



**HAL**  
open science

# Méthodologie d'évaluation du niveau de risque d'un site industriel de type Seveso, basée sur la gravité des accidents majeurs et la vulnérabilité de l'environnement

Jérôme Tixier

## ► To cite this version:

Jérôme Tixier. Méthodologie d'évaluation du niveau de risque d'un site industriel de type Seveso, basée sur la gravité des accidents majeurs et la vulnérabilité de l'environnement. Ingénierie de l'environnement. Université Aix Marseille 1, 2002. Français. ⟨NNT : 2002AIX11060⟩. ⟨tel-02345859⟩

**HAL Id: tel-02345859**

**<https://hal.science/tel-02345859v1>**

Submitted on 4 Nov 2019

**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.



HAL Authorization

**UNIVERSITE D'AIX - MARSEILLE I**  
**UFR DE CHIMIE et ENVIRONNEMENT**

Année 2002

THESE

pour obtenir le grade de  
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE D'AIX-MARSEILLE 1  
DISCIPLINE : BIOSCIENCES de l'ENVIRONNEMENT, CHIMIE et SANTE

Présentée et soutenue publiquement par

**Jérôme TIXIER**

Le 5 décembre 2002

**Méthodologie d'évaluation du niveau de risque  
d'un site industriel de type Seveso, basée sur la  
gravité des accidents majeurs et la vulnérabilité  
de l'environnement**

Jury composé de :

C. MASSIANI	Professeur, Université de Provence I
A. LAURENT	Professeur, ENSIC Nancy
F. COLETTI	Professeur, Université de la Méditerranée
O. THOMAS	Professeur, Ecole des Mines d'Alès
G. DUSSERRE	Chargé de Recherche, Ecole des Mines d'Alès
J.F. RAFFOUX	Directeur Scientifique, INERIS

*Travaux réalisés au Laboratoire Génie de l'Environnement Industriel  
Ecole Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines d'Alès*

## TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION</b>	<b>12</b>
<b>CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE, LES METHODES D'ANALYSE ET D'EVALUATION DES RISQUES</b>	<b>15</b>
<b>I PRINCIPALES NOTIONS UTILISEES POUR L'EVALUATION D'UN NIVEAU DE RISQUE D'UNE INSTALLATION</b>	<b>16</b>
I.1 Le site industriel	17
I.2 L'environnement	18
<b>II GENERALITES SUR LES METHODES D'ANALYSE ET D'EVALUATION DES RISQUES</b>	<b>19</b>
II.1 La phase d'identification	20
II.2 La phase d'évaluation	20
II.3 La phase de hiérarchisation	21
II.4 Les combinaisons des phases	21
<b>III ETAT DE L'ART DES METHODES D'ANALYSE DE RISQUE</b>	<b>22</b>
III.1 Les types de méthodes	23
III.1.1 Les méthodes d'analyse déterministes	23
III.1.2 Les méthodes d'analyse probabilistes	24
III.1.3 Les méthodes d'analyse combinées	24
III.1.4 Le classement des méthodes d'analyse de risques	24
III.2 Les types de données d'entrée	26
III.3 Les types de résultats	28
III.4 Les liaisons entre les données d'entrée, les méthodes et les résultats	30
III.5 Les champs d'application des méthodes d'analyse de risques	32
III.6 Les limites des méthodes d'analyse de risques	34
III.7 Le développement des nouvelles approches des méthodes d'analyse de risques	35
III.7.1 La hiérarchisation des risques	35
III.7.2 Les méthodes de hiérarchisation	35
III.7.3 Les différents types d'échelles	37
<b>IV LES METHODES D'ANALYSE DE RISQUE BASEES SUR LES INDICES</b>	<b>38</b>
IV.1 La gravité et le flux	39
IV.1.1 Les méthodes multi – accidents	39
IV.1.1.1 Indice de danger d'accident - Indice AHI (Accident Hazard Index) [24] [25]	40

IV.1.1.2 Indice permettant d'établir le potentiel danger d'un accident en fonction des propriétés des substances dangereuses [48]	40
<b>IV.1.2 Les méthodes pour les accidents de type feux - explosions</b>	<b>41</b>
IV.1.2.1 Indice de sévérité pour les feux et les explosions - Indice Dow Fire and Explosion (FEI) [24] [28]	41
IV.1.2.2 Indice de sévérité des dommages pour les feux et les explosions - Indice FEDI (Fire and Explosion Damage Index) [24]	41
<b>IV.1.3 Les méthodes pour les accidents de type dispersion de gaz toxique</b>	<b>44</b>
IV.1.3.1 Indice de sévérité des dommages dans le cas de la dispersion d'un nuage toxique - Indice TDI (Toxic Damage Index) [24]	44
IV.1.3.2 Méthode d'évaluation d'un seuil de toxicité pour une durée d'exposition donnée [49]	45
IV.1.3.3 Proposition de seuils d'effet pour une libération de gaz toxique [50]	46
IV.1.3.4 Indice de sévérité pour une exposition à un gaz toxique - Indice Dow Chemical Exposure (CEI) [27]	46
<b>IV.1.4 Les méthodes tenant compte de l'emballage de réaction</b>	<b>47</b>
IV.1.4.1 Indice spécifique à l'emballage de réaction - Indice RRHI [26]	47
<b>IV.1.5 Les méthodes prenant en compte la quantité de substance dangereuse</b>	<b>49</b>
IV.1.5.1 Méthode définissant le concept de masse critique [51]	49
IV.1.5.2 L'échelle de gravité des accidents [52] [53]	49
<b>IV.2 Le Flux de propagation des accidents majeurs</b>	<b>49</b>
IV.2.1 Méthode permettant d'identifier et de quantifier la propagation des accidents majeurs dans l'environnement [54]	49
<b>IV.3 La prise en compte de l'environnement d'un site industriel</b>	<b>50</b>
IV.3.1 Indice de danger d'accident - Indice Accident Hazard AHI [24] [25]	50
IV.3.2 L'échelle de gravité des accidents [52] [53]	51
IV.3.3 Méthode définissant une échelle d'évaluation du potentiel danger [55]	51
IV.3.4 Méthode proposant une typologie d'impacts pour la définition d'un risque acceptable [56]	51
IV.3.5 Méthode définissant une typologie de cibles pour évaluer la vulnérabilité [57]	52
IV.3.6 Méthode permettant de prendre en compte la vulnérabilité d'un point de vue dynamique [58]	52
<b>IV.4 La construction des indices de risque</b>	<b>53</b>
IV.4.1 Indice de danger d'accident - Indice Accident Hazard AHI [24] [25]	53
IV.4.2 Indice de hiérarchisation des dangers - Indice Hazard Identification and Ranking HIRA [10] [25]	53
IV.4.3 Méthode de détermination et d'évaluation d'un risque potentiel [30]	53
IV.4.4 Méthode proposant une approche spatiale du niveau de risque [58]	54
IV.4.5 Méthode d'analyse de risque avec une prise en compte de l'efficacité du management [59]	54
IV.4.6 Méthode d'évaluation des risques liés aux process [60]	55
IV.4.7 Méthode d'évaluation des risques base sur le concept source –flux – récepteurs et barrières [54]	55

## **V SYNTHÈSE DES CONCEPTS SUR LES MÉTHODES D'ANALYSE DE RISQUE**

---

<b>V.1 La démarche générale et les grands principes</b>	<b>55</b>
<b>V.2 Données sur l'indice de gravité</b>	<b>58</b>
V.2.1 Les grands principes	58
V.2.2 Quantité	59
V.2.3 Le type de contenant	60
V.2.4 Indice incendie explosion	60
V.2.5 Indice de toxicité	61
V.2.6 Indice de pollution accidentelle	62
<b>V.3 Données sur l'indice de flux de propagation</b>	<b>62</b>
<b>V.4 Données sur l'indice de management</b>	<b>64</b>

V.5 Données sur l'indice de vulnérabilité	65
V.6 Les interactions entre les indices	66
V.7 Les résultats	67
<b>VI CONCLUSION</b>	<b>67</b>
<b>CHAPITRE 2 : METHODE D'EVALUATION D'UN NIVEAU DE RISQUE D'UN SITE INDUSTRIEL</b>	<b>69</b>
<b>I EVALUATION DU NIVEAU DE RISQUE PAR ACCIDENT MAJEUR</b>	<b>70</b>
I.1 Caractérisation du système	71
I.2 Approche générale de la méthodologie	72
<b>II L'INDICE DE GRAVITE G</b>	<b>73</b>
II.1 Généralités	73
II.2 Calcul de la gravité $G_{AMi}$	74
II.2.1 Les indices de dangerosité $I_{surp}$ , $I_{fb}$ , $I_{tox}$ et $I_{poll}$	74
II.2.1.1 L'indice de dangerosité pour un effet de flux thermique $I_{ft}$	75
II.2.1.2 L'indice de dangerosité pour un effet de surpression $I_{surp}$	78
II.2.1.3 L'indice de dangerosité pour un effet de toxicité due au gaz $I_{tox}$	80
II.2.1.4 L'indice de dangerosité pour un effet de toxicité due à un liquide $I_{poll}$	82
II.2.1.5 Synthèse sur les indices de dangerosité	86
II.2.2 Les facteurs d'aggravation $F_{contenant}$ et $F_{quantité}$	87
II.2.2.1 Facteur d'aggravation dû au type de contenant $F_{contenant}$	87
II.2.2.2 Facteur d'aggravation dû à la quantité de substance dangereuse impliquée dans l'accident majeur $F_{qté}$	88
II.2.3 Calcul de l'indice de gravité	90
<b>III L'INDICE DE FLUX DE PROPAGATION D'UN ACCIDENT MAJEUR F</b>	<b>92</b>
III.1 Le flux de propagation	92
III.2 Atténuation du flux et calcul de l'intensité du flux	92
III.2.1 La distance	92
III.2.2 Isotropie et anisotropie des phénomènes	97
<b>IV L'INDICE DE VULNERABILITE V</b>	<b>100</b>
IV.1 L'aide à la décision grâce à une approche analytique multicritères	100
IV.1.1 La prise de décision face à une situation complexe	100
IV.1.2 La méthode de hiérarchie multicritères SAATY [73]	102
IV.1.2.1 Les différents types de structuration hiérarchique	102
IV.1.2.2 Etablissement des priorités (calcul des vecteurs)	104
IV.2 Application de la méthode de hiérarchisation SAATY à la problématique de l'indice de vulnérabilité	108
IV.2.1 Définition de l'objectif	108
IV.2.2 Caractérisation des cibles	109
IV.2.2.1 Cibles Humaines (H)	109

