] KENNEDY GAL. SIEMIENIUCH C E. SINCLAIR MA. KIRWAN BA. et GIBSON WH. : « Proposal for a sustainable framework process for the generation, validation, and application of human reliability assessment within the engineering design lifecycle», Reliability Engineering and System Safety 92, 755–770,(2007).

[KETTANI O. et al 2004] KETTANI O. AOUNI B. MARTEL J M.: « The double role of the weight factor in the goal programming model», Computers & Operations Research 31-1833–1845, (2004).

[KIM IS. 2001] KIM IS.: «Human reliability analysis in the man-machine interface de sign review», Annual of nuclear energy 28,1069-1081,(2001).

[KURSAWE F. 1991] KURSAWE F.: «A variant of evolution strategies for vector optimization», Proc. PPSN I p.193-197 Sringer Verlag (1991).

[LAARIBI A. 2000] LAARIBI A.: « SIG and analyse multicritère». Hermès Sciences Publications, Paris, (2000).

[LAMBERT H. 1975] LAMBERT H.: «Fault tree in decision making in systems analyses», UCRL, (1975).

[LANDRY M. 1998] LANDRY M. : « L'aide à la décision comme support à la construction du sens dans l'organisation. », Systèmes d'Information et Management, 3(1) :5–39, (1998).

- [**LASAGNE M. 2004**] LASAGNE M. : « Management des risques : stratégies de l'entreprise et réglementation : le cas de l'industrie maritime », thèse de doctorat, école nationale supérieure d'Arts et Métiers, (2004).
- [**LAURENCE WW. 1976**] LAURENCE WW.: « Of acceptable risk», William Kaufmann, (1976).
- [**Le MOIGNE JL. 1990**] Le MOIGNE J L. : « La modélisation des systèmes complexes », Afcet Systèmes, Dunod, (1990).
- [**LE PETIT ROBERT. 1998**] DICTIONNAIRE LE PETIT ROBERT, (1988).
- [**LEPLAT J. 1985**] LEPLAT J.: « Erreur humaine, fiabilité humaine dans le travail », Paris, Armand Colin.
- [**LEPLAT J. et al 1981**] LEPLAT J. DE TERSSAC G. CELLIER J M. NEBOIT M. OUDIZ A. : « Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes », édition Octares/entreprises, Marseille,(1990).
- [**LEPLAT J. et al 1989**] LEPLAT J. DE TERSSAC G.: « Fiabilité et ergonomie», actes du XXVème congrès de la Société d'Ergonomie de langue française, Lyon ,(1989).
- [**LEPLAT J. et al 1983**] LEPLAT J. HOC J M. : « Tâche et activité dans l'analyse psychologique des situations », Cahiers de psychologie cognitive, 3(1), 49-63, (1983).
- [**LEROY A. et al 1992**] LEROY A. SIGNORET J P. : « Le risque Technologique », Presses Universitaires de France, octobre (1992).
- [**LEVESON N. 1995**] LEVESON N.: « Safeware - System safety and computers». University of Washington: Addison-Wesley, (1995).
- [**LEONTIEV A. 1976**] LEONTIEV A. : « Le développement du psychisme » , éditions sociales, Paris(1976).
- [**LIAO C N. 2008**] LIAO C N. : « Formulating the multi-segment goal programming», Computers & Industrial Engineering ,(2008).
- [**LIGERON SA. 1999**] LIGERON S A. : « Méthodes d'évaluation des risques projet, journées d'études et d'échanges : processus et techniques d'aide à la décision dans le management des risques », institut centralien des technologies et du management, 24-25 novembre, (1999).
- [**LISSANDRE M. 1990**] LISSANDRE M. : « Maîtriser SADT » Armand Colin, 219 pages, ISBN 2200420226, (1990).
- [**LØKEN E. et al 2008**] LØKEN E. BOTTERUD A. HOLEN A.: « Use of the equivalent attribute technique in multi-criteria planning of local energy systems», European Journal of Operational Research, (2008).

- [**LOURENÇO RP. et al 2004**] LOURENÇO R P. PAULO COSTA J.: « Using ELECTRE TRI outranking method to sort MOMILP non dominated solutions», *European Journal of Operational Research* 153 -271–289,(2004).
- [**LOUYOT G. 1997**] LOUYOT G. : « Prise en compte des risques dans les projets de développement de produits Proposition d'une méthode d'analyse par les scénarios », thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 19 décembre, (1997).
- [**MARCO N. et al 1999**] MARCO N. DESIDERI J-A. LANTERI S.:«Multi-objective optimization in CFD by genetic algorithms», rapport de recherche n° 3686.
- [**MARGISSIAN N. 2003**] MARGISSIAN N.: « Guide pratique des risques professionnels », édition DUNOD, (2003).
- [**MARMUSE C. et al 1989**] MARMUSE C. MONTAIGNE X. : « Management du risque », Vuibert Entreprise, (1989).
- [**MARTEL JM. 1998**] MARTEL J-M.: « Multicriteria analysis under uncertainty : The approach of outranking synthesis». Working Paper 1998-039, Faculté des Sciences de l'Administration, Université Laval, (1998).
- [**MARTEL JM. et al 1990**] MARTEL J M. AOUNI B.: « Incorporating the decision-makers preferences in the goal programming model », *Journal of Operational Research Society*, 41(12), p. 1121-1132, (1990).
- [**MARTEL JM. et al 1998**] MARTEL J M. AOUNI B.: «Diverse imprecise goal programming model formulations » *Journal of Global Optimization*, 12, p. 127-138, (1998).
- [**MAYSTRE LY. et al 1994**] MAYSTRE LY. PICTET J. SIMOS J. : « Méthodes multicritères ELECTRE », Lausanne, presse polytechniques et universitaires romandes, (1994).
- [**MÉNDEZ M. et al 2006**] MÉNDEZ M. GALVÁN B. SALAZAR D. et GREINER D.: «Multiple-Objective Genetic Algorithm Using The Multiple Criteria Decision Making Method TOPSIS», MOPGP'06: 7th Int. Conf. on Multi-Objective Programming and Goal Programming, (2006).
- [**MOUSSA F. et al 2006**] MOUSSA F. KOLSKI C. RIAHI M.: « Analyse des dysfonctionnements des systèmes complexes en amont de la conception des IHM : apports, difficultés, et étude de cas », *Revue d'Interaction Homme Machine (RIHM)*, volume 7(2006).
- [**MOUSSEAU V. et al 2000**] MOUSSEAU V. SLOWINSKI R. ZIELNIEWICZ P.: «A useroriented implementation of the ELECTRE TRI method integrating preference elicitation support », *Computers & Operations Research* 27, 757–777,(2000).

[**MOUSSEAU V. 1993**] MOUSSEAU V. : « Problèmes liés à l'évaluation de l'importance relative des critères en aide multicritère à la décision : réflexions théoriques, expérimentations et implémentations informatiques », Thèse de doctorat, Université Paris-Dauphine, (1993).

[**NEA/CSNI/R. (1998)1**] NEA/CSNI/R. (98)1: « critical operator actions: human reliability modeling and data issues. » Principal Working Group No. 5 - Task 94-1 Final Task Report prepared by a Group of Experts of the NEA Committee on the Safety of Nuclear Installations”, (1998)

[**NF EN 292-16 2004**] La norme NF EN 292-16, (2004).

[**NICOLET JL. et al 1990**] NICOLET J L. CARNINO A. WANNER J C.: « Catastrophes ? Non merci ! La prévention des risques technologiques et humains ». Éditions Masson, (1990).

[**NGABI S. 2006**] **NGABI S.** : « proposition d'une méthode de maîtrise des risques industriels pour le respect de l'hygiène, de la sante, de la sécurité et de l'environnement dans le secteur pétrolier », thèse de Doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers Centre de Paris.

[**NORMAN DA. et al 1983**] NORMAN DA.: «Design Rules Based on Analyses of Human Error», Communications of the ACM, 26(4), 254-258.

[**OGRYCZAK W. 2001**] OGRYCZAK W.: « On goal programming formulations of the reference point method », Journal of the Operational Research Society, 52, p. 691-698,(2001).

[**PAPADOPOULOS A. et al 2008**] PAPADOPOULOS A. KARAGIANNIDIS A.: « Application of the multi-criteria analysis method Electre III for the optimisation of decentralised energy systems», Omega 36- 766 – 776, (2008).

[**PAPADOPOULOS Y. 2004**] PAPADOPOULOS Y. PARKER D. et GRANTE C.: « A Method and Tool Support for Model-based Semi-automated Failure Modes and Effects Analysis of Engineering Designs», SCS 2004, 9 th Australian Workshop on Safety Critical Systems, Brisbane, Published in: Conferences in Research and Practice in Information Technology, Vol. 38, Australian Computer Society, (2004).

[**PIERREVAL H. 1990**] PIERREVAL H.: « les méthodes d'analyse de conception des systèmes de production », Paris Hermès, (1990).

[**POHEKAR SD. et al 2006**] POHEKAR SD. et RAMACHANDRAN M.: « Multi-criteria evaluation of cooking devices with special reference to utility of parabolic solar cooker (PSC) in India», Energy 31 1215–1227,(2006).

[**POLET P. 2002**] POLET P. : « Modélisation des Franchissements de Barrières pour l'Analyse des Risques des Systèmes Homme-Machine», Thèse Présentée à l'Université de

Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, (2002).

[POMEROL JC. et al 1993] POMEROL JC. SERGIO BR.: « Choix multicritère dans l'entreprise », Editions Hermès, Paris, (1993).

[PONGPENG J. et al 2003] PONGPENG J. LISTON J.: «A multicriteria model's survey: state of the art and some necessary capabilities of future models», Construction Management and Economics, 21, p. 665-670, (2003).

[POUMADERE M. 1995] POUMADERE M. : «Enjeux de la communication publique des risques pour la santé et l'environnement», revue européenne de Psychologie appliquée, vol. 45, n°1, pp. 7-15, (1995).

[R2P2. 2007] R2P2.: « Reducing Risks Protecting People», UK HSE publication.

[RAAFAT HMN. et al 1987] RAAFAT H M N. ABDOUNI AH.: « Development of an Expert System for Human Reliability Analysis», Joournal of Occupational Accidents, 9, 137-152,(1987).

[RASMUSSEN J. et al 1987] RASMUSSEN J. DUNCAN K. LEPLAT J.: « New technologies and Human Error». New York: Wiley, (1987).