IV.2.2.2 Cibles Environnementales (E)	110
IV.2.2.3 Cibles Matérielles (M)	111
<b>IV.2.3 Critères de caractérisation de la vulnérabilité</b>	<b>112</b>
<b>IV.2.4 Construction de la structure hiérarchique</b>	<b>113</b>
<b>IV.2.5 Etablissement de la formule de calcul de l'indice de vulnérabilité</b>	<b>117</b>
IV.2.5.1 Vulnérabilité humaine	117
IV.2.5.2 Vulnérabilité environnementale	119
IV.2.5.3 Vulnérabilité matérielle	121
<b>IV.2.6 Représentation matricielle et questionnaire associé pour la réalisation des appréciations</b>	<b>122</b>
<b>IV.2.7 Obtention des facteurs de pondération</b>	<b>123</b>
<b>V NIVEAU DE RISQUES PAR ACCIDENT MAJEUR ET NIVEAU DE RISQUE GLOBAL</b>	<b>124</b>
V.1 Niveau de risques par accident majeur	124
V.2 Niveau de risques global	124
<b>VI LES PRINCIPALES LIMITATIONS DE LA METHODE</b>	<b>125</b>
<b>CHAPITRE 3 : OUTIL CARTOGRAPHIQUE ET APPLICATION</b>	<b>127</b>
<b>I DEVELOPPEMENT DE L'OUTIL CARTOGRAPHIQUE</b>	<b>128</b>
I.1 Les principes du traitement cartographique	128
I.2 Les objectifs de l'outil cartographique	130
I.3 Les étapes clés de l'outil cartographique	131
I.3.1 Création de la grille d'étude	131
I.3.2 Récupération des données sur les couches d'informations	132
I.3.3 Moteur de calcul de la vulnérabilité	133
I.3.4 Représentation cartographique des résultats	133
I.4 Exemple de traitement cartographique	134
<b>II DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE</b>	<b>135</b>
II.1 Le site industriel	136
II.2 Environnement du site industriel	137
<b>III APPLICATION DE LA METHODE</b>	<b>140</b>
III.1 Les accidents majeurs retenus	141
III.1.1 Scénario n°1 : Perte totale et instantanée du confinement d'un des réservoirs d'ammoniac	141
III.1.1.1 Indice de gravité	142
III.1.1.2 Indice de flux	143
III.1.1.3 Potentiel danger	145
III.1.2 Scénario n°2 : rupture du piquage en pied de cuve d'un réservoir de stockage d'ammoniac	146
III.1.2.1 l'indice de gravité	147
III.1.2.2 l'indice de flux	147
III.1.2.3 le potentiel danger	148
III.1.3 Scénario n°3 : rupture guillotine de la ligne de soutirage gaz du stockage de propane	148
III.1.3.1 l'indice de gravité	149

III.1.3.2 l'indice de flux	149
III.1.3.3 le potentiel danger	150
<b>III.1.4 Synthèse des potentiels danger</b>	<b>150</b>
<b>III.2 L'indice de vulnérabilité</b>	<b>151</b>
<b>III.2.1 La fonction de vulnérabilité globale</b>	<b>151</b>
<b>III.2.2 Les fonctions de vulnérabilité humaine, environnementale et matérielle</b>	<b>152</b>
<b>III.2.3 Les fonctions de vulnérabilité humaine pour chaque effet</b>	<b>153</b>
III.2.3.1 Rappels de la typologie des cibles humaines	154
III.2.3.2 la vulnérabilité humaine pour un effet de surpression	154
III.2.3.3 la vulnérabilité humaine pour un effet de flux thermique	154
III.2.3.4 la vulnérabilité humaine pour un effet de toxicité	155
III.2.3.5 la vulnérabilité humaine pour un effet de pollution liquide	155
<b>III.2.4 Les fonctions de vulnérabilité environnementale pour chaque effet</b>	<b>157</b>
III.2.4.1 Rappels de la typologie des cibles environnementales	157
III.2.4.2 la vulnérabilité environnementale pour un effet de surpression	157
III.2.4.3 la vulnérabilité environnementale pour un effet de flux thermique	158
III.2.4.4 la vulnérabilité environnementale pour un effet de toxicité	158
III.2.4.5 la vulnérabilité environnementale pour un effet de pollution liquide	158
<b>III.2.5 Les fonctions de vulnérabilité matérielle pour chaque effet</b>	<b>160</b>
III.2.5.1 Rappels de la typologie des cibles matérielles	160
III.2.5.2 la vulnérabilité matérielle pour un effet de surpression	160
III.2.5.3 la vulnérabilité matérielle pour un effet de flux thermique	161
III.2.5.4 la vulnérabilité matérielle pour un effet de toxicité	161
III.2.5.5 la vulnérabilité matérielle pour un effet de pollution liquide	161
<b>III.2.6 Les cartes de vulnérabilité spatiale de la zone d'étude</b>	<b>163</b>
III.2.6.1 Les cartes de vulnérabilités humaines	163
III.2.6.2 Les cartes de vulnérabilité environnementale	169
III.2.6.3 La carte de vulnérabilité globale	175
<b>III.2.7 Les cartes de potentiel danger</b>	<b>177</b>
<b>III.3 Les niveaux de risque</b>	<b>181</b>
III.3.1 Le niveau de risque du scénario n°1	181
III.3.2 Le niveau de risque du scénario n°2	182
III.3.3 Le niveau de risque du scénario n°3	182
III.3.4 Le niveau de risque global	182
<b>III.4 Les limitations et les améliorations</b>	<b>187</b>
<b>CONCLUSION</b>	<b>189</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>192</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>202</b>
Annexe I : Questionnaire	204
Annexe II : Matrices	248
Annexe III : Structures hiérarchiques	253

## LISTE DES TABLEAUX

### Chapitre 1 : Etude bibliographique - Etat de l'art des méthodes d'analyse et d'évaluation des risques

Tableau I.1 : Méthodes d'analyse de risques par type.	25
Tableau I.2 : Interconnexions entre les données d'entrée et les types de méthodes.	27
Tableau I.3 : Interconnexions entre les types de méthodes et les résultats.	29
Tableau I.4 : Liens entre les données d'entrée, les moteurs d'analyses et les résultats.	31
Tableau I.5 : Méthodes d'analyse de risques pour les sites industriels, le transport de matières dangereuses et le facteur humain.	33
Tableau I.6 : Méthodes d'analyse de risques permettant une hiérarchisation.	36
Tableau I.7 : Tableau de synthèse type de réaction / sévérité / facteur potentiel d'énergie.	48
Tableau I.8 : Mode de transfert des polluants en fonction du milieu.	63

### Chapitre 2 : Méthode d'évaluation du niveau de risque d'un site industriel

Tableau II.1 : Echelle de l'indice de dangerosité pour le cas d'effet physique de type flux thermique.	77
Tableau II.2 : Exemple de valeurs d'indice de dangerosité pour les effets physiques de flux thermique.	77
Tableau II.3 : Echelle de l'indice de dangerosité pour le cas d'effet physique de type surpression.	78
Tableau II.4 : Echelle de l'indice de dangerosité pour le cas d'un effet de surpression.	80
Tableau II.5 : Exemple de valeurs d'indice de dangerosité pour les effets physiques de surpression.	80
Tableau II.6 : Echelle de toxicité.	81
Tableau II.7 : Exemple de substances toxiques et de leur indice de dangerosité.	82
Tableau II.8 : Echelle de toxicité due à une pollution liquide ( $I_{poll}$ )	85
Tableau II.9 : Exemple de substances concernant la pollution liquide et de leur indice de dangerosité.	86
Tableau II.10 : Echelle du facteur d'aggravation lié à la structure.	88
Tableau II.11 : Règles d'affectation d'une valeur au facteur d'aggravation dû à la quantité.	89
Tableau II.12 : Valeurs limites brutes de l'indice de gravité par accident majeur.	90
Tableau II.13 : Seuils d'effet par effet physique.	94
Tableau II.14 : Echelle des comparaisons binaires.	106
Tableau II.15 : Echelle de comparaison binaire pour l'élaboration de la vulnérabilité.	122

### Chapitre 3 : Outil et application

Tableau III.1 : Données et résultat concernant le facteur d'aggravation dû la quantité mise en jeu	142
Tableau III.2 : Indice de gravité.	143
Tableau III.3 : Tableau de synthèse pour l'indice de gravité du scénario 2.	147
Tableau III.4 : Tableau de synthèse pour l'indice de gravité du scénario 3.	149

## LISTE DES FIGURES

### Chapitre 2 : Méthode d'évaluation du niveau de risque d'un site industriel

Figure II.1 : Schématisation du système site industriel et environnement.	71
Figure II.2 : Définition des zones caractérisant la quantité impliquée en fonction des seuils haut et bas.	88
Figure II.3 : Organigramme de synthèse pour le calcul de la gravité $I_{\text{gravité}/\text{AMi}}$ .	91
Figure II.4 : Représentation des zones d'effet autour de la zone d'étude.	93
Figure II.5 : Degré d'avancement du phénomène accidentel dans la zone d'effet létale	95
Figure II.6 : Degré d'avancement du phénomène accidentel dans la zone d'effet irréversible	95
Figure II.7 : Degré d'avancement du phénomène accidentel dans la zone d'effet réversible	96
Figure II.8 : Exemple d'évolution de l'indice de flux de propagation et du facteur d'atténuation.	97
Figure II.9 : Exemple de zone d'évaluation d'indice de flux de propagation pour un phénomène anisotrope.	98
Figure II.10 : Construction hiérarchique élémentaire.	103
Figure II.11 : Structuration hiérarchique détaillée.	104
Figure II.12 : Exemple de structuration hiérarchique.	105
Figure II.13 : Exemple de structure hiérarchique (3 critères, 3 éléments).	107
Figure II.14 : Matrices obtenues à partir de la structure hiérarchique (figure n°9).	107
Figure II.15: Structure hiérarchique pour évaluer la vulnérabilité globale (matrices 1, 2, 3 et 4).	113
Figure II.16 : Exemple de matrice (matrice 1).	114
Figure II.17: Vulnérabilité humaine par rapport à un effet de surpression (surp)(matrices 5, 6, 7, 8).	115
Figure II.18 : Vulnérabilité humaine par rapport à un effet de flux thermique (ft) (matrices 9, 10, 11, 12).	115
Figure II.19 : Vulnérabilité humaine par rapport à un effet de toxicité dû à un gaz (tox) (matrices 13, 14, 15, 16).	116
Figure II.20 : Vulnérabilité humaine par rapport à un effet de pollution liquide (poll) (matrice 17, 18, 19, 20).	116
Figure II.21 : Schématisation du niveau de risques.	124