[RASMUSSEN J. 1986] RASMUSSEN J.: «Information processing and Human-Machine Interaction : An approach to cognitive engineering». North-Holland, (1986).

[RASMUSSEN J. et al 1987] RASMUSSEN J. DUNCAN K. LEPLAT J.: «New Technologies and Human Error» New York.

[RAUFASTE É. et al 1999] RAUFASTE É. HILTON D J.: « les mécanismes de la décision face au risque », RISQUES n° 39 / Septembre, (1999).

[REACTOR SAFETY. 1975] REACTOR SAFETY.: «An assessment of accident risks in US». Commercial nuclear power plant, wash- 1400, US/NRC, (1975).

[REASON J. 1990] REASON J.: « Human error». Cambridge University Press, (1990).

[REASON J. 1987] REASON J.: « A preliminary classification of mistakes. In J. RASMUSSEN, K. DUNCAN, & J. LEPLAT (Eds.), New Technologies and Human Error (pp. 329-336). New York: John Wiley and Sons.

[REASON J. 1993] REASON J. : « L'erreur humaine. » Paris, France : Presses Universitaires de France, (1993).

[RINGUEST JL. et al 1983] RINGUEST J L. GULLEDGE T R.: « A preemptive value-function method approach for multi-objective linear programming problems», Decision Sciences, 14, p. 76-86, (1983).

[ROGHANIAN E. et al 2008] ROGHANIAN E. ARYANEZHAD M B SADJADI S J.:

«Integrating goal programming, Kuhn–Tucker conditions, and penalty function approaches to solve linear bi-level programming problems», *Applied Mathematics and Computation* 195-585–590,(2008).

[ROGNIN L. 2000] ROGNIN L. SALEMBIER P. ZOUINAR M.: «Cooperation, reliability of socio-technical systems and allocation of function». *International Journal of Human-Computer Studies* 52, 357,379,(2000).

[ROMERO C. et al 1998] ROMERO C. TAMIZ M. et JONES D F.: « Goal programming, compromise programming and reference point method formulations: linkages and utility interpretations », *Journal of Operational Research Society*, 49, p. 986-991, (1998).

[ROMERO C. 1991] ROMERO C.: « Handbook of critical issues in goal programming», Pergamon Press, Oxford, (1991).

[ROMERO C. 2004] ROMERO C.: « A general structure of achievement function for a goal programming model », *European Journal of Operational Research*, 153, p. 675 686, (2004).

[ROUSSE SH. et al 1983] ROUSSE S H. ROUSSE W. HAMMER J M. : « Analysis and classification of human errors », *IEEE transaction system, Man and cybernetics* , Vol, SMC 13(4).

[ROWE WD. 1997] ROWE W D.: « An anatomy of risk», Wiley, New-York, (1977).

[ROY B. et al 1993] ROY B. BOUYSSOU D. : « Aide multicritère d'aide à la décision ». Economica, Paris, (1993).

[ROY B. et al 1996] ROY B. MOUSSEAU V.: «A theoretical framework for analysing the notion of relative importance of criteria », *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 5, p. 145-159, (1996).

[ROY B. 1990 a] ROY B.: « The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods, » *Readings in multiple criteria decision aid*. Berlin: Springer; 1990. p. 155–83.

[ROY B. 1990b] ROY B.: « Decision-aid and decision-making », editor, *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*, pages 17–35. Springer-Verlag, Berlin, (1990).

[ROY B. 1992] ROY B. : « Science de la décision ou science de l'aide à la décision ». *Revue Internationale de Systémique*, 6(5) :497–529, (1992).

[ROY B. et al 1971] ROY B. BERTIER P. : « La Méthode Electre II, une Méthode de Classement en Présence de Critères Multiples ». Note de travail 142, Direction Scientifique, Sema, Paris, (1971).

[ROY B. 1981] ROY B.: «The optimization problem formulation: criticism and overstepping», *the operational Research Society*.

- [**ROY B. 1985**] ROY B.: « Méthodologie multicritère d'aide à la décision », Economica, Paris, (1985).
- [**ROY B. 1992**] ROY B. : « Science de la décision ou science de l'aide à la décision », Revue internationale de systémique, vol 6, n°5, pp. 497-529, (1992).
- [**ROY B. 1998**] ROY B.: «A missing link in OR-DA: Robustness analysis. »Foundations of Computing and Decision Sciences, 23:141–160, (1998).
- [**ROY B. 1990 c**] ROY B. : «Science de la décision ou science de l'aide à la décision ?», cahier de lamsade 97, Université Paris Dauphine, France.
- [**SAATY T. 2003**] SAATY T L.: « Decision-making with the AHP: Why is the principal Eigenvector necessary », European Journal of Operational Research 145 -85–91,(2003).
- [**SAATY T. 2007**] SAATY T L.: « Time dependent decision-making; dynamic priorities in the AHP/ANP: Generalizing from points to functions and from real to complex variables », Mathematical and Computer Modelling 46 -860–891,(2007).
- [**SELIM H. et al 2008**] SELIM H. ARAZ C. OZKARAHAN I.: « Collaborative production–distribution planning in supply chain: A fuzzy goal programming approach », Transportation Research Part E 44 - 396–419,(2008).
- [**SHANIAN A. et al 2006**] SHANIAN A. SAVADOGO O.: « A non-compensatory compromised solution for material selection of bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) using ELECTRE IV », Electrochimica Acta 51-5307–5315,(2006).
- [**SHANIAN A. et al 2008**] SHANIAN A. MILANI A S. CARSON C. ABEYARATNE RC. : « A new application of ELECTRE III and revised Simos' procedure for group material selection under weighting uncertainty », Knowledge-Based Systems, (2008).
- [**SIMON HA. 1960**] SIMON H A.: « The New Science of Management Decision », Harper and Brothers, New York, (1960).
- [**SIMON U. et al 2004**] SIMON U. BRUGGMANN R. BUDEN S.: «Aspects of decision support in water management –example Berlin and postdam (Germany) I, spacially differentiated evaluation », water research 38, (2004).
- [**SMITH B. et al 2000**] SMITH B. STERGIOU K. WALSH T.: « Using auxiliary variables and implied constraints to model non binary problem », Proceeding of the 15th national conference on artificial intelligence, American association for artificial intelligence (AAAI'00), USA.
- [**SOLAND RM. 1979**] SOLAND RM. : «Multicriteria optimization: a general

characterization of efficient solutions», Decision sciences.

[**STELA R. et al 2007**] STELA R. KARIM S. : « Perception du risque et prise de décision d'octroi de crédit aux PME : le cas des banquiers français et bulgares », XVIème Conférence Internationale de Management Stratégique, Juin, (2007).

[**STEWART S. et al 1991**] STEWART S. WHITE C.: « Multiobjective A*», Journal of the ACM, 38(4):775–814, October 1991.

[**STERGIOU K. et al 1999**] STERGIOU K. WALSH T.: « Encodings of non binary constraint satisfaction problem », Proceeding of the 15th national conference on artificial intelligence, American association for artificial intelligence (AAAI'99), USA.

[**STEUER R. et al 1983**] STEUER R. CHOO E.: « An Interactive Weighted Tchebycheff Procedure for Multiple Objective Programming». Mathematical Programming, N° 26, PP. 326-344, (1983).

[**STEUER RE. 1986**] STEUER RE. : «Multiple criteria optimization, theory, computation and applications » Wiley, (1986).

[**SWAIN AD. et al 1983**] SWAIN AD. GUTTMANN HE. : « Handbook of reliability analysis with emphasis on nuclear plant applications». Technical Report NUREG/ CR-1278, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, (1983).

[**TSAI KM. et al 2008**] TSAI KM. YOU SY. LIN YH. TSAI CH. : « A fuzzy goal programming approach with priority for channel allocation problem in steel industry», Expert Systems with Applications 34 -1870–1876,(2008).

[**TVERSKY A. 1969**] TVERSKY A. : «Itransivity of preference», Psychological review.

[**VANDERHAEGEN F. 2001**] VANDERHAEGEN F. : «A non-probabilistic prospective and retrospective human reliability analysis method — application to railway system». Reliability Engineering and System Safety 71 1–13(2001).

[**VANDERHAEGEN F. 1999**] VANDERHAEGEN F.: «APRECIH, a human unreliability analysis method application to railways system control engineering», Practice 7, pp1395-1403, (1999).

[**VANDERHAEGEN F. et al 1998**] VANDERHAEGEN F. TELLE B. GAUTIEZ J.: «Consequence analysis of human unreliability during railway traffic control», sixth international conference on computer aided design manufacture and operation in railway and other advanced mass transit systems, UK (1998).

[**VAN HENTENRYCK P. 1989**] VAN HENTENRYCK P. : «Constraint Satisfaction in Logic Programming», The MIT Press.

- [VANDERPOOTEN D. 1988] VANDERPOOTEN D.: « A Multicriteria Interactive Procedure Supporting a Directed Learning of Preferences», Cahiers du Lamsade, Université de Paris-Dauphine, (1988).
- [VILLEMEUR A. 1988] VILLEMEUR A.: «Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels: fiabilité-facteurs humains-informatisations». Edition EYROLLES (1988).
- [VINCKE P. 1976] VINCKE P. : « Une Méthode Interactive en Programmation Linéaire à Plusieurs Fonctions Economiques ». Revue Française d'Informatique et de Recherche Opérationnelle, N° 2, pp. 5-20, (1976).
- [VOLLOT JL. et al 1996] VOLLOT JL. BARDET JF. : « Maîtriser les risques », 10^{ème} colloque national de fiabilité & maintenabilité, Saint-Malo, France, 1-3 octobre (1996).
- [VOOGD H. 1983] VOOGD H.: «Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning», Pion Ltd, London, (1983).
- [WANGA JW. et al 2008] WANGA JW. CHENG CH. CHENG HK. : « Fuzzy hierarchical TOPSIS for supplier selection Applied», Soft Computing, (2008).
- [WANNER JC. et al 1981] WANNER. J.C: « Le facteur humain dans la conduite des grands systèmes », le progrès technique, n° 21, (1981).
- [YANG JB. et al 1996] YANG JB. SEN P. : « Preference modelling by estimating local utility functions for multi-objective optimization», European Journal of Operational Research, 95, p. 115-138, (1996),
- [YANG T. et al 2007] YANG T. HUNG CC. : «Multiple-attribute decision making methods for plant layout design problem», Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 23- 126–137, (2007).
- [ZARATE P. 2005] ZARATE P. : « Des Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision Aux Systèmes Coopératifs d'Aide à la Décision : Contributions conceptuelles et fonctionnelles », Habilitation à Diriger des Recherches Spécialité Informatique, Institut National Polytechnique DE TOULOUSE (INPT), (2005).
- [ZELENY M. 1973] ZELENY M.: «Compromise programming», In: Cochrane JL and Zeleny M (eds). Multiple Criteria Decision Making. University of South Carolina Press: Columbia,pp 262–301.
- [ZELENY M. 1982] ZELENY M. : « Multiple criteria decision making», Mc Graw-Hill, New-York, (1982).

[ZIMMERMANN HJ. 1978] ZIMMERMANN HJ.: «Fuzzy Programming and Linear Programming with Several Objectives Functions», Fuzzy Sets and Systems, Vol. 1, 1978 (45-55).

[ZWINGELSTEIN G. 1995] ZWINGELSTEIN G.: «Diagnostic Des Defaillances - Théorie Et Pratique Pour Les Systèmes Industriels ». Hermes Science Publications, (1995).

LES LOGICIELS ET PROGICIELS:

-**Software Change Control Policy**; EMD-PRO-2007,

-**Statistica software version 8**

<http://www.statsoft.fr/V8list.htm> (version d'évaluation)

- **TDC FMEA software version 2004**

http://www.tdc.fr/en/products/tdc_fmea.php

- **Expert Choice version 11.5**

<http://www.expertchoice.com/download/Default.htm> (version d'évaluation)

-**Progiciel LINGO version 10**

<http://www.ritme.com/fr/demos/accueil.html>

-**Microsoft Visual C++ version 6.0.**

Annexes 1

Advantica Report Number: T224
 BG Tunisia Document: BG-TUN-PROJ-SPG-08-HSE-00021
 Issue: 1



APPENDIX A SITE INFORMATION

A.1 Demographics

A.1.1 Hannibal

The occupied buildings on the Hannibal plant are illustrated in Figure 4.

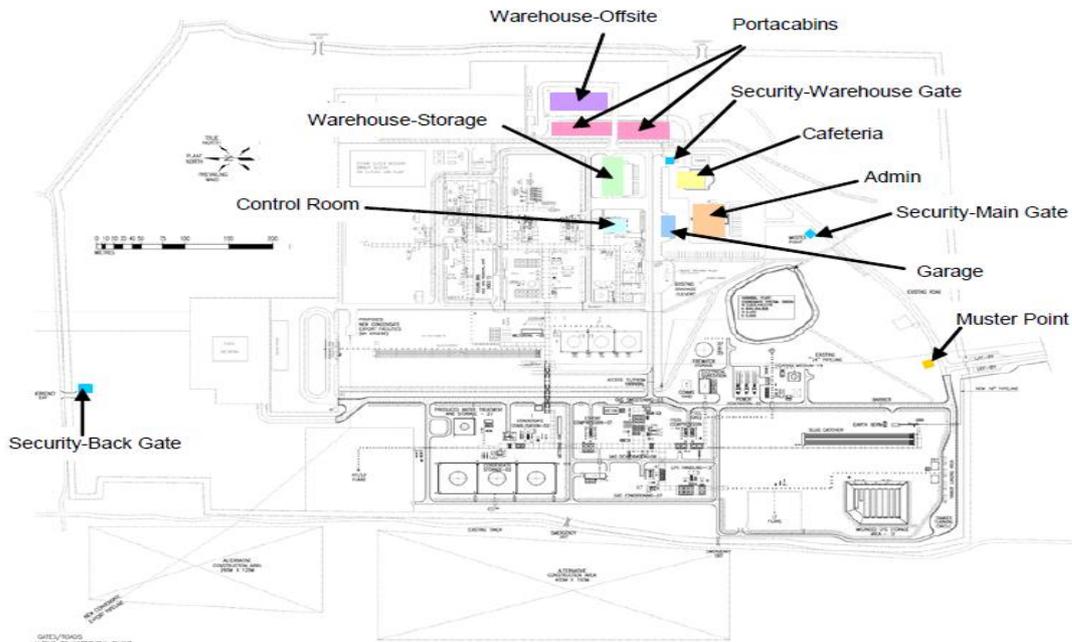


Figure 4 Hannibal Site Occupied Buildings

The occupancy levels for the existing Hannibal site, derived from information provided for the 2006 QRA, shown in Table 10 and Table 11 below.

A.2 Meteorological data

The meteorological data from Sfax airport was used as representative of the local area. The Sfax airport windrose is given in Figure 6. Figure 7 shows the windrose relative to the Hannibal site.

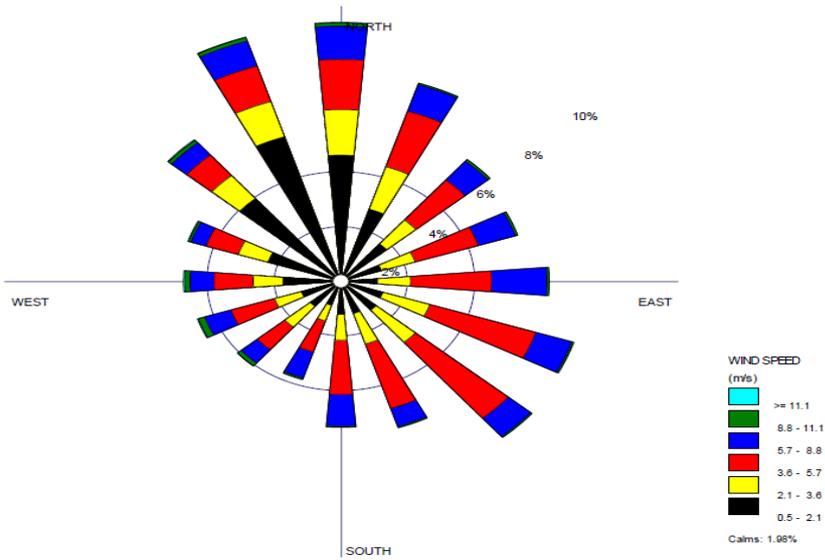


Figure 6: Sfax Airport Windrose

Advantica Report Number: 7224
BG Tunisia Document: BG-TUN-PROJ-SPG-08-HSE-00021
Issue: 1

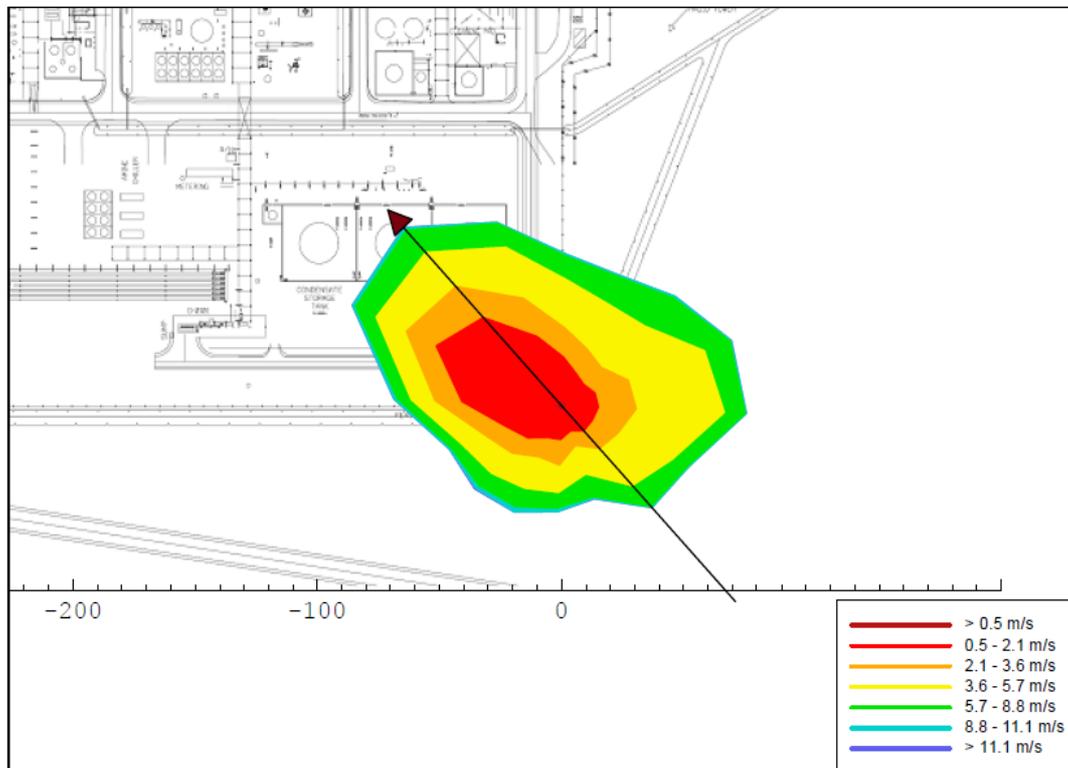


Figure 7 Hannibal Site windrose

Annexes 2

Advantica Report Number: T224
 BG Tunisia Document: BG-TUN-PROJ-SPG-08-HSE-00021
 Issue: 1



B.2 Gas Inlet area (C-01, C-02)

This area includes the gas import line, the pig trap and the slugcatcher.

The release scenarios are considered in two general groupings.

- Large item failures. These are
 - Failure of the above ground section of the gas import line before the ESD valve
 - Failure of the above ground section of the gas import line after the ESD valve
 - Catastrophic failure of the sphere receiver (pig trap)
 - Catastrophic failure of the slugcatcher
- Small and medium releases from pipework / valves. The fluids considered are
 - Natural gas from the inlet area and the pipework connecting the inlet area to the Amine CO₂ removal area.
 - Unstable condensate from the line connecting the slugcatcher to the condensate stabilisation area.

The location of these areas is shown in Figure 8.