### Chapitre 3 : Outil et application

Figure III.1 : La structure d'une carte sous un système d'information géographique.	129
Figure III.2 : Analyse thématique sous le S.I.G. MapInfo des différents types de végétation dans le Gard.	130
Figure III.3 : Schéma de fonctionnement de l'application S.I.G. pour la détermination de la vulnérabilité d'une zone.	131
Figure III.4 : Représentation d'une maille et visualisation de la phase de récupération des données.	132
Figure III.5 : L'échelle de vulnérabilité	134
Figure III.6 : Exemple d'interface de Map Info avec le module d'analyse de la vulnérabilité ; couche d'information spécifique à la vulnérabilité environnementale.	135
Figure III.7 : Localisation des scénarios d'accident sur le plan de masse du site industriel.	136
Figure III.8 : Carte de localisation du site industriel.	137
Figure III.9 : Cartographie de la densité de population	138
Figure III.10 : Cartographie du réseau routier	138
Figure III.11 : Cartographie de la couverture naturelle pour la zone d'étude	139
Figure III.12 : Cartographie de couverture naturelle selon la typologie proposée.	139
Figure III.13 : Evolution du flux de propagation en fonction de la distance source – cible pour le scénario 1.	144
Figure III.14 : Rose des vents.	144
Figure III.15 : Schéma des secteurs préférentiels retenus pour l'étude de la dispersion d'un gaz toxique.	145
Figure III.16 : Fonction potentiel danger pour le scénario 1.	146
Figure III.17 : Flux de propagation pour le scénario 2.	147
Figure III.18 : Potentiel danger pour le scénario 2.	148
Figure III.19 : Flux de propagation pour le scénario 3.	149
Figure III.20 : Potentiel danger pour le scénario 3.	150
Figure III.21 : Potentiel danger pour les scénarios 1,2 et 3.	150
Figure III.22 : Répartition des poids de vulnérabilité pour les cibles humaines, environnementales et matérielles pour la fonction de vulnérabilité globale.	152
Figure III.23 : Répartition des poids de vulnérabilité par chaque classe de cibles en fonction des effets physiques.	153
Figure III.24 : Synthèse des facteurs de vulnérabilité humaine.	156
Figure III.25 : Synthèse des facteurs de vulnérabilité environnementale.	159
Figure III.26 : Synthèse des facteurs de vulnérabilité matérielle.	162
Figure III.27 : Carte de la vulnérabilité humaine face à un effet de surpression	164
Figure III.28 : Carte de la vulnérabilité humaine face à un effet de flux thermique	165
Figure III.29 : Carte de la vulnérabilité humaine face à un effet de toxicité	166
Figure III.30 : Carte de la vulnérabilité humaine face à un effet de pollution	167
Figure III.31 : Carte de la vulnérabilité humaine	168
Figure III.32 : Carte de la vulnérabilité environnementale face à un effet de surpression	170
Figure III.33 : Carte de la vulnérabilité environnementale face à un effet de flux thermique	171
Figure III.34 : Carte de la vulnérabilité environnementale face à un effet de toxicité	172
Figure III.35 : Carte de la vulnérabilité environnementale face à un effet de pollution	173
Figure III.36 : Carte de la vulnérabilité environnementale	174

Figure III.37 : carte de vulnérabilité globale	176
Figure III.38 : Potentiel danger du scénario n°1	178
Figure III.39 : Potentiel danger du scénario n°2	179
Figure III.40 : Potentiel danger du scénario n°3	180
Figure III.41 : carte de niveau de risque du scénario n°1	183
Figure III.42 : carte de niveau de risque du scénario n°2	184
Figure III.43 : carte de niveau de risque du scénario n°3	185
Figure III.44 : carte de niveau de risque global	186

## NOTATIONS

BCF : bio concentration factor  
BDcarto : Base de données cartographique de l'Institut Géographique National  
CE : concentration efficace  
CL<sub>1%</sub> : Concentration létale provoquant 1% de mortalité  
DRIRE : direction régionale de l'industrie de la recherche et de l'environnement  
d<sub>ZEI</sub> : distance de la zone d'effet irréversible  
d<sub>ZEL</sub> : distance de la zone d'effet léthal  
d<sub>ZER</sub> : distance de la zone d'effet réversible  
E : économique  
EDD : étude de danger  
ERP : établissement recevant du public  
Ft : flux thermique  
G<sub>Ami</sub> : Indice de gravité pour l'accident majeur i  
IDLH : immediatly dangerous to life and health  
IGN : institut géographique national  
INSEE : Institut nationale de statistique économique  
MHM : méthode de hiérarchie multicritères  
NOAEL : no observable effect exposure limit  
P : psychologique  
POI : plan d'opération interne  
Poll : pollution liquide  
PPI : plan particulier d'intervention  
S : sanitaire  
SEI : seuils des effets irréversibles  
SEL : seuils des effets létaux  
SER : seuil des effets réversibles  
SIG : système d'information géographique  
SMS : système de management de la sécurité  
Surp : surpression  
Tox : toxicité gaz  
ZEI : zone d'effet irréversible  
ZEL : zone d'effet léthal  
ZER : zone d'effet réversible  
ZNIEFF : zone naturelle d'intérêt faunistique et floristique  
ZSE : zone sans effet observable

## Introduction

---

Beaucoup de pays ont vu leur activité industrielle se développer au cours du dernier siècle notamment en France. Historiquement, les sites étaient localisés à l'extérieur des villes dans des zones de faible densité de population. Cette activité a, au fur et à mesure, été rattrapée par l'urbanisation croissante, en raison de l'intérêt pour les populations de se rapprocher des zones présentant un attrait économique. Cette proximité entre les sites industriels et les zones susceptibles d'être affectées par un éventuel accident, a provoqué une augmentation du risque technologique.

Les phénomènes accidentels sont de plusieurs sortes :

- soit des explosions,
- soit des incendies,
- soit des émissions de substances toxiques.

Les conséquences de ces accidents peuvent être importantes et même catastrophiques, comme l'accident de l'usine Grande Paroisse à Toulouse le 21 Septembre 2001. Les dommages sont généralement des pertes humaines, des atteintes « écologiques » à l'environnement naturel et des atteintes à l'intégrité des biens.

Les activités industrielles susceptibles d'engendrer de tels phénomènes sont liées à l'emploi, la manipulation, la fabrication ou le stockage de substances dangereuses au sens de la directive européenne 67/548/CE. Ces activités sont réglementées notamment par la directive Seveso. D'autres types d'activités industrielles sont susceptibles d'engendrer des accidents majeurs, comme les sites de stockages d'oléagineux mais ces derniers ne sont retenus dans le cadre de cette étude. Seuls les sites industriels soumis à la directives 96/82/CE seront pris en compte.

D'un point de vue réglementaire, les directives européennes 82/501/CE (dite Seveso I) puis 96/82/CE (dite Seveso II) traduites en droit français, obligent les industriels à gérer les risques présents sur leur site. Cette gestion des risques se fait au travers d'un ensemble de moyens de prévention et de protection mis en place pour limiter l'occurrence d'apparition d'un accident majeur et la gravité des conséquences sur un site industriel et son environnement. La directive européenne Seveso II confirme les obligations des industriels pour identifier, quantifier les risques d'accident majeur et reprecise de manière forte la nécessité de prendre en compte

l'environnement susceptible d'être affecté par les conséquences d'un accident. D'autre part, la réglementation implique d'évaluer le niveau de sécurité au travers du système de management de la sécurité (S.M.S.). Un des outils de la réglementation française est l'étude de danger que les industriels doivent rédiger et fournir aux autorités compétentes pour pouvoir exploiter le site.

Deux installations classées ayant les mêmes caractéristiques que cela soit au niveau des substances dangereuses stockées ou utilisées et des conditions d'utilisation, peuvent présenter un niveau de risque identique, ou bien différent en fonction de la performance dans la gestion de la sécurité en fonction de l'environnement susceptible d'être affecté par un accident. Cependant, il n'existe pas de méthodologie permettant d'évaluer un niveau de risque d'une installation industrielle de type Seveso, qui permettrait dans un premier temps de classer les différents sites en fonction de leurs spécificités et dans un second temps de mettre en avant l'implication de l'industriel dans la gestion de la sécurité de son site.

Les méthodes d'analyses des risques permettent de réaliser une identification des dangers et une quantification des risques. Ces phases sont demandées lors de la réalisation d'une étude de danger. Diverses méthodes d'analyses des risques existent, selon le type d'installation et de substance impliquée. L'ensemble des méthodes présente une richesse au travers de leur diversité que cela soit dans l'approche générale qui est développée ou bien vis-à-vis des domaines d'application. L'une des principales limitations des méthodes présentées est le manque de transférabilité à différents types d'installation. Par ailleurs, elles ne considèrent pas généralement le système industriel dans sa globalité, comme le spécifie la réglementation, c'est-à-dire en tenant à la fois compte du site industriel mais également de son environnement en tant que milieu de propagation des accidents et en tant que cible.

Cette étude a donc pour but de développer une méthode d'évaluation des risques d'un site industriel présentant des risques majeurs, n'ayant pas les limites précédemment citées c'est-à-dire, pouvant être utilisée sur des sites industriels très différents et tenant compte de l'environnement comme milieu de propagation et en tant que cible. Ainsi,

- Dans un premier temps, un état de l'art des méthodes d'analyse et d'évaluation des risques est effectué. Cette première partie aborde les méthodes d'analyse des risques d'un point de vue fonctionnel. Elle présente ainsi les grandes phases des méthodes, les données nécessaires à la réalisation de celles-ci, les types de résultats obtenus et les moteurs de

traitement. Dans un second temps, les méthodes basées sur les indices sont étudiées afin de comprendre le mode de construction de ces indices (type d'indice et paramètres pertinents retenus) et leurs interactions. Ceci amène un ensemble de conclusion permettant de structurer une méthode d'évaluation des risques présentée dans le second chapitre.

- La deuxième partie de cette étude porte sur l'élaboration d'une méthode d'évaluation du niveau de risque d'une installation industrielle de type Seveso II, basée sur des indices. Un modèle composé de trois entités est retenu pour l'élaboration des indices, la source de danger qui correspond à l'établissement, le flux de danger qui caractérise la propagation des accidents majeurs dans l'environnement et les cibles qui sont susceptibles d'être affectées par ces accidents majeurs. La source de danger est évaluée grâce à l'indice de gravité qui est spécifique à la substance dangereuse impliquée, à la quantité de substance mise en jeu lors de la séquence accidentelle et finalement aux caractéristiques d'utilisation de celle-ci. Le flux de propagation dépend des seuils et distances d'effet pour chaque type d'accident (données extraites de l'étude de danger). Pour le dernier indice représentant la vulnérabilité des cibles, la mise en œuvre d'une méthode de décision multicritères est réalisée. Cette dernière se base sur une organisation des données caractérisant l'environnement d'une installation industrielle (typologie des cibles, effets physiques et types d'impacts générés par les accidents majeurs).
- Enfin, dans une dernière partie, une application à un site pilote est réalisée. Pour ce faire, dans le but de rendre la méthode totalement opérationnelle, la partie concernant l'indice de vulnérabilité a été informatisée grâce à un système d'information géographique. L'application permet notamment de détailler les étapes de calcul et également de visualiser les différents types de résultats obtenus, comme par exemple des résultats sous la forme d'une carte de la vulnérabilité globale ou des cartes spécifiques à chaque effet physique considéré.

En conclusion, les pistes de développement et les perspectives de la méthode sont alors proposées.

**CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE, LES METHODES D'ANALYSE ET  
D'EVALUATION DES RISQUES**

Depuis quelques dizaines d'années, en raison du développement industriel, la problématique du risque industriel ainsi qu'une diversification des risques encourus deviennent de plus en plus importantes. Le retour d'expérience, concernant les accidents majeurs sur les sites industriels à risques, montre la nécessité de comprendre et de gérer ces risques en amont, c'est-à-dire avant que l'accident se produise. Dans le même temps, une prise de conscience des populations soumises et/ou exposées aux risques générés par les sites industriels, a eu pour conséquences de diminuer de manière importante le seuil d'acceptabilité du risque. En réponse à ce phénomène de société, les institutions publiques et les industriels ont proposé des méthodes de prévision du risque, dans le but de développer des systèmes de prévention et de protection pour un meilleur management des risques. Parmi ces méthodes, les méthodes d'analyse de risques permettent en général d'identifier et de quantifier le danger ou bien le risque engendrés par un site industriel. Ceci peut se faire de différentes manières, en fonction du type d'installation ou bien des objectifs que se donnent les concepteurs de la méthode.

Cette première partie est un état de l'art des méthodes d'analyse et d'évaluation des risques. Ceci doit permettre la mise au point d'une méthode globale d'analyse et d'évaluation du risque technologique pour une meilleure prise en compte des différents paramètres intrinsèques à une installation industrielle ainsi que son environnement. La richesse et la faiblesse de certaines méthodes doivent être étudiées pour proposer une méthode remédiant aux manques de ces dernières.

Le travail bibliographique sur les méthodes d'analyse et d'évaluation des risques porte sur une soixantaine de méthodes qui ont été développées lors de ces trente dernières années dans le domaine des risques générés par les sites industriels, le transport de matières dangereuses et le facteur humain.

## **I Principales notions utilisées pour l'évaluation d'un niveau de risque d'une installation**

La première définition abordée est celle du terme risque : Le risque est

- « l'espérance mathématique des pertes en vies humaines, des blessés, des dommages aux biens et de l'atteinte à l'activité économique au cours d'une période de référence et dans une région donnée, pour un aléa particulier. Le risque est le produit de l'aléa par la vulnérabilité » [1], [2], [3].

Cette définition présente une des approches du concept du risque. Elle peut être différente suivant les auteurs et suivant les objectifs de la méthode. De manière plus précise, la problématique abordée dans ce document porte sur la notion de risque industriel majeur.

Un **risque industriel majeur** est : « un évènement accidentel se produisant sur un site industriel et entraînant des conséquences immédiates et graves pour le personnel, les populations avoisinantes, les biens ou l'environnement » [1], [4].

Les concepts du terme risque et risque industriel majeur amènent automatiquement d'autres notions qu'il faut définir. Deux éléments sont retenus pour classer ces définitions :

- celles qui sont liées au site industriel,
- celles qui sont liées à l'environnement.

### ***1.1 Le site industriel***

Le site industriel est une source susceptible de générer un accident majeur dont le niveau de danger est caractérisé notamment par la substance dangereuse impliquée au sens de la directive 96/82/CE. Cet accident majeur est, quant à lui, caractérisé par sa gravité.

Le **danger** est « la propriété intrinsèque d'une substance dangereuse ou d'une situation physique pouvant provoquer des dommages pour la santé humaine et/ou l'environnement » [1], [3], [5].

Une **source** est « un élément ou une activité qui a des conséquences potentielles » [6].

L'**accident majeur** est donc « un évènement tel qu'une émission, un incendie ou une explosion d'importance majeure résultant de développements incontrôlés survenus au cours de l'exploitation d'un établissement couvert par la directive Seveso II, entraînant pour la santé humaine, à l'intérieur ou à l'extérieur de l'établissement, et/ou pour l'environnement, un danger grave, immédiat ou différé, et faisant intervenir une ou plusieurs substances dangereuses » [1], [5].

La **Gravité** est « la capacité plus ou moins grande d'un phénomène à provoquer des effets sur des victimes potentielles » [1].

## ***1.2 L'environnement***

L'environnement est ici considéré comme le regroupement des cibles susceptibles d'être affectées par les effets d'un accident majeur, accident susceptible de générer des dommages sur un ensemble d'enjeux présentant une vulnérabilité.

On entend par **dommages**, la « détérioration physique (corporelle, matérielle, environnementale...) ou morale socialement refusée, conséquence directe ou indirecte, immédiate ou différée consécutive à un évènement considéré comme néfaste » [1], [7].

**Les enjeux** sont des « personnes, biens, équipements, environnement menacés par l'aléa et susceptibles de subir des préjudices ou des dommages » [1].

« La **vulnérabilité** indique la fragilité des éléments à risque par rapport à l'occurrence d'un évènement. Quantifier la vulnérabilité revient à estimer un coefficient où une valeur 1 représente une vulnérabilité maximale et une valeur 0 une vulnérabilité nulle » [1], [3], [8].

Deux définitions complémentaires sont présentées ci-dessous. Il s'agit de :

- **L'évaluation du risque** qui est un « processus de comparaison du risque estimé à des critères de risque donnés pour déterminer l'importance du risque » [6].
- Les **critères de risque** qui sont des « termes de référence permettant d'apprécier l'importance des risques » [6].

Il est également nécessaire de préciser la différence existant entre une analyse de risque et une évaluation des risques. L'analyse de risque consiste en une utilisation systématique d'informations pour identifier les éléments ou activités qui ont des conséquences potentielles et pour estimer le risque [6]. L'analyse de risque fournit une base à l'évaluation des risques. Cette dernière consiste en un processus de comparaison du risque estimé à des critères de risques (termes de référence permettant d'apprécier l'importance des risques) donnés pour déterminer l'importance d'un risque [6].

Dans les paragraphes suivants du chapitre I, les méthodes d'analyse et d'évaluation des risques seront abordées de manière simultanée dans le cadre de cette étude.

## II Généralités sur les méthodes d'analyse et d'évaluation des risques

L'une des principales préoccupations des industriels dans le domaine de la sécurité est la gestion des risques générés par leurs installations. Pour traiter ce problème, les industriels et les autorités compétentes ont développé un ensemble de méthodes, plus ou moins spécifiques et approfondies.

Ces méthodes d'analyse et d'évaluation des risques permettent de réaliser une identification des sources de danger et d'estimer les risques associés soit de manière déterministe, soit de manière probabiliste. Les objectifs affichés des méthodes peuvent se synthétiser de la manière suivante :

- Un premier objectif est de réduire le niveau de risques d'une installation :
  - en diminuant la gravité des accidents majeurs, soit en arrêtant la propagation de l'accident, soit en atténuant l'intensité de ce dernier, ou bien en réduisant l'occurrence de l'accident,
  - en diminuant la vulnérabilité de l'environnement
- Un deuxième objectif est de fournir une aide à la décision aux exploitants et aux autorités compétentes, notamment pour simplifier et clarifier les échanges entre ces deux parties.
- Un troisième objectif est de réaliser un classement des différents sites industriels en fonction de leur niveau de risque respectif. Par ailleurs, pour un site en particulier, les voies d'amélioration peuvent être testées et l'influence de modifications à effectuer pour diminuer le niveau de risque du site industriel peut être évaluée.

Les méthodes d'analyses de risques peuvent se composer des trois phases principales suivantes :

- La phase d'identification du risque : elle décrit le système et identifie les séquences d'accident majeur.

- La phase d'évaluation qualitative ou quantitative du risque : elle est déterministe et/ou probabiliste.
- La phase de hiérarchisation du risque qui permet de classer les risques identifiés.

### ***II.1 La phase d'identification***

La phase d'identification est basée sur une approche descriptive du site (substances et activités dangereuses, équipements) et de son environnement. Ces données sont nécessaires pour le développement des différentes phases des méthodologies. La phase d'identification des dangers est primordiale [7] car elle permet :

- De poser les bases de l'analyse de risque. En effet, le résultat de la phase d'identification des risques correspond aux données d'entrée des deux phases suivantes (phases d'évaluation et de hiérarchisation). Ainsi, la validité de ces données et leur exhaustivité ont une importance capitale pour parvenir à des conclusions se rapprochant de la réalité,
- D'identifier les zones à risques,
- Et de sélectionner les situations présentant un risque pour mener une analyse de risque de manière efficace.

### ***II.2 La phase d'évaluation***

La phase d'évaluation permet de quantifier le risque de deux façons :

- soit en s'intéressant aux conséquences de scénarios prédéfinis d'un point de vue des dommages, cela correspond à une approche déterministe basée sur l'évaluation des conséquences (ou « consequence based approach ») que l'on retrouve principalement en France, en Autriche et en partie en Belgique.

- soit en s'intéressant aux probabilités d'occurrence d'accident, cela correspond à une approche probabiliste (ou « risk based approach »).

La phase d'évaluation a pour but de quantifier les impacts des situations dangereuses identifiées, sur le site industriel, les sites avoisinants ou sur l'environnement.

Grâce à une phase d'identification ou à l'enchaînement d'une phase d'identification et d'une phase d'évaluation, un ensemble de données plus ou moins important est obtenu. A ce stade, il peut être nécessaire d'approfondir l'analyse en triant ou en affectant des priorités aux éléments de cet ensemble de données. Ce traitement est réalisé par l'intermédiaire de la phase de hiérarchisation.

### ***II.3 La phase de hiérarchisation***

La phase de hiérarchisation classe les données retenues dans les phases précédentes dans le but de mettre en avant les systèmes présentant les risques les plus sévères. La phase de hiérarchisation peut porter sur la source de danger ou sur son environnement et permet d'obtenir un niveau de risques ou de danger selon la méthode appliquée.

### ***II.4 Les combinaisons des phases***

Une méthode d'analyse ne comporte pas obligatoirement l'ensemble de ces trois phases, elle peut être composée uniquement :

- d'une identification ou d'une évaluation ou d'une hiérarchisation
- d'une identification et d'une évaluation,
- d'une identification et d'une hiérarchisation,
- d'une identification, d'une évaluation et d'une hiérarchisation.