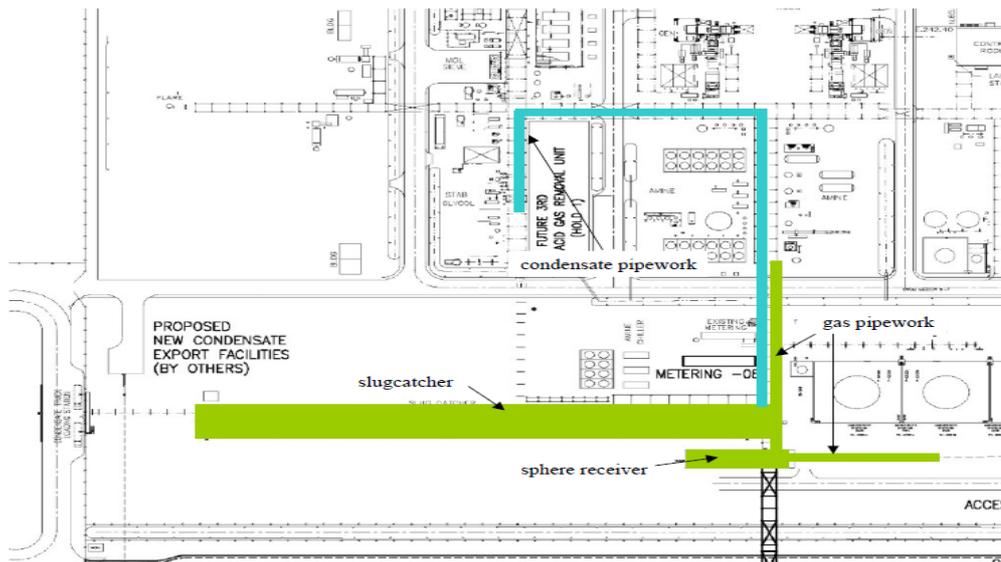


Figure 8 Locations for scenario groups C-01 and C-02

B.3 STABILISATION AREA 1 (C-03, C-04)

This area includes the gas import line, the pig trap and the slugcatcher. The release scenarios are considered in two general groupings.

- Large item failures. These items selected are:
 - Spontaneous failure of D-0202
 - BLEVE failure of D-0202
 - Spontaneous failure of D-0201
 - BLEVE failure of D-0201
 - Spontaneous failure of T-0201
 - BLEVE failure of T-0201
- Small and medium releases from pipework / valves. The fluids considered are
 - Unstable condensate releases without H₂S
 - Unstable condensate release with H₂S

The location of the stabilisation area is shown in Figure 9.



Figure 9 Locations for scenarios groups C-03, C-04

B.4 Amine area (C-05, C-06)

The release scenarios are considered in two general groupings.

- Large item failures. The items selected are:
 - Spontaneous failure of D-0301
 - Spontaneous failure of D-0302
- Small and medium releases from pipework / valves. The fluids considered are
 - Gas release with H₂S

The location of this area is shown in Figure 10.

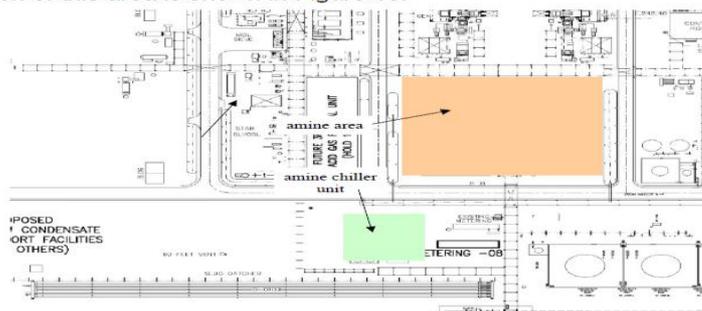


Figure 10 Amine area (scenarios C-05, C-06) and Amine Chiller Unit (scenarios C-07, C-08)

Advantica Report Number: T224
 BG Tunisia Document: BG-TUN-PROJ-SPG-08-HSE-00021
 Issue: 1

ADVANTICA
 A Germanischer Lloyd Company

B.5 AMINE CHILLER UNIT (C-07, C-08)

This area includes the propane storage tank and the circulation pipework.
 The release scenarios are considered in two general groupings.

- Large item failures. These are
 - Spontaneous failure of the propane storage tank
 - BLEVE failure of the propane storage tank
- Small and medium releases from pipework / valves. The fluids considered are
 - Propane.

The location of the chiller unit is shown in Figure 10.

Advantica Report Number: T224
 BG Tunisia Document: BG-TUN-PROJ-SPG-08-HSE-00021
 Issue: 1

ADVANTICA
 A Germanischer Lloyd Company

B.6 Sulphur Recovery Unit (C-09, C-10)

This area includes the current SRU unit and by-pass line to the incinerator. Note that as of early 2008, the SRU has been de-commissioned and as such there will be no risk from this area. The results for the SRU unit are included as the unit was not fully decommissioned at the time of the start of the study.

The release scenarios are considered in two general groupings.

- Large item failures. The items selected are:
 - Spontaneous failure of D-0401
- Small and medium releases from pipework / valves. The fluids considered are
 - Acid gas

The location of this area is shown in Figure 11.

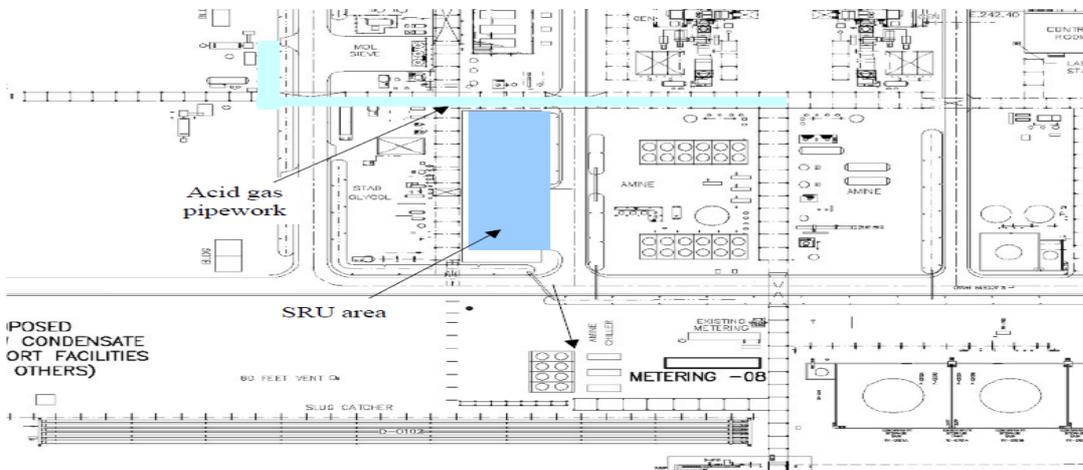


Figure 11 SRU unit and acid gas pipework (current)

B.7 Glycol DeHydration area (C-11, C-12)

The release scenarios are considered in two general groupings. Note that the vessels and pipework in this area contain no flammable mixtures (e.g. water & TEG) and hence are not considered. This area includes the new filter coalescer F-0501B and its associated pipework

- Large item failures. The items selected area
 - Spontaneous failure of D-0501
 - Spontaneous failure of D-0503
- Small and medium releases from pipework / valves. The fluids considered are
 - Natural gas.

The location of this area is shown below.



Figure 12 Location of glycol de-hydration area

B.8 Molecular Sieve Area (C-13, C-14)

The release scenarios are considered in two general groupings. This area includes the new filter coalescer F-0601B and its associated pipework

- Large item failures. The items selected are:
 - Spontaneous failure of D-0602
 - Spontaneous failure of D-0601 A/B/C
 - Spontaneous failure of D-0603
- Small and medium releases from pipework / valves. The fluids considered are
 - Natural gas

The location of this area is shown below.



Figure 13 Location of Molecular sieve area

B.11 Sales Gas Export (C-19, C-20)

This area includes the sales gas compressors, the metering area and the gas export line.

The release scenarios are considered in two general groupings.

- Large item failures. The items selected are:
 - Failure of the above ground section of the gas export pipeline from the compressor region metering region ending at the ESD valve.
 - Failure of the above ground section of the gas export pipeline, the short section of above ground pipeline after the ESD valve.
- Small and medium releases from pipework / valves. The fluids considered are
 - Natural gas from the sales gas compressor area.
 - Natural gas from the metering area

The locations of these areas are shown below.

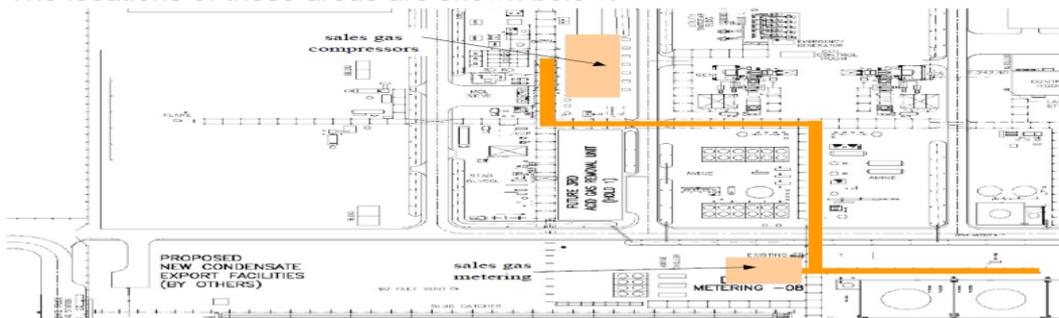


Figure 15 Sales gas compressor and metering areas

B.12 Condensate Storage area (C-21, C-22)

The release scenarios are considered in two general groupings.

- Large item failures. These are
 - Catastrophic failure of the one of the storage tanks, with the release overtopping the tank bund.
 - Rupture of the condensate line from the condensate stabilisation area to the storage tanks
- Small and medium releases from pipework / valves. The fluids considered are
 - Leaks from the tank area including punctures in the tanks all retained within the tank bund area.

The location of these areas is shown below.



Figure 16 Location of condensate pipeline from stabilisation area and condensate storage tanks

Advantica Report Number: T224
 BG Tunisia Document: BG-TUN-PROJ-SPG-08-HSE-00021
 Issue: 1

ADVANTICA
 A Germanischer Lloyd Company

B.13 CONDENSATE Pipeline (C-25, C-26)

This includes line from the Hasdrubal condensate storage tank area and the condensate export pipeline.

The release scenarios are considered in two general groupings.

- Large item failures. These are
 - Rupture of the above ground condensate export line
- Small and medium releases from pipework.

Advantica Report Number: T224
 BG Tunisia Document: BG-TUN-PROJ-SPG-08-HSE-00021
 Issue: 1

ADVANTICA
 A Germanischer Lloyd Company

B.15 Explosions (C29)

On the Hannibal and Hasdrubal sites several areas were identified as having enough congestion or confinement that a damaging level of overpressure could occur if a flammable gas cloud were ignited when engulfing all or part of the region.