Dans le cas où la démarche d'analyse de risque est constituée d'une seule étape d'identification, il est nécessaire de coupler cette approche avec une méthode complémentaire. Si seules, une phase d'évaluation ou de hiérarchisation sont utilisées, il est recommandé de mettre en œuvre une démarche formalisée pour identifier de manière

structurée les données qui vont subir le traitement lors de ces deux phases. Des méthodes, constituées d'une phase unique, peuvent être qualifiées de « méthodes simples ».

Dans les trois autres cas, c'est-à-dire si les méthodes sont constituées de plus d'une phase, elles peuvent se suffire à elles-mêmes en fonction des objectifs établis et des types de résultats escomptés. Ces méthodes sont appelées « méthodes élaborées ».

Indépendamment de la méthodologie utilisée pour effectuer une analyse de risques, trois points importants doivent être abordés, notamment en fonction des objectifs. Il s'agit :

- des résultats escomptés,
- des données d'entrée disponibles,
- de la méthode choisie.

Ces trois points sont interdépendants et permettent d'établir le niveau d'implication nécessaire en terme de temps, de moyens humains et techniques pour l'application de la méthode d'analyse de risques. Par exemple, en fonction des résultats escomptés, il faut un ensemble de données d'entrée spécifiques et une ou plusieurs méthodes sont applicables.

Dans le but d'étudier ces interactions et le mode de fonctionnement de ces méthodes, un classement de celles-ci a été réalisé.

### **III Etat de l'art des méthodes d'analyse de risque**

Ce paragraphe porte sur l'analyse d'une soixantaine de méthodes d'analyse et d'évaluation des risques plus ou moins avancées dans leur technique d'analyse et dans leur robustesse. Un des buts recherchés a été de les classer en catégories cohérentes pour pouvoir dégager une analyse des données d'entrée nécessaires et des types de résultats obtenus en fonction de la catégorie de la méthode.

### ***III.1 Les types de méthodes***

Pour répondre à l'objectif de ce chapitre qui correspond à une l'étude des données d'entrée, des types de moteurs et des types de résultats, les critères classiques (méthode inductive ou déductive) de classification des méthodes n'ont pas été retenus. Ces deux critères correspondent à :

- méthode inductive qui se base sur une observation des causes et des conséquences (HAZOP, APR et AMDEC)
- méthode déductive qui consiste à partir des faits observés de déduire de nouveaux faits, par exemple à partir d'un évènement final redouté décrire les faits amonts à celui-ci (Arbre de défaillances)

Pour définir les types de méthodes, quatre critères principaux sont utilisés. Il s'agit des :

- méthodes permettant une approche qualitative,
- méthodes permettant une approche quantitative,
- méthodes déterministes,
- méthodes probabilistes.

A partir des critères déterministe et probabiliste, trois classes de méthodes sont proposées :

- uniquement déterministes (basée uniquement sur une approche déterministe),
- uniquement probabilistes (basée uniquement sur une approche probabiliste),
- combinées (basée sur une approche à la fois déterministe et probabiliste).

Enfin, chacune des trois classes de méthodes sont décrites à l'aide des critères qualitatif et quantitatif d'un point de vue des résultats obtenus. Ceci permet d'obtenir, au final, six classes de méthodes. Ces six classes de méthodes sont utilisées dans la première partie du chapitre bibliographique pour classer les méthodes d'analyse et d'évaluation des risques.

#### **III.1.1 Les méthodes d'analyse déterministes**

Les méthodes d'analyse de risques déterministes sont basées sur la prise en compte des produits et équipements du point de vue des quantités et des caractéristiques (physico-chimiques, stockages) ainsi que sur l'évaluation des conséquences sur les personnes, les biens, et l'environnement en termes d'effets.

### III.1.2 Les méthodes d'analyse probabilistes

Les méthodes d'analyse probabilistes sont basées sur l'estimation de la probabilité ou la fréquence d'apparition d'une situation dangereuse ou sur l'occurrence des conséquences d'un accident potentiel. Les méthodes probabilistes se focalisent principalement sur la probabilité de panne des équipements ou de leurs composants. L'étendue d'une approche probabiliste est réduite, en général, à une partie localisée d'un site industriel, comme par exemple une unité ou un process spécifique.

### III.1.3 Les méthodes d'analyse combinées

Dans le cadre d'une approche combinée (déterministe et probabiliste), le champ d'action permet une analyse globale du site industriel.

### III.1.4 Le classement des méthodes d'analyse de risques

La classification des méthodes d'analyse de risques est basée sur les types de résultats escomptés avec les critères qualitatif/quantitatif et déterministe/probabiliste. Ainsi, si une méthode donne des résultats probabilistes alors elle est qualifiée de probabiliste.

Les différentes méthodes recensées sont présentées dans le tableau I.1. Dans chacune de ces classes (déterministe, probabiliste ou combinée) les différentes méthodes peuvent être organisées en considérant que certaines d'entre elles sont simples car elles ne permettent pas de réaliser une analyse de risque complète et d'autres sont modulaires. Les méthodes modulaires sont, en fait, construites à partir des méthodes dites simples auxquelles certains modules ont été rajoutés dans le but de réaliser une analyse de risque plus complète et plus exploitable. En effet, elles permettent souvent de hiérarchiser le risque étudié dans les étapes précédentes et donc de mettre en avant les risques principaux en termes de probabilité ou de gravité.

	n°*	Approche qualitative	n°*	Approche quantitative
<b>Déterministe</b>	1	Action Errors Analysis AEA [9]	31	Accident Hazard Index AHI [24] [25]
	2	Checklist [10]	32	Directive SEVESO II [5]
	3	Concept Hazard Analysis CHA [9] [11]	33	Chemical Runaway Reaction Hazard Index RRHI [26]
	4	Concept Safety Review CSR [9]	34	Dow's Chemical Exposure Index CEI [27]
	5	Failure Mode Effect Analysis FMEA [9] [10] [12]	35	Dow's Fire and Explosion Index FEI [24] [28]
	6	Goal Oriented Failure Analysis GOFA [9]	36	Fire and Explosion Damage Index FEDI [24]
	7	Hazard and Operability HAZOP [9] [10] [12] [13] [14]	37	Hazard Identification and Ranking HIRA [10] [25]
	8	Human Hazard and Operability Human HAZOP [14]	38	Instantaneous fractional loss index IFAL [10] [24]
	9	Insurers involvement in risk reduction process [15]	39	Methodology of domino effects analysis [29]
	10	Manager [16]	40	Methods of potential risk determination and evaluation [30]
	11	Optimal Hazard and Operability OptHAZOP [10] [17]	41	Mond Fire Explosion and Toxicity Index FETI [10] [24]
	12	Plant Level Safety Analysis PLSA [18]	42	SAATY methodology [31]
	13	Potential domino effects identification [19]	43	Toxic Damage Index TDI [24]
	14	Preliminary Risks Analysis PRA [9] [12]		
	15	Process Risk Management Audit PRIMA [20]		
	16	Profile Deviation Analysis PDA [21]		
	17	Safety related questions for computer controlled plants [22] [23]		
	18	Seqhaz Hazard Mapping SHM [21]		
	19	Sneak Analysis [9]		
	20	Task Analysis TA [9]		
	21	What if? Analysis [9] [10] [12]		
	22	World Health Organisation WHO [10]		
<b>Probabiliste</b>	23	Accident Sequences Precursor ASP [32]	44	Defi method [9]
	24	Delphi Technique [9]	45	Event Tree Analysis ETA [9] [12] [34] [35]
	25	Earthquake safety of structures and installations in chemical industries [33]	46	Fault Tree Analysis FTA [9] [10] [12]
			47	Maintenance Analysis MA [9]
			48	Short Cut Risk Assessment SCRA [9]
		49	Work Process Analysis Model WPAM [36]	
<b>Déterministe et probabiliste (combinée)</b>	26	Maximum Credible Accident Analysis MCAA [10]	50	AVRIM2 [37]
	27	Reliability Block Diagram RBD [9]	51	Facility Risk Review [38]
	28	Safety Analysis SA [10]	52	Failure Mode Effect Criticality Analysis FMECA [9]
	29	Safety Culture Hazard and Operability SCHAZOP [14]	53	IDEF3 [39] [40]
	30	Structural Reliability Analysis SRA [9]	54	International Study Group on Risk Analysis ISGRA [10]
			55	IPO Risico Berekening Methodiek IPORBM [34]
			56	Method Organised Systematic Analysis of Risk MOSAR [7] [9]
			57	Optimal Risk Assessment ORA [10]
			58	Probabilistic Safety Analysis PSA [10] [41]
			59	Quantitative Risk Assessment QRA [9] [10] [41] [42] [43] [44] [45]
			60	Rapid Ranking RR [13] [40]
			61	Rapid Risk Analysis Based Design RRABD [46]
			62	Risk Level Indicators RLI [42]

Tableau I.1 : Méthodes d'analyse de risques par type (\* correspond au numéro de la méthode).

Une grande majorité des méthodes présentées est de type déterministe (cf. tableau I.1). En effet, historiquement, les exploitants et les autorités compétentes ont tout d'abord cherché à évaluer les conséquences des dommages générés par un accident majeur en vue de protéger les personnes et l'environnement. Cette première approche peut être jugée insuffisante, et elle a été complétée avec le développement de méthodes présentant une approche combinée (déterministe et probabiliste). Cette dernière s'intéresse à la fois à la quantification des dommages en terme de conséquences et à leur probabilité d'occurrence.

### ***III.2 Les types de données d'entrée***

Les données d'entrée correspondent aux données nécessaires pour appliquer une méthode d'analyse de risques. Ces données peuvent être techniques comme les caractéristiques des processus, ou qualitatives comme la politique de sécurité mise en œuvre au sein de l'entreprise. L'analyse de ces soixante-deux méthodes permet de proposer sept classes de données d'entrée qui sont les suivantes :

- Les plans, schémas ou diagrammes décrivant le site, les installations, les unités, les réseaux de fluides, les systèmes de sécurité et les stockages,
- Les caractéristiques des process et les réactions consistant en la description des opérations des tâches, des caractéristiques physico-chimiques des process, des paramètres cinétiques et thermiques et des conditions normales de fonctionnement du système,
- Les substances, ou plus particulièrement leurs types, leurs propriétés physiques, chimiques et toxicologiques et également les quantités impliquées,
- La probabilité et la fréquence, qu'il s'agisse du taux de panne d'un élément ou d'une personne réalisant une opération ou bien de la probabilité d'exposition à un phénomène accidentel,
- La politique et la gestion regroupant l'ensemble des données concernant la maintenance, l'organisation, la politique de sécurité,
- L'environnement donnant la description de l'environnement du site, les données topographiques et la densité de population,
- Les réglementations et le retour d'expérience.