The identified regions of Hannibal are:

- The congested area centred on the Amine Processing area
- The congested area centred on the Glycol/Gas stabilisation area
- The two confined enclosures for the gas turbines
- The congested area centred on the NRU

The identified regions for Hasdrubal are:

- The congested area centred on the Condensate stabilisation area.
- The congested area centred on the Gas sweetening area
- The congested area including the gas conditioning and LPG handling areas
- The confined regions surrounding the export compressor
- The confined region surrounding the feed gas compressor

For each release scenario the software tracks the location of the flammable cloud. It records any clouds that overlay the identified explosion regions when delayed ignition occurs. The resulting explosion frequencies are given in Table 63.

Note that:

- These are the frequencies of ignitions of flammable regions including all cloud that fill more than 1% of the identified region and hence not all lead to large explosions.
- Only values greater than 1×10^{-9} per year are included in the table.

Advantica Report Number: T224
 BG Tunisia Document: BG-TUN-PROJ-SPG-08-HSE-00021
 Issue: 1



B.16 STABILISATION AREA 2 (C-30, C-40)

This second area includes the gas import line, the pig trap and the slugcatcher. It will replace the original stabilisation area. The process of commissioning this area and decommissioning the old stabilisation area was underway at the time of the study hence, conservatively, risks from both areas are included.

The release scenarios are considered in two general groupings.

- Large item failures. These items selected are:
 - Spontaneous failure of D-0208
 - BLEVE failure of D-0208
 - Spontaneous failure of D-0207
 - BLEVE failure of D-0207
 - Spontaneous failure of T-0202
 - BLEVE failure of T-0202
- Small and medium releases from pipework / valves. The fluids considered are
 - Unstable condensate releases without H₂S
 - Unstable condensate release with H₂S

The location of the stabilisation area is shown in Figure 9.

Advantica Report Number: T224
 BG Tunisia Document: BG-TUN-PROJ-SPG-08-HSE-00021
 Issue: 1

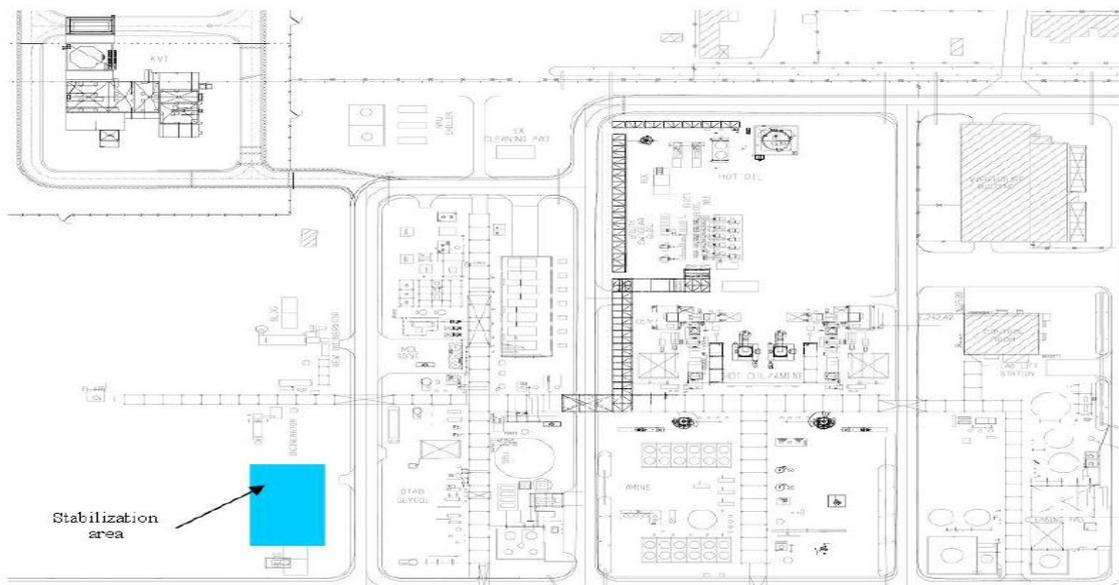


Figure 17 Locations for scenarios groups C-30, C-40

B.17 ACID GAS Feed (S-01, S-02)

This considers the acid gas line from the Amine area to the new sour gas project facilities.

The release scenarios are considered in two general groupings.

- Large item failures.
 - Failure of the transfer pipeline from the Amine Unit to the sour gas project facilities.
- Small and medium releases from pipework / valves
 - Small / medium leaks from the area where the Acid gas line enters the sour gas facilities.

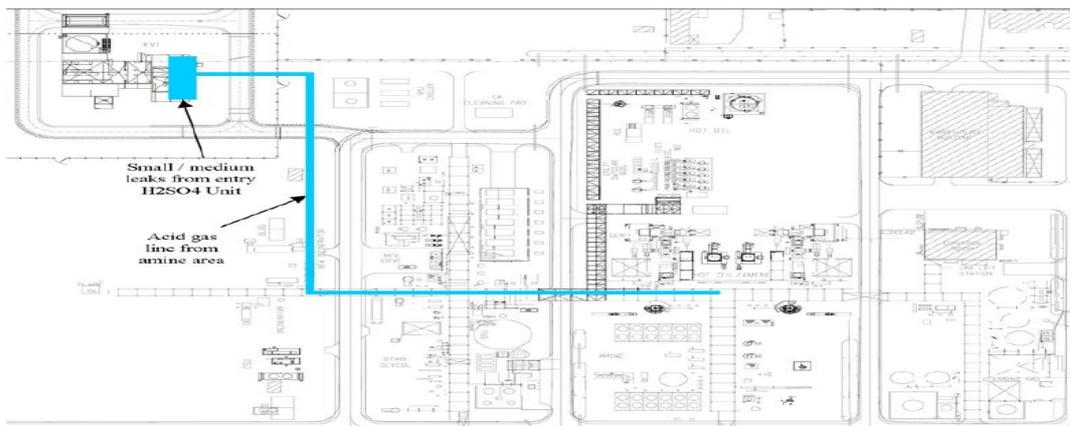


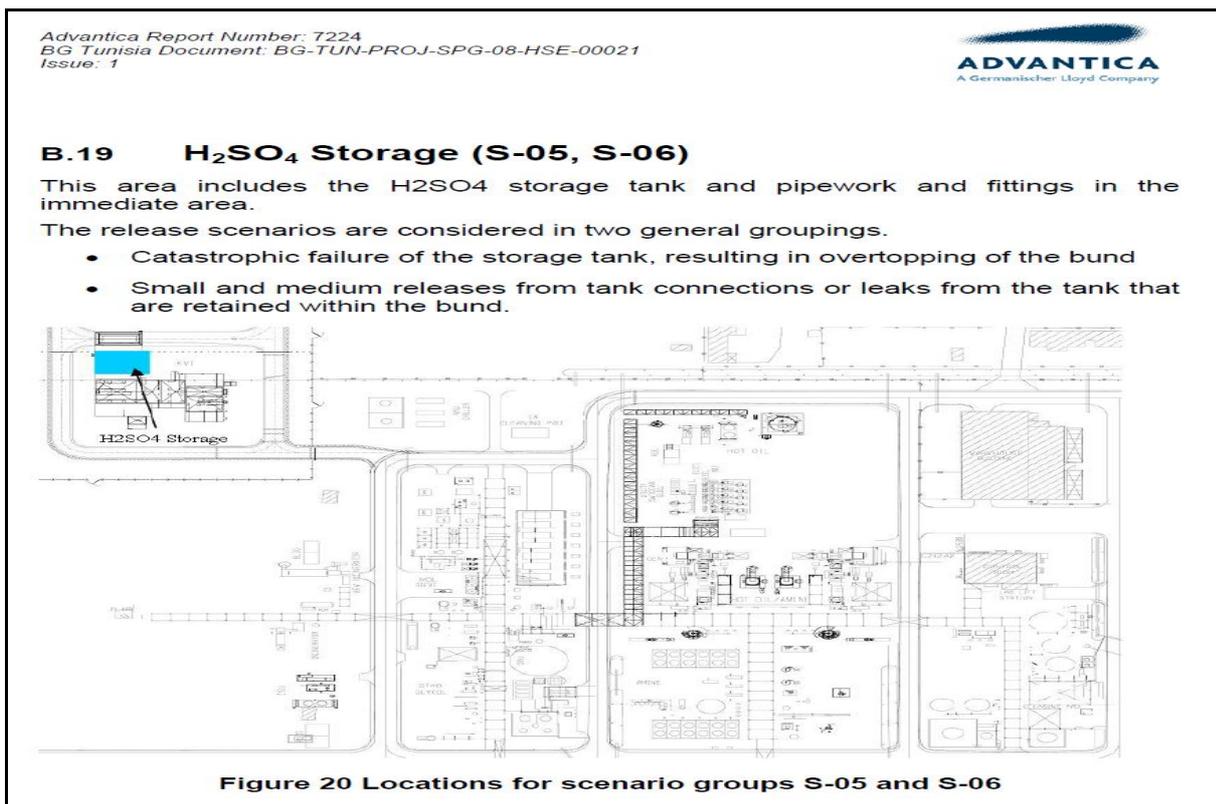
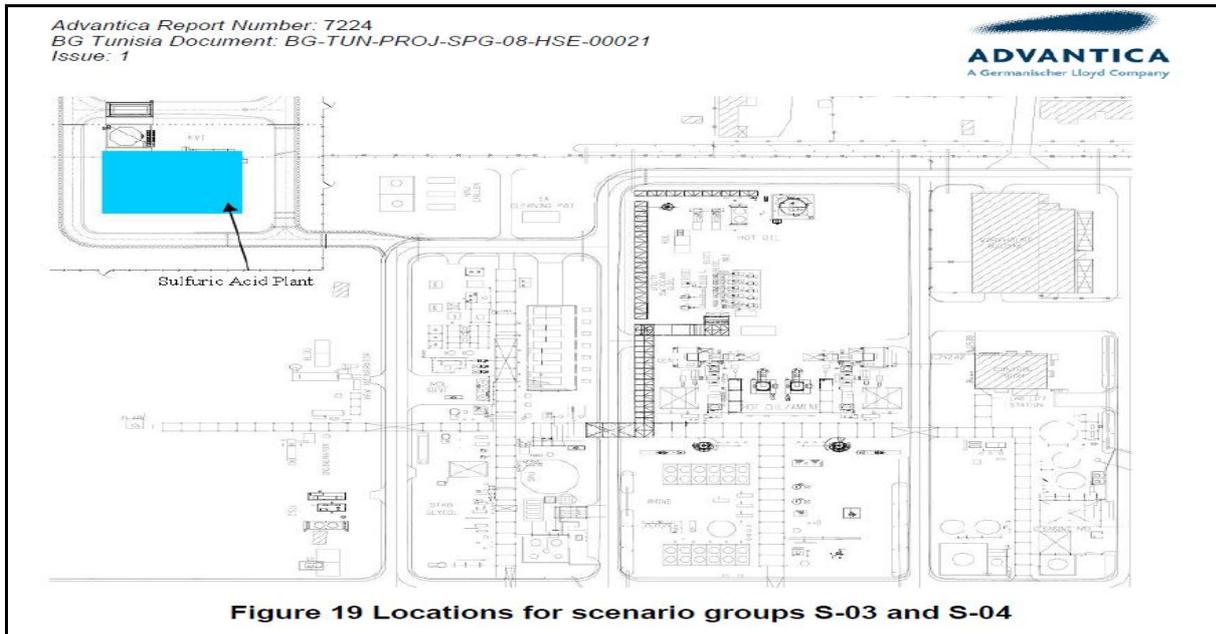
Figure 18 Locations for scenarios groups S-01 and S-02

B.18 Sour Gas Facilities (S-03, S-04)

The release scenarios from the sour gas facilities unit are considered in two general groupings.

- Large item failures. These are
 - Catastrophic failure of reactor Unit
 - Catastrophic failure of a Concentration Column (2 units)
- Small and medium releases from pipework / valves. The fluids considered are
 - Gas line from the reactor vessel to the concentration columns (~67% CO₂, with SO₂ and H₂SO₄).
 - Liquid line from the concentration columns to the buffer tank (~85% H₂SO₄).

The pipework containing SO₂ within the sour gas facilities will only represent a small section of the overall plant. As the consequences of an SO₂ release will in general be no worse than the equivalent release of the H₂S, this small section of the plant has not been modelled separately. However, to ensure that risks have not been underestimated, the overall release frequency used is representative of the total length of pipework within the sour gas facility.



Advantica Report Number: T224
BG Tunisia Document: BG-TUN-PROJ-SPG-08-HSE-00021
Issue: 1

ADVANTICA
A Germanischer Lloyd Company

B.20 Truck Export (H_2SO_4) (S-07, S-08)

This includes loading line from the H_2SO_4 tank, and the truck whilst in the loading bay.

The release scenarios are considered in two general groupings.

- Large item failures. These are
 - Failure of the Truck tanker leading to full loss of contents, liquid not retained within the truck loading bay bund.
 - Rupture of the line from the storage tank to the truck during loading.
- Small and medium releases from pipework / valves/ hose.

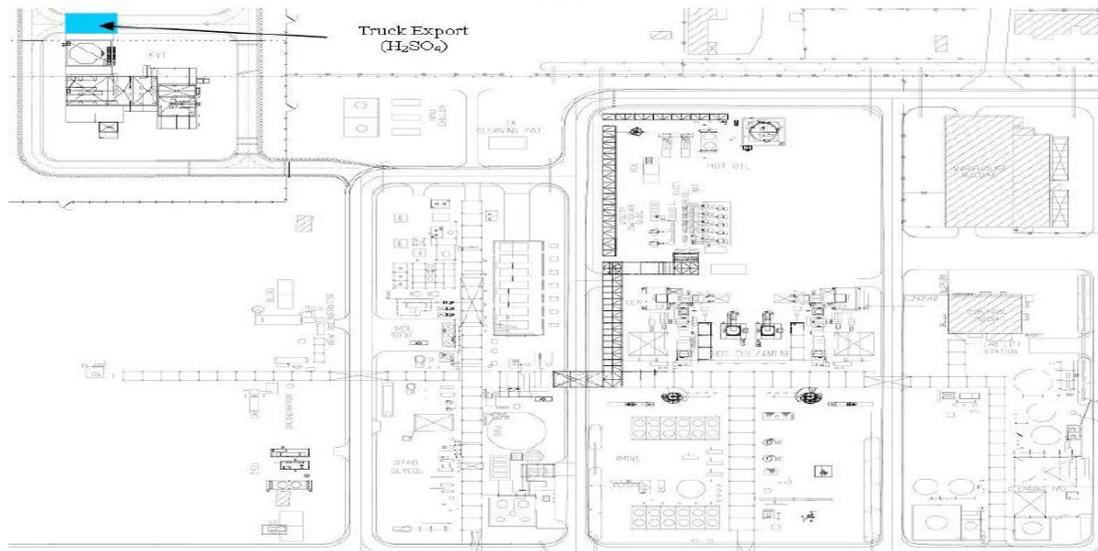


Figure 21 Locations for scenario groups S-07 and S-08

Annexes 3

Abréviation des risques explosions

β_{11}	A1
β_{12}	A2
β_{13}	A3
δ^-_{X1}	E1
X_1	X1
β_{21}	B1
β_{22}	B2
δ^+_{X2}	E2
X_2	X2
β_{31}	C1
β_{32}	C2
β_{31*}	R1
β_{32*}	R2
δ^-_{X3}	E3
δ^+_{X3}	H3
X_3	X3
β_{41}	D1
β_{42}	D2
β_{43}	D3
β_{44}	D4
δ^-_{X4}	E4
X_4	X4

Abréviation des risques Incendie

β_{11}	A1
β_{12}	A2
β_{13}	A3
β_{14}	A4
δ^-_{Y1}	E1
Y_1	Y1
β_{21}	B1
β_{22}	B2
β_{23}	B3
β_{24}	B4
δ^-_{Y2}	E2
Y_2	Y1
β_{31}	C1
β_{32}	C2
β_{31^*}	R1
β_{32^*}	R2
δ^-_{Y3}	E3
δ^+_{Y3}	H3
Y_3	Y3
β_{41}	D1
β_{42}	D2
δ^+_{Y4}	E4
Y_4	Y4

Abréviation des risques Fatigue respiratoire

β_{11}	A1
β_{12}	A2
β_{13}	A3
β_{14}	A4
δ^-_{Wc1}	E1
W_1	W1
β_{21}	B1
β_{22}	B2
δ^-_{W2}	E2
W_2	W2
β_{31}	C1
β_{32}	C2
δ^-_{W3}	E3
W_3	W3
β_{41}	D1
β_{42}	D2
β_{43}	D3
δ^-_{W4}	E4
W_4	W4

Abréviation des risques Atteinte cellulaire irréversible

β_{11}	A1
β_{12}	A2
δ^+_{z1}	E1
Z_1	Z1
β_{21}	B1
β_{22}	B2
β_{23}	B3
β_{24}	B4
δ^-_{z2}	E2
Z_2	Z2
β_{31}	C1
β_{32}	C2
β_{33}	C3
β_{31^*}	R1
β_{32^*}	R2
β_{33^*}	R3
δ^-_{z3}	E3
δ^+_{z3}	H3
Z_3	Z3
β_{41}	D1
β_{42}	D2
β_{43}	D3
β_{44}	D4
δ^-_{z4}	E4
Z_4	Z4

Abréviation des risques Arrêt cardiaque

β_{11}	A1
β_{12}	A2
β_{13}	A3
β_{14}	A4
δ^-_{V1}	E1
V_1	V1
β_{21}	B1
β_{22}	B2
β_{23}	B3
β_{24}	B4
δ^+_{V2}	E2
V_2	V2
β_{31}	C1
β_{32}	C2
δ^-_{V3}	E3
V_3	V3
β_{41}	D1
β_{42}	D2
β_{43}	D3
δ^-_{V4}	E4
V_4	V4

```

!*****
! Objective function: Minimization Explosion Risk
!*****;
MAX = A1+1.33*A2-0.33*A2*E1+B1-0.06*E2*B1+C1+R1+D1+0.75*D2+0.40*D3;

!*****
! Anteriority constraints
!*****;

A2+4*A3-E1<=0;
E1-A1-4*A2-48*A3<=0;
A1+A2+A3 =1;
X1<=48;
B1+15*B2-E2<=0;
E2-15*B1-30*B2<=0;
B1+B2=1;
X2<=10;
68*R2-H3<=0;
H3-68*R1-80*R2<=0;
68*C2-E3<=0;
E3-68*C1-80*C2<=0;
C1+C2+R1+R2=1;
X3<=68;
550*D2+650*D3+750*D4-E4<=0;
E4-550*D1-650*D2-750*D3-850*D4<=0;
D1+D2+D3+D4=1;
X4<=850;
E1<=48;
E1>=0;
E2>=0;
E2<=30;
H3>=0;
E3>=0;
E3<=70;
H3<=70;
E4>=0;
E4<=850;
!*****
! Data constraints (General variables)
!*****;
@GIN(A1);           @GIN(C2);           @GIN(X1);
@GIN(A2);           @GIN(R1);           @GIN(X2);
@GIN(A3);           @GIN(R2);           @GIN(X3);
@GIN(B1);           @GIN(D1);           @GIN(X4);
@GIN(B2);           @GIN(D2);           end
@GIN(C1);           @GIN(D3);
@GIN(D4);

```

Le rapport de résolution généré par LINGO10.0 est le suivant :

Local optimal solution found.