Les données d'entrée et les méthodes utilisant celles-ci sont présentées dans le tableau I.2.

Type	Données d'entrée	Méthodes*			
		déterministe	probabiliste	déterministe et probabiliste	
Plans et diagrammes	Site Installations Unités Réseaux de fluides et de gaz Mode de fonctionnement Barrières de sécurité Stockages	Approche qualitative	2, 3, 4, 5, 7, 8, 11, 13, 14, 15, 18, 19, 21, 22	23	26, 27, 30
	Approche quantitative	31, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43	45, 46, 47	50, 51, 52, 53, 56, 57, 59, 61, 62	
Process et réactions	Description des opérations Description des tâches Réactions et caractéristiques physico-chimiques Caractéristiques des process Paramètres cinétiques et calorimétriques Conditions normales de fonctionnement Conditions opératoires	Approche qualitative	2, 3, 7, 8, 10, 11, 12, 14, 16, 19, 20, 21		
	Approche quantitative	33, 35, 36, 37, 40, 41, 42, 43		54	
Produits	Type de produit, propriétés physico-chimiques Quantités Données toxicologiques	Approche qualitative	11, 12, 13, 14, 16		26
	Approche quantitative	31, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 40, 41, 42, 43		51, 54, 55, 56, 58	
Probabilité et fréquence	Type de panne Probabilité de panne Fréquence d'initiation et de panne Erreur humaine Taux de panne Probabilité d'exposition	Approche qualitative	1, 12, 23, 24	25	26, 27, 28, 29, 30
	Approche quantitative		44, 46, 47, 48, 49	50, 51, 52, 53, 58, 59, 60	
Politique et management	Maintenance Organisation Politique de sécurité SMS Gestion des transports Coût des équipements	Approche qualitative	2, 9, 10, 15, 17		29
	Approche quantitative	36, 42	49	51, 55	
Environnement	Environnement du site Données topographiques Densité de population	Approche qualitative	11, 19		
	Approche quantitative	31, 34, 36, 37, 42		51	
Réglementations et retour d'expérience	Standards Réglementations et documents Retour d'expérience	Approche qualitative	4, 5, 13, 14, 18		
	Approche quantitative	31, 35, 39, 41, 42		51, 52, 59, 61	

Tableau I.2 : Méthodes classées en fonction des données d'entrée (\* correspond au numéro de la méthode).

La plupart des méthodes sont basées sur une description générale du site (plans, schémas et diagrammes). Seules quelques méthodes tiennent compte de l'environnement. Ceci peut s'expliquer par le fait que les exploitants gèrent les risques de leur site au niveau interne en mettant en œuvre des moyens de protection devant permettre par conséquent une limitation des effets aux limites du site.

Les types de données d'entrée (cf. tableau I.1) communes aux méthodes déterministes correspondent aux classes « plans et diagrammes », « process et réaction » et « produits ». Pour les méthodes ayant une approche combinée, on retrouve en plus des classes précitées la classe « probabilité et fréquence ». Une approche combinée a une portée de l'analyse de risques plus importante (nombre de données d'entrée plus grand qu'elles peuvent prendre en compte). Elles sont donc susceptibles de fournir des résultats plus complets. Par contre, les données plus spécifiques comme la politique, l'environnement et les lois et le retour d'expérience sont généralement utilisées par des méthodes déterministes.

### ***III.3 Les types de résultats***

Les résultats obtenus à l'aide de ces méthodes peuvent être, soit qualitatifs comme des recommandations, soit quantitatifs comme des indices de niveau de risques. Plus précisément, l'examen des soixante deux méthodes permet de proposer quatre classes de résultats :

- Les propositions : les résultats sont sous la forme de recommandations, de modifications, de propositions de procédures ou bien de formation et peuvent servir à améliorer le management.
- Les listes d'erreurs, de dangers, d'effet domino, de causes, de conséquences, de dommages, de pannes, d'activités critiques, d'initiateurs d'accident, de zones vulnérables ou bien de scénarios d'accidents majeurs.
- Les résultats probabilistes comme le taux de panne, la fiabilité, la probabilité d'occurrence d'un accident majeur ou de dommages, les fréquences d'accidents.
- Les résultats hiérarchiques comme des indices de risques, de sévérité et ou criticité, ou bien certains indices plus spécifiques à un phénomène accidentel comme le feu, l'explosion ou les fuites toxiques. Il existe également des indices concernant l'organisation de la structure, ou bien basés sur une classification selon le type de risques technique ou organisationnel.

Les résultats et les méthodes utilisant ceux ci sont répertoriés dans le tableau I.3.

Type	Résultats	Méthodes*			
		déterministe	probabiliste	Déterministe et probabiliste	
Propositions	Actions Recommandations Modifications Formation et procédures	<b>Approche qualitative</b>	3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 15, 16, 20		
		<b>Approche quantitative</b>	39		50, 51, 59, 60
Listes	Liste d'erreurs Liste de risques Liste d'effet domino Liste cause/conséquence/panne/dommage Liste d'activités critiques	<b>Approche qualitative</b>	1, 2, 5, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 17, 19, 21, 22	23, 24	26, 28, 29, 30
	Liste des modes de pannes Liste d'accident initiateur Liste de zone vulnérable Liste de scénarios d'accidents majeurs	<b>Approche quantitative</b>	39	46, 47, 48, 49	50, 51, 53, 54, 56, 57, 59, 60, 61
Probabiliste	Taux de panne Fiabilité Probabilité d'occurrence de scénarios	<b>Approche qualitative</b>		23, 24, 25	26, 27, 28, 29, 30
	Probabilité de dommages Fréquence d'accident	<b>Approche quantitative</b>		44, 45, 49	53, 54
Hiérarchisation	Indice/niveau de risques Gravité/criticité Indice de feu/explosion Indice de rejet toxique	<b>Approche qualitative</b>	11, 18	25	
	Indice de risques organisationnels Classification des types de risques	<b>Approche quantitative</b>	31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 40, 41, 42, 43		51, 52, 55, 56, 58, 61, 62

Tableau I.3 : Classement des méthodes d'analyse de risques selon le type de résultats (\* correspond au numéro de la méthode).

Les résultats de type « propositions » ou « listes » (tableau I.3), sont généralement basés sur un jugement d'expert et sont qualitatifs tandis que les résultats probabilistes et hiérarchiques sont principalement de type quantitatif.

Les méthodes présentant une approche combinée fournissent une grande variété de résultats. Elles procurent une analyse plus poussée et donc permettent une aide à la décision plus pertinente.

Pour les méthodes classées déterministe et qualitative, les résultats sont sous la forme de commentaires, de recommandations, de préconisations et d'actions dans le but de limiter ou réduire le risque. Ces résultats portent généralement sur les zones critiques, les types de pannes, les problèmes d'organisation générale, les erreurs humaines.

En ce qui concerne les méthodes construites à partir d'une approche déterministe et quantitative, les résultats sont sous la forme d'un niveau de risque de l'équipement, de l'unité ou du site considéré. Ce niveau de risque est généralement représenté par l'intermédiaire d'un indice facilitant le classement des différents types de risque.

Les méthodes basées sur une approche probabiliste et qualitative favorisent une identification des contributeurs d'accidents ainsi que des situations dangereuses.

Les données en sortie, qui correspondent aux résultats obtenus grâce aux méthodes ayant une approche probabiliste et quantitative sont généralement des fréquences d'occurrence des événements et des probabilités des conséquences. Ces résultats permettent aussi d'établir des commentaires et recommandations pour diminuer et estimer le niveau de risques.

#### ***III.4 Les liaisons entre les données d'entrée, les méthodes et les résultats***

Le tableau I.4 réalise une synthèse et donne une vue générale des données nécessaires pour la réalisation d'une méthode d'analyse de risques ainsi que les objectifs susceptibles d'être atteints en fonction des moyens employés. Ce tableau peut être utilisé de deux manières différentes. La première est conditionnée par la nécessité d'obtenir un ou des types de résultats. Il suffit donc de regarder quels moteurs de traitement et quelles données d'entrée sont susceptibles d'arriver aux résultats escomptés. La seconde est basée sur l'existant, c'est-à-dire à l'aide des données d'entrée disponibles et en fonction du moteur de traitement utilisé, un ensemble de types de résultats est obtenu. En résumé, ce tableau permet d'identifier un type de méthode d'analyse de risques en fonction des objectifs ou bien des données d'entrée disponibles.

CHAPITRE 1 : Etude bibliographique, les méthodes d'analyse et d'évaluation des risques

Données d'entrée	Méthodes*	Résultats
<b>Plan et diagramme</b>		
site		
installations		
unités		
réseaux de fluide et de gaz		<b>Proposition</b>
fonctionnement		actions
barrières de sécurité		recommandations
stockages		modifications
		formation et procédures
<b>Process et Réactions :</b>	<b>Approche qualitative</b>	
description des opérations	déterministe 1 à 22	<b>Liste</b>
description des tâches		liste d'erreurs
caractéristiques physico-chimiques		estimation/liste des risques
caractéristiques des process	probabiliste 23 à 25	liste des effets domino
paramètres cinétiques et calorimétriques		liste cause/conséquence/panne/dommage
conditions normales de fonctionnement		liste d'activités critiques
conditions opératoires		liste de mode de panne
	déterministe et probabiliste 26 à 30	liste d'initiateurs d'accident
<b>Produits</b>		liste de zones vulnérables
types de produit, propriétés physico-chimiques		liste des scénarios d'accidents majeurs
quantités		
données toxicologiques		
<b>Probabilité et fréquence</b>	<b>Approche quantitative</b>	<b>Probabiliste</b>
type d'erreur		taux de panne
probabilité de panne		fiabilité
fréquence d'initiation et de panne		probabilité d'occurrence des scénarios
erreur humaine		fréquence d'accident
taux de panne		probabilité de dommages
probabilité d'exposition		
<b>Politique et management</b>	déterministe 31 à 43	<b>Hiérarchisation</b>
maintenance		niveau/indice de risques
organisation		gravité/criticité
politique de sécurité		indice de feu/explosion
SMS	probabiliste 44 à 49	indice de rejet toxique
management du transport		indice de risques organisationnels
coûts des équipements		classification de types de risques
<b>Environnement</b>	déterministe et probabiliste 50 à 62	
environnement du site		
données topographiques		
densité de population		
<b>Règlementation et retour d'expérience</b>		
standards		
lois and documents		
retour d'expérience		

Tableau I.4 : Liens entre les données d'entrée, les moteurs d'analyses et les résultats (\* correspond au numéro de la méthode).

Une analyse succincte du tableau I.4 met en avant le fait que les méthodes « qualitative et déterministe », « quantitative et déterministe » et « quantitative et approche combinée » (déterministe et probabiliste) sont consommatrices d'une quantité importante de données d'entrée. Cependant, généralement, ces données sont facilement accessibles. Que la méthode soit qualitative ou quantitative, les démarches présentant un jeu de résultats le plus complet en ayant une vision globale du niveau de risques du site industriel sont celles réalisant une approche combinée. Au contraire, les méthodes d'analyse de risques probabilistes nécessitent peu de données mais donnent des résultats plus ciblés sur une partie du site et donc ne permettent pas d'avoir une approche globale de la gestion de la sécurité.

### ***III.5 Les champs d'application des méthodes d'analyse de risques***

Ces méthodes d'analyse de risques s'appliquent principalement à trois thèmes : les installations fixes, les transports de matières dangereuses, et le facteur humain (tableau I.5).

Le site industriel se démarque par rapport au transport de matières dangereuses au regard des quantités impliquées lors des accidents et par un environnement dont la cinétique d'évolution est faible. Le premier champ d'application, concernant les sites industriels est celui qui a été le plus développé. Ceci peut s'expliquer par l'importance des conséquences (en terme de dommages humains, environnementaux et économiques) susceptibles d'être engendrées par un accident majeur arrivant sur site industriel.

Ces méthodes sont généralement peu ou pas transposables à d'autres champs d'application ou bien à d'autres industries, différentes de celle pour laquelle la méthode a été développée. En effet, elles sont souvent développées pour un type d'installation spécifique. Cependant, quelques méthodologies sont assez générales pour s'appliquer à la fois aux installations fixes, aux transports de matières dangereuses et au facteur humain, mais la profondeur de l'analyse est assez restreinte. En effet, le revers d'avoir une méthode transposable à plusieurs champs d'application est que celle-ci risque d'avoir une approche globale qui ne permet pas de réaliser une analyse de risque détaillée de la situation.

		<b>Méthodes</b>	
<b>Site industriel</b>	Accident Hazard Index AHI [24] [25]	Method Organised Systematic Analysis of Risk MOSAR [7] [9]	
	Accident Sequences Precursor ASP [32]	Methodology of domino effects analysis [29]	
	SEVESO II Directive [5]	Methods of potential risk determination and evaluation [30]	
	AVRIM2 [37]	Mond Fire Explosion and Toxicity Index FETI [10] [24]	
	Checklist [10]	Optimal Hazard and Operability OptHAZOP [10] [17]	
	Chemical Runaway Reaction Hazard Index RRHI [26]	Optimal Risk Assessment ORA [10]	
	Concept Hazard Analysis CHA [9] [11]	Plant Level Safety Analysis PLSA [18]	
	Concept Safety Review CSR [9]	Potential domino effects identification [19]	
	Defi method [9]	Preliminary Risks Analysis PRA [9] [12]	
	Delphi Technique [9]	Probabilistic Safety Analysis PSA [10] [41]	
	Dow's Chemical Exposure Index CEI [27]	Profile Deviation Analysis PDA [10]	
	Dow's Fire and Explosion Index FEI [24] [28]	Quantitative Risk Assessment QRA [9] [10] [41] [42] [43] [44] [45]	
	Earthquake safety of structures and installations in chemical industries [33]	Rapid Ranking RR [13] [40]	
	Event Tree Analysis ETA [9] [12] [34] [35]	Rapid Risk Analysis Based Design RRABD [46]	
	Facility Risk Review [38]	Reliability Block Diagram RBD [9]	
	Failure Mode Effect Analysis FMEA [9] [10] [12]	Risk Level Indicators RLI [42]	
	Failure Mode Effect Criticality Analysis FMECA [9]	SAATY methodology [31]	
	Fault Tree Analysis FTA [9] [10] [12]	Safety Analysis SA [10]	
	Fire and Explosion Damage Index FEDI [24]	Safety Culture Hazard and Operability SCHAZOP [14]	
	Goal Oriented Failure Analysis GOFA [9]	Safety related questions for computer controlled plants [22] [23]	
	Hazard and Operability HAZOP [9] [10] [12] [13] [14]	Seqhaz Hazard Mapping SHM [21]	
	Hazard Identification and Ranking HIRA [10] [25]	Short Cut Risk Assessment SCRA [9]	
	IDEF3 [39] [40]	Sneak Analysis [9]	
	Instantaneous fractional loss index IFAL [10] [24]	Structural Reliability Analysis SRA [9]	
Insurers involvement in risk reduction process [15]	Toxic Damage Index TDI [24]		
International Study Group on Risk Analysis ISGRA [10]	What if? Analysis [9] [10] [12]		
Maintenance Analysis MA [9]	World Health Organisation WHO [10]		
Maximum Credible Accident Analysis MCAA [10]			
<b>Transport</b>	Checklist [10]	Hazard and Operability HAZOP [9] [10] [12] [13] [14]	
	Event Tree Analysis ETA [9] [12] [34] [35]	IPO Risiko Berekening Methodiek IPORBM [34]	
	Failure Mode Effect Analysis FMEA [9] [10] [12]	Quantitative Risk Assessment QRA [9] [10] [41] [42] [43] [44] [45]	
	Fault Tree Analysis FTA [9] [10] [12]	What if? Analysis [9] [10] [12]	
<b>Humain</b>	Action Errors Analysis AEA [9]	Safety Culture Hazard and Operability SCHAZOP [14]	
	Human Hazard and Operability HumanHAZOP [14]	Task Analysis TA [9]	
	Manager [16]	Work Process Analysis Model WPAM [36]	
	Process Risk Management Audit PRIMA [20]		

Tableau I.5 : Méthodes d'analyse de risques pour les sites industriels, le transport de matières dangereuses et le facteur humain.

### ***III.6 Les limites des méthodes d'analyse de risques***

Les méthodes citées précédemment présentent des contraintes d'application et des restrictions intrinsèques à l'approche développée. Les principales limitations peuvent être récapitulées dans les points suivants :

- Plus la méthode est générale, moins elle tient compte des spécificités du site industriel. En revanche, elle est facilement adaptable ou transposable à d'autres sites.
- Au contraire, si la méthodologie est trop spécifique, elle ne favorise pas une approche globale de la gestion de la sécurité et elle est peu ou pas du tout transposable à un autre cas.
- La constitution du groupe qui met en œuvre la méthode d'analyse de risques est importante. Les compétences des membres du groupe doivent permettre une bonne compréhension du système étudié avec une approche technique ou organisationnelle et diversifiée (implication du personnel provenant de plusieurs niveaux de la hiérarchie). Le niveau d'implication et la qualité du management du groupe sont déterminants et peuvent être des facteurs limitants pour la mise en place de la méthode.
- Pour les approches probabilistes, la validité des données est un des paramètres décisifs. En effet, la mise à jour des données d'entrée et donc des résultats est un des paramètres prépondérants pour une analyse.
- Pour certaines méthodes, la difficulté d'application réside dans le manque de description de son fonctionnement. Il serait judicieux de réaliser un guide décrivant les différents modules de la méthodologie et de présenter des exemples pour sa mise en pratique. La complexité de certaines méthodes peut nécessiter une formation spécifique ou bien une aide extérieure pour l'application de celles-ci.

- En général, les approches techniques et le facteur humain sont dissociés. Ceci peut s'expliquer par la différence de compétences nécessaires pour aborder ces deux points. Par contre, ces deux approches sont totalement complémentaires pour obtenir une gestion globale de la sécurité d'un site industriel.

### ***III.7 Le développement des nouvelles approches des méthodes d'analyse de risques***

Les méthodes développées à l'heure actuelle sont des méthodes plutôt déterministes. Elles fournissent des résultats sous la forme d'indices de risques qui hiérarchisent les différentes zones du site étudié dans le but de mettre en place des actions de prévention ou de protection sur les zones les plus critiques du site. Ces méthodes sont généralement simples d'application et rapides. Pour simplifier l'application, des tables de données sont fournies à l'équipe réalisant l'analyse, pour quantifier les différents paramètres du site. Cette phase de hiérarchisation, qui est devenue un outil essentiel à l'analyse de risque, est développée dans le paragraphe suivant.

#### **III.7.1 La hiérarchisation des risques**

La hiérarchisation consiste à organiser des éléments, des données ou des événements en une série croissante ou décroissante à l'aide de tables de classification. Cette phase a pour but de faire ressortir les points importants pour l'analyse.

#### **III.7.2 Les méthodes de hiérarchisation**

Les différentes méthodes recensées qui incluent une hiérarchisation sont répertoriées dans le tableau I.6.

<b>Méthode de hiérarchisation</b>	<b>Déterministe</b>	<b>Probabiliste</b>	<b>Combinée</b>
Accident Hazard index AHI [24] [25]	oui		
Directive SEVESO II, annexe VI [5]	oui		
Chemical Runaway Reaction Hazard Index RRHI [26]	oui		
Dow's Chemical Exposure Index CEI [27]	oui		
Dow's Fire and Explosion Index FEI [24] [28]	oui		
Fire and Explosion Damage Index FEDI [24]	oui		
Earthquake safety of structures and installations in the chemicals industries [33]		oui	
Failure Mode Effect Criticality Analysis FMECA ou AMDEC [9]			oui
Facility Risk Review FRR [38]		oui	
Hazard Identification and Ranking HIRA [10] [25]	oui		
Identification d'effet domino potentiel [29]	oui		
Instantaneous fractional loss index IFAL [10] [24]	oui		
Méthode de détermination et d'évaluation du risque potentiel [30]	oui		
Mond Fire Explosion and Toxicity Index FETI [10] [24]	oui		
Probabilistic Safety Analysis PSA [10] [41]		oui	
Risk Level Indicators RLI [42]			oui
SAATY method [31]	oui		
Seqhaz Hazard Mapping SHM [21]	oui		
Toxic Damage Index TDI [24]	oui		

Tableau I.6 : Méthodes d'analyse de risques permettant une hiérarchisation

Les méthodes d'analyse de risques incluant une hiérarchisation sont quasiment toutes quantitatives et pour une grande partie déterministes. Elles sont principalement basées sur le calcul d'un indice de risque attribué à chaque élément, unité ou zone dans le but de les classer les uns par rapport aux autres. Ce classement facilite l'identification des zones réellement critiques où il est nécessaire de mettre en place des actions prioritaires pour diminuer le risque (prévention) ou réduire les conséquences d'un accident majeur (protection).

Pour calculer cet indice, on définit, en général, plusieurs variables. Ces dernières caractérisent le site et les procédés mis en jeu et englobent l'ensemble des facteurs de risque présents. Ces variables sont ensuite classées à l'aide d'échelles de valeurs qui sont basées sur une approche déterministe ou probabiliste.