Objective value: 3.940000
 Extended solver steps: 3
 Total solver iterations: 54

Variable	Value	Reduced Cost
A1	1.000000	0.000000
A2	0.000000	-0.3300000
E1	0.5000000	0.000000
B1	1.000000	0.000000
E2	1.000000	0.000000
C1	0.000000	-1.000000
R1	1.000000	-1.000000
D1	1.000000	0.000000
D2	0.000000	0.2500000
D3	0.000000	0.6000000
A3	0.000000	1.000000
X1	48.00000	0.000000
B2	0.000000	1.780000
X2	10.00000	0.000000
R2	0.000000	0.000000
H3	0.000000	0.000000
C2	0.000000	0.000000
E3	0.000000	0.000000
X3	68.00000	0.000000
D4	0.000000	1.000000
E4	0.000000	0.000000
X4	850.0000	0.000000

Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	3.940000	1.000000
2	0.5000000	0.000000
3	0.5000000	0.000000
4	0.000000	1.000000
5	0.000000	0.000000
6	0.000000	0.6000000E-01
7	14.00000	0.000000
8	0.000000	0.8800000
9	0.000000	0.000000
10	0.000000	0.000000
11	68.00000	0.000000
12	0.000000	0.000000
13	0.000000	0.000000
14	0.000000	0.000000
15	0.000000	0.000000
16	0.000000	0.000000
17	550.0000	0.000000
18	0.000000	1.000000
19	0.000000	0.000000
20	47.50000	0.000000
21	0.5000000	-0.3300000E-06


```

@GIN(C2);           @GIN(D2);           @GIN(Y4);
@GIN(R1);           @GIN(Y1);           end
@GIN(R2);           @GIN(Y2);
@GIN(D1);           @GIN(Y3);

```

Le rapport de résolution généré par LINGO10.0 est le suivant :

```

Global optimal solution found.
Objective value:                4.000000
Extended solver steps:          3
Total solver iterations:        56

```

Variable	Value	Reduced Cost
A1	1.000000	-1.000000
A2	0.000000	-0.7000000
A3	0.000000	-0.3000000
B1	1.000000	-1.000000
B2	0.000000	-0.8000000
B3	0.000000	-0.2500000
C1	0.000000	-1.000000
R1	1.000000	-1.000000
D1	1.000000	-1.000000
A4	0.000000	0.000000
E1	0.000000	0.000000
Y1	75.00000	0.000000
B4	0.000000	0.000000
E2	0.000000	0.000000
Y2	4.000000	0.000000
C2	0.000000	0.000000
E3	0.000000	0.000000
R2	0.000000	0.000000
H3	0.000000	0.000000
Y3	11.00000	0.000000
D2	0.000000	0.000000
E4	0.000000	0.000000
Y4	39.00000	0.000000

Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	4.000000	1.000000
2	0.000000	0.000000
3	1.000000	0.000000
4	0.000000	0.000000
5	0.000000	0.000000
6	0.000000	0.000000
7	1.000000	0.000000
8	0.000000	0.000000
9	0.000000	0.000000
10	0.000000	0.000000
11	0.000000	0.000000
12	0.000000	0.000000
13	11.00000	0.000000
14	0.000000	0.000000

15	0.000000	0.000000
16	0.000000	0.000000
17	39.00000	0.000000
18	0.000000	0.000000
19	0.000000	0.000000
20	75.00000	0.000000
21	0.000000	0.000000
22	0.000000	0.000000
23	4.000000	0.000000
24	0.000000	0.000000
25	0.000000	0.000000
26	12.30000	0.000000
27	12.30000	0.000000
28	0.000000	0.000000
29	0.5900000	0.000000

!*****

! Objective function: Minimization Respiratory fatigue Risk

!*****;

MAX = A1+1.33*A2-0.0000033*A2*E1+B1+C1-1-E3*C1+D1+0.50*D2;

!*****

! Anteriority constraints

!*****;

100000*A2+400000*A3-E1<=0;

E1-100000*A1-400000*A2-600000*A3<=0;

A1+A2+A3 =1;

W1<=600000;

800*B2-E2<=0;

E2-800*B1-2000*B2<=0;

B1+B2=1;

W2<=2000;

C1+C2-E3<=0;

E3-C1-2*C2<=0;

C1+C2=1;

W3<=2;

D2+D3-E4<=0;

E4-D1-1.5*D2-2*D3<=0;

D1+D2+D3=1;

W4<=2;

E1<=600000;

E1>=0;

E2>=0;

E2<=2000;

E3>=0;

E3<=2;

E4>=0;

E4<=2;

```

!*****
! Data constraints (General variables)
!*****;
@GIN(A1);          @GIN(C1);          @GIN(W2);
@GIN(A2);          @GIN(C2);          @GIN(W3);
@GIN(A3);          @GIN(D1);          @GIN(W4);
@GIN(B1);          @GIN(D2);          end
@GIN(B2);          @GIN(D3);
@GIN(W1);

```

Le rapport de résolution généré par LINGO10.0 est le suivant :

Local optimal solution found.

Objective value:		4.000000	
Extended solver steps:		3	
Total solver iterations:		55	
	Variable	Value	Reduced Cost
	A1	1.000000	0.000000
	A2	0.000000	-0.1650000
	E1	50000.00	0.000000
	B1	1.000000	0.000000
	C1	1.000000	0.000000
	E3	1.000000	0.000000
	D1	1.000000	0.000000
	D2	0.000000	0.5000000
	A3	0.000000	1.000000
	W1	600000.0	0.000000
	B2	0.000000	1.000000
	E2	0.000000	0.000000
	W2	2000.000	0.000000
	C2	0.000000	0.000000
	W3	2.000000	0.000000
	D3	0.000000	1.000000
	E4	0.000000	0.000000
	W4	2.000000	0.000000
	Row	Slack or Surplus	Dual Price
	1	2.000000	1.000000
	2	50000.00	0.000000
	3	50000.00	0.000000
	4	0.000000	1.000000
	5	0.000000	0.000000
	6	0.000000	0.000000
	7	800.0000	0.000000
	8	0.000000	1.000000
	9	0.000000	0.000000
	10	0.000000	1.000000
	11	0.000000	0.000000
	12	0.000000	-1.000000

13	0.000000	0.000000
14	0.000000	0.000000
15	1.000000	0.000000
16	0.000000	1.000000
17	0.000000	0.000000
18	550000.0	0.000000
19	50000.00	0.000000
20	0.000000	0.000000
21	2000.000	0.000000
22	1.000000	0.000000
23	1.000000	0.000000
24	0.000000	0.000000
25	2.000000	0.000000

!*****

! Objective function: Minimization reached irreversible cell Risk

!*****;

MAX = A1+A2+0.50*B2+C1+4*C2-0.2*C2*E3+R1+4*R2*0.2*R2*H3+D1+0.80*D2+0.25*D3;

!*****

! Anteriority constraints

!*****;

10*A2-E1<=0;
E1-10*A1-60*A2<=0;
A1+A2=1;
Z1<=10;
B2+2*B3-E2<=0;
E2-B1-2*B2-3*B3<=0;
B1+B2+B3+B4=1;
Z2<=3;
15*C2+20*C3-E3<=0;
E3-15*C1-20*C2-25*C3<=0;
15*R2+20*R3-H3<=0;
H3-15*R1-20*R2-25*R3<=0;
C1+C2+C3+R1+R2+R3=1;
Z3<=25;
50*D2+500*D3+1000*D4-E4<=0;
E4-50*D1-500*D2-1000*D3-1400*D4<=0;
D1+D2+D3+D4=1;
Z4<=1400;
E1<=60;
E1>=0;
E2>=0;
E2<=3;
H3>=0;
E3>=0;
E3<=25;
H3<=25;
E4>=0;

E4<=1400;

```

!*****
! Data constraints (General variables)
!*****;
@GIN(A1);           @GIN(C2);           @GIN(D4);
@GIN(A2);           @GIN(C3);           @GIN(Z1);
@GIN(B1);           @GIN(R1);           @GIN(Z2);
@GIN(B2);           @GIN(R2);           @GIN(Z3);
@GIN(B3);           @GIN(R3);           @GIN(Z4);
@GIN(B4);           @GIN(D1);           end
@GIN(C1);           @GIN(D2);
@GIN(D3);

```

Le rapport de résolution généré par LINGO10.0 est le suivant :

```

Local optimal solution found.
Objective value:                3.45000
Extended solver steps:          4
Total solver iterations:        64

```

Variable	Value	Reduced Cost
A1	1.000000	0.000000
A2	0.000000	0.000000
B2	1.000000	0.000000
C1	0.000000	0.000000
C2	0.000000	4.083333
E3	0.000000	0.000000
R1	0.000000	35.00000
R2	1.000000	0.000000
H3	20.00000	0.000000
D1	1.000000	0.000000
D2	0.000000	0.200000
D3	0.000000	0.750000
E1	10.00000	0.000000
Z1	10.00000	0.000000
B3	0.000000	0.500000
E2	1.000000	0.000000
B1	0.000000	0.500000
B4	0.000000	0.500000
Z2	3.000000	0.000000
C3	0.000000	0.000000
R3	0.000000	28.00000
Z3	25.00000	0.000000
D4	0.000000	1.000000
E4	50.00000	0.000000
Z4	1350.000	0.000000

Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	18.50000	1.000000

2	10.00000	0.000000
3	0.000000	0.000000
4	0.000000	1.000000
5	0.000000	0.000000
6	0.000000	0.000000
7	1.000000	0.000000
8	0.000000	0.500000
9	0.000000	0.000000
10	0.000000	1.516667
11	0.000000	3.133333
12	5.000000	0.000000
13	0.000000	0.800000
14	0.000000	48.00000
15	0.000000	0.000000
16	50.00000	0.000000
17	0.000000	0.000000
18	0.000000	1.000000
19	0.000000	0.000000
20	50.00000	0.000000
21	10.00000	0.000000
22	1.000000	0.000000
23	2.000000	0.000000
24	20.00000	0.000000
25	0.000000	-1.616667
26	25.00000	0.000000
27	5.000000	0.000000
28	50.00000	0.000000
29	1350.000	0.000000

!*****

! Objective function: Minimization cardiac stoppage Risk

!*****;

MAX=A1+0.66*A2+0.33*A3+B1+9*B2-0.02*B2*E2+C1+0.70*C2+0.5*C3+D1+9*D2
0.02*D2*E4;

!*****

! Anteriority constraints

!*****;

A2+2*A3+3*A4-E1<=0;

E1-A1-2*A2-3*A3-4*A4<=0;

A1+A2+A3+A4 =1;

V1<=4;

350*B2+450*B3-E2<=0;

E2-350*B1-450*B2-550*B3<=0;

B1+B2+B3=1;

V2<=350;

```

C2+2*C3+3*C4-E3<=0;
E3-C1-2*C2-3*C3-4*C4<=0;
C1+C2+C3+C4=1;
V3<=4;
5000*D2+8000*D3-E4<=0;
E4-5000*D1-8000*D2-110000*D3<=0;
D1+D2+D3=1;
V4<=11000;
E1<=4;
E1>=0;
E2>=0;
E2<=550;
E3>=0;
E3<=4;
E4>=0;
E4<=11000;

```

```

!*****
! Data constraints (General variables)
!*****;
@GIN(A1);          @GIN(B3);          @GIN(D4);
@GIN(A2);          @GIN(C1);          @GIN(V1);
@GIN(A3);          @GIN(C2);          @GIN(V2);
@GIN(A3);          @GIN(C3);          @GIN(V3);
@GIN(A4);          @GIN(C4);          @GIN(V4);
@GIN(B1);          @GIN(D1);          end
@GIN(B2);          @GIN(D2);
@GIN(D3);

```

Le rapport de résolution généré par LINGO10.0 est le suivant :

Local optimal solution found.

Objective value: 4.000000

Extended solver steps: 8

Total solver iterations: 673

Variable	Value	Reduced Cost
A1	1.000000	0.000000
A2	0.000000	0.3400000
A3	0.000000	0.6700000
B1	0.000000	-5.999986
B2	1.000000	0.000000
E2	350.0000	0.000000
C1	1.000000	0.000000
C2	0.000000	0.3000000
C3	0.000000	0.5000000
D1	1.000000	0.000000
D2	0.000000	-7.9999800
E4	0.000000	0.000000
A4	0.000000	1.000000
E1	1.000000	0.000000
V1	4.000000	0.000000
B3	0.000000	4.000005
V2	350.0000	0.000000
C4	0.000000	1.000000
E3	1.000000	0.000000
V3	4.000000	0.000000
D3	0.000000	1.000160
V4	11000.00	0.000000
D4	0.000000	0.000000

Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	5.000000	1.000000
2	1.000000	0.000000
3	0.000000	0.000000
4	0.000000	1.000000
5	0.000000	0.000000
6	0.000000	0.1999998E-01
7	100.0000	0.000000
8	0.000000	-4.999986
9	0.000000	0.000000
10	1.000000	0.000000
11	0.000000	0.000000
12	0.000000	1.000000
13	0.000000	0.000000
14	0.000000	0.000000
15	5000.000	0.000000
16	0.000000	1.000000
17	0.000000	0.000000
18	3.000000	0.000000
19	1.000000	0.000000
20	350.0000	0.000000
21	200.0000	0.000000
22	1.000000	0.000000
23	3.000000	0.000000
24	0.000000	0.000000
25	11000.00	0.000000

Annexes 4

```

Microsoft Visual C++ - [SuivieRisque.cpp]
File Edit View Insert Project Build Tools Window Help

/*****
 *                               Programme d'exécution de suivi des risques                               */
/*****
 *                               Dorra AYADI                                                                */
/*****

#include<stdio.h>
void main()
{
    int x[4],y[4], w[4], z[4], v[4];
    int i;

    puts("\n");
    puts("\t/*****^n");
    puts("\t/*                               *^n");
    puts("\t/*                               Programme d'exécution de suivi des risques                               *^n");
    puts("\t/*                               Dorra AYADI                                                                *^n");
    puts("\t/*                               *^n");
    puts("\t/*****^n");

    //Remplissage du tableau x
    for(i=0;i<4;i++)
    {
        printf("x[%d]= ",i+1);
        scanf("%d",&x[i]);
    }
    //Verifier R1
    if(x[0]>=48 && x[1] <=10 && x[2]<=68 && x[3]>=850)
    {
        printf("R1 est verifiée\n");
        //Remplissage du tableau y
        for(i=0;i<4;i++)
        {
            printf("y[%d]= ",i+1);
            scanf("%d",&y[i]);
        }
        //Verifier R2
        if(y[0]>=75 && y[1]>=4 && y[2]<=11 && y[3]<=39)

```

```
{
    printf("R2 est verifiee\n");
    //Remplissage du tableau w
    for(i=0;i<4;i++)
    {
        printf("w[%d]= ",i+1);
        scanf("%d",&w[i]);
    }
    if(w[0]>=600000 && w[1]>=200 && w[2]>=2 && w[3]>=2)
    {
        printf("R3 est verifiee\n");
        //Remplissage du tableau z
        for(i=0;i<4;i++)
        {
            printf("z[%d]= ",i+1);
            scanf("%d",&z[i]);
        }
        //Vérification du R4
        if(z[0]<=10 && z[1]>=3 && z[2]>=25 && z[3]>=1350)
        {
            printf("R4 est verifiee \n");
            //Remplissage du tableau v
            for(i=0;i<4;i++)
            {
                printf("v[%d]= ",i+1);
                scanf("%d",&v[i]);
            }
            //Vérification du R5
            if(v[0]>=4 && v[1]<=350 && v[2]>=4 && v[3]>=1100)
                printf("R5 est verifiee\n");
            else
                printf("R5 n'est pas verifiee\n");
        }
        else
            printf("R4 n'est pas verifiee\n");
    }
    else
        printf("R3 n'est pas verifiee\n");
}
else
    printf("R2 n'est pas verifiee\n");
}
else
    printf("R1 n'est pas verifiee\n");
}
```

Annexes 4-1

```
C:\Users\lotfi azzabi\Desktop\traitement de thèse\copie 2007\Suivie risque\Debug\SuivieRisque.exe

/*****/

/*                                          */
/*      Programme d'execution de suivi des risques      */
/*                                          */
/*      Dorra AYADI                                          */
/*                                          */
/*****/

x[1]= 50
x[2]= 10
x[3]= 68
x[4]= 900
R1 est verifiee
y[1]=
```

Annexes 4-2

```
C:\Users\lotfi azzabi\Desktop\traitement de thèse\copie 2007\Suivie risque\Debug\SuivieRisque.exe

/*****/

/*                                          */
/*      Programme d'execution de suivi des risques      */
/*                                          */
/*      Dorra AYADI                                          */
/*                                          */
/*****/

x[1]= 50
x[2]= 10
x[3]= 68
x[4]= 900
R1 est verifiee
y[1]= 80
y[2]= 4
y[3]= 10
y[4]= 39
R2 est verifiee
w[1]= _
```

Annexes 4-3

```
C:\Users\lotfi azzabi\Desktop\traitement de thèse\copie 2007\Suivie risque\Debug\SuivieRisque.exe

/*****
/*
/*      Programme d'execution de suivi des risques
/*
/*      Dorra AYADI
/*
*****/

x[1]= 50
x[2]= 10
x[3]= 68
x[4]= 900
R1 est verifiee
y[1]= 80
y[2]= 4
y[3]= 10
y[4]= 39
R2 est verifiee
w[1]= 600000
w[2]= 400
w[3]= 2
w[4]= 5
R3 est verifiee
z[1]= -
```

Annexes 4-4

```
C:\Users\lotfi azzabi\Desktop\traitement de thèse\copie 2007\Suivie risque\Debug\SuivieRisque.exe

/*****
/*
/*      Programme d'execution de suivi des risques
/*
/*      Dorra AYADI
/*
*****/

x[1]= 50
x[2]= 10
x[3]= 68
x[4]= 900
R1 est verifiee
y[1]= 80
y[2]= 4
y[3]= 10
y[4]= 39
R2 est verifiee
w[1]= 600000
w[2]= 400
w[3]= 2
w[4]= 5
R3 est verifiee
z[1]= 9
z[2]= 3
z[3]= 27
z[4]= 1400
R4 est verifiee
v[1]=
```

Annexes 4-5

```

C:\Users\lotfi azzabi\Desktop\traitement de thPse\copie 2007\Suivie risque\Debug\SuivieRisque.exe

/*****/
/*                                          */
/*      Programme d'execution de suivi des risques      */
/*                                          */
/*      Dorra AYADI                                          */
/*                                          */
/*****/

x[1]= 50
x[2]= 10
x[3]= 68
x[4]= 900
R1 est verifiee
y[1]= 80
y[2]= 4
y[3]= 10
y[4]= 39
R2 est verifiee
w[1]= 600000
w[2]= 400
w[3]= 2
w[4]= 5
R3 est verifiee
z[1]= 9
z[2]= 3
z[3]= 27
z[4]= 1400
R4 est verifiee
v[1]= 5
v[2]= 200
v[3]= 5
v[4]= 1200_

```

Annexes 4-6

```

C:\Users\lotfi azzabi\Desktop\traitement de thPse\copie 2007\Suivie risque\Debug\SuivieRisque.exe

/*****/
/*                                          */
/*      Programme d'execution de suivi des risques      */
/*                                          */
/*      Dorra AYADI                                          */
/*                                          */
/*****/

x[1]= 40
x[2]= 12
x[3]= 68
x[4]= 850
R1 n'est pas verifiee
Press any key to continue_

```

Annexes 4-7

```
C:\ "C:\Users\lotfi azzabi\Desktop\traitement de thpse\copie 2007\Suivie risque\Debug\SuivieRisque.exe"

/*****/
/*                                          */
/*          Programme d'execution de suivi des risques          */
/*                          Dorra AYADI                          */
/*                                          */
/*****/
x[1]= 48
x[2]= 9
x[3]= 68
x[4]= 850
R1 est verifiee
y[1]= 70
y[2]= 3
y[3]= 11
y[4]= 39
R2 n'est pas verifiee
Press any key to continue_
```

Annexes 4-8

```
C:\ "C:\Users\lotfi azzabi\Desktop\traitement de thpse\copie 2007\Suivie risque\Debug\SuivieRisque.exe"

/*****/
/*                                          */
/*          Programme d'execution de suivi des risques          */
/*                          Dorra AYADI                          */
/*                                          */
/*****/
x[1]= 48
x[2]= 10
x[3]= 67
x[4]= 850
R1 est verifiee
y[1]= 75
y[2]= 5
y[3]= 11
y[4]= 33
R2 est verifiee
w[1]= 500000
w[2]= 300
w[3]= 2
w[4]= 2
R3 n'est pas verifiee
Press any key to continue
```

Annexes 4-9

```
C:\Users\lotfi azzabi\Desktop\traitement de thPse\copie 2007\Suivie risque\Debug\SuivieRisque.exe

/*****
/*
/*          Programme d'execution de suivi des risques          */
/*
/*          Dorra AYADI          */
/*
/*
*****/

x[1]= 50
x[2]= 9
x[3]= 64
x[4]= 850
R1 est verifiee
y[1]= 75
y[2]= 4
y[3]= 11
y[4]= 35
R2 est verifiee
w[1]= 600000
w[2]= 200
w[3]= 5
w[4]= 6
R3 est verifiee
z[1]= 9
z[2]= 2
z[3]= 25
z[4]= 1350
R4 n'est pas verifiee
Press any key to continue
```

Annexes 4-10

```
C:\Users\lotfi azzabi\Desktop\traitement de thPse\copie 2007\Suivie risque\Debug\SuivieRisque.exe

/*****
/*
/*          Programme d'execution de suivi des risques          */
/*
/*          Dorra AYADI          */
/*
/*
*****/

x[1]= 52
x[2]= 9
x[3]= 64
x[4]= 900
R1 est verifiee
y[1]= 77
y[2]= 6
y[3]= 9
y[4]= 33
R2 est verifiee
w[1]= 600000
w[2]= 300
w[3]= 3
w[4]= 4
R3 est verifiee
z[1]= 9
z[2]= 4
z[3]= 27
z[4]= 1400
R4 est verifiee
v[1]= 2
v[2]= 400
v[3]= 4
v[4]= 1100
R5 n'est pas verifiee
Press any key to continue
```