### III.7.3 Les différents types d'échelles

Les échelles de hiérarchisation des risques peuvent être déterministes ou probabilistes, selon le type de données utilisées pour réaliser le classement.

Les échelles déterministes sont quantitatives et qualitatives, et sont basées sur différentes variables, par exemple :

- les types de réaction (oxydation, réduction, hydrolyse, ...).
- les paramètres d'une réaction (stabilité, réactivité, énergie d'une réaction d'un point de vue de son caractère exothermique ou bien endothermique, pression, température, ...).
- les propriétés physico-chimiques d'un produit, sa toxicité avec une corrélation de dose/effet et les incompatibilités chimiques vis à vis d'autres produits.
- les quantités impliquées et les caractéristiques de stockage (pression, température, ...).
- les types de dommages aux personnes (surpression, flux thermique, toxicité).
- les types de dommages aux biens.
- les types de dommages à l'environnement ou à l'écosystème.
- les types de pertes financières (sur les structures, sur la production, ...).
- les distances entre les différentes unités dangereuses d'un site.
- les densités de population dans et à l'extérieur du site.

Les échelles probabilistes sont quantitatives et basées sur différentes variables telles que :

- les fréquences d'apparition d'un événement indésirable,

- les fréquences d'incidents et d'accidents à l'aide de la prise en compte du retour d'expérience,
- les probabilités des conséquences (morts, dégâts aux structures, pollution du sol ou de l'eau, ...)

Les diverses échelles ont été développées pour un type d'application, en tenant compte de ses spécificités pour analyser l'ensemble des risques présents sur le site et les classer de manière cohérente. Pour généraliser une échelle de hiérarchisation, la liste des facteurs influant sur le risque doit être exhaustive pour les différents types d'applications auxquelles elle est destinée. En effet, une échelle de hiérarchisation conditionne le type de résultat obtenu par la méthode, plus celle-ci sera complète, plus la méthode donne des résultats se rapprochant de la réalité.

#### **IV Les méthodes d'analyse de risque basées sur les indices**

Les évolutions récentes des méthodes d'analyse et d'évaluation des risques se basent sur le développement d'indices qui caractérisent les différentes entités du système (site industriel et environnement de celui-ci). Les objectifs des indices peuvent être ciblés sur le site industriel comme ceux caractérisant la sévérité, ou bien sur la caractérisation de l'environnement en tant que milieu de propagation ou en tant que milieu récepteur.

Dans ce paragraphe, les méthodes basées sur des indices sont décrites de manière succincte, dans le but de mettre en avant les idées phares et leur utilisation. Dans un second temps (paragraphe IV), une synthèse, concernant les méthodes d'analyse de risques, est présentée dans le but d'extraire les points principaux qui peuvent avoir un impact sur ce travail.

Les méthodes d'analyse de risques basées sur les indices, présentées ci-dessous, sont classées en fonction du type d'indice abordé. Principalement, deux types d'indices sont construits, l'un concernant la gravité couplé généralement au flux de propagation d'accident et la deuxième concernant la vulnérabilité des cibles soumises aux effets des accidents majeurs. Dans la dernière partie de ce paragraphe, les différents modes d'agrégation des indices précédemment décrits sont présentés.

## ***IV.1 La gravité et le flux***

Les méthodes d'analyse de risques basées sur les indices couvrent plus ou moins le champ d'investigation des accidents majeurs qui correspondent :

- aux explosions,
- aux incendies,
- aux dispersions de gaz toxiques,
- aux pollutions dans les milieux aquatiques et terrestres.

L'indice qui caractérise la gravité des accidents majeurs générés par le site industriel, est abordé de diverses façons selon les auteurs. Au travers des différentes méthodes décrites brièvement ci-dessous, plusieurs modes d'évaluation de l'indice de gravité sont abordés. Les grandes classes d'indices correspondent à :

- l'indice feu – explosion,
- l'indice toxique,
- l'indice qualifiant le type de structure contenant la substance dangereuse,
- l'indice tenant compte de la quantité de substance dangereuse mise en jeu.

Les deux premières classes indices portent essentiellement sur le type de phénomène accidentel alors que les deux suivantes portent sur les caractéristiques de stockage.

Dans la plupart des méthodes, la notion de flux est implicite, elle est en fait comprise dans l'indice de gravité, par exemple, par l'intermédiaire de la prise en compte d'une distance d'effet.

Certaines de ces méthodes proposent un jeu d'indices caractérisant simultanément plusieurs types d'accident (paragraphe IV.1.1), d'autres sont uniquement spécifiques à un type d'accident (paragraphe IV.1.2 et IV.1.3).

### **IV.1.1 Les méthodes multi – accidents**

Ces méthodes proposent de calculer de nombreux indices permettant la caractérisation de plusieurs phénomènes accidentels.

#### IV.1.1.1 Indice de danger d'accident - Indice AHI (Accident Hazard Index) [24] [25]

Trois effets sont retenus par les auteurs : le flux thermique, les surpressions et les rejets toxiques. Pour chacun de ces phénomènes, un facteur R est calculé et un abaque spécifique corrèle ce facteur au niveau de gravité. Pour les flux thermiques et les surpressions, le facteur R est une fonction de la quantité de substance dangereuse impliquée et de son énergie de combustion. En ce qui concerne les rejets toxiques, le facteur est une fonction de la quantité de substance dangereuse rejetée pendant un temps donné par rapport au seuil de toxicité correspondant à la concentration létale 50% (LC<sub>50</sub>). Ces trois indices de gravité ont des valeurs comprises entre 0 et 10. Pour les trois indices de gravité, le danger caractéristique d'une substance est pris en compte en se basant sur l'approche NFPA [28] qui permet une caractérisation de la dangerosité d'une substance en fonction de sa réactivité et de sa capacité d'inflammation.

#### IV.1.1.2 Indice permettant d'établir le potentiel danger d'un accident en fonction des propriétés des substances dangereuses [48]

Les auteurs définissent le potentiel de danger comme la somme des contributions dues aux propriétés dangereuses de la substance et à la masse impliquée. Les mesures techniques et organisationnelles sont intégrées au calcul pour obtenir la valeur du potentiel danger réel. Les auteurs proposent quatre catégories pour évaluer le potentiel danger sachant que, pour une substance présentant plusieurs types de danger, seule la propriété la plus dangereuse est retenue. Les catégories sont les suivantes :

- mobilité : prise en compte de la volatilité ou la possibilité de générer une autre phase au vu des conditions opératoires)
- feu/explosion : quantification de l'énergie relâchée. Cette énergie correspond à la différence entre la température de flash et la température du process multipliée par l'enthalpie de combustion
- réaction de décomposition
- toxicité aiguë

Les indices se référant à un seuil sont calculés de manière différente. Par exemple, si on considère un rejet de gaz toxique, la concentration est divisée par un seuil de concentration pour lequel les effets irréversibles pour l'homme ne sont pas observables. Les facteurs techniques et organisationnels, sont pris en compte pour évaluer un potentiel danger et

permettent de diminuer la valeur des indices de gravité en fonction de jugements réalisés par des experts.

Les méthodes basées sur les indices peuvent être aussi plus spécifiques et en s'intéressant uniquement à une catégorie d'accident.

#### IV.1.2 Les méthodes pour les accidents de type feux - explosions

##### IV.1.2.1 Indice de sévérité pour les feux et les explosions - Indice Dow Fire and Explosion (FEI) [24] [28]

L'indice Dow FEI (Fire and Explosion Index) évalue une perte réaliste maximale qui correspond à un scénario d'accident susceptible de se produire dans des conditions opératoires dégradées. Le champ d'application de cette méthode porte sur toutes les opérations où un produit inflammable ou réactif peut être mis en œuvre, stocké ou déplacé. L'indice FEI est composé d'un facteur de danger et d'un facteur de matière. Le facteur de danger permet de prendre en compte à la fois les dangers généraux de procédé (type de réaction et type de produit chimique utilisé) contribuant à la gravité d'un accident, mais aussi des facteurs de dangers spécifiques de procédé (conditions opératoires, de stockage ou de transfert) qui correspondent à des facteurs contribuant à la probabilité d'un incendie ou d'une explosion.

Le facteur de danger de l'unité est égal à la multiplication du facteur de dangers généraux par le facteur de dangers spécifiques.

Le facteur de matière représente une énergie potentiellement libérable à partir d'un incendie ou d'une explosion. Ce facteur est évalué à partir des valeurs de Nr et Nf développées par la NFPA [27] qui expriment l'inflammabilité et la réactivité d'une substance. Un ensemble de règles concernant les mélanges de substances est préétabli et une correction en fonction de la température est proposée.

L'indice FEI s'obtient en multipliant le facteur matière (correspondant à l'énergie susceptible d'être libérée) par le facteur de danger issu de l'unité étudiée.

##### IV.1.2.2 Indice de sévérité des dommages pour les feux et les explosions - Indice FEDI (Fire and Explosion Damage Index) [24]

La démarche mise en place pour évaluer l'indice FEDI est constituée de cinq étapes qui sont :

- la classification des installations parmi les cinq catégories présentées ci-dessous,
- l'évaluation des facteurs d'énergie,
- l'attribution des pénalités,
- l'estimation des dangers potentiels,
- l'estimation de l'indice FEDI.

Les cinq catégories d'installation sont classées de la façon suivante :

- unité de stockage,
- unité impliquant des opérations physiques, comme les transferts de chaleur, de masse, de charge et les pompes et compression,
- unité impliquant des réactions chimiques,
- unité impliquant un transport,
- autres unités dangereuses comme les fours, les chaudières, les échangeurs de chaleur, ...

Pour chaque catégorie d'unités, l'indice FEDI peut être évalué.

Pour les **unités de stockages**, l'indice est une fonction de trois facteurs d'énergie (physique et chimique). Le facteur F1 (énergie chimique) est fonction de la masse ou du taux de rejet et de la chaleur de combustion de la substance considérée. Les facteurs F2 et F3 (énergie physique) sont des fonctions dérivées du phénomène d'expansion isentropique des gaz et liquides pressurisés. Le facteur F2 est une fonction de la pression du process et du volume de matière impliqué. Le facteur F3 est une fonction de la température, de la pression de process, de la tension de vapeur et du volume de matière impliqué.

De plus, il est nécessaire de prendre en compte des facteurs de pénalités concernant la température et la pression. La pénalité température tient compte du point de flash, de la température d'auto inflammation, et de la condition de température opératoire. La pénalité concernant la pression dépend des conditions opératoires de pression, de la pression de vapeur saturante, et de la pression atmosphérique.

La combinaison linéaire de l'ensemble de ces facteurs permet d'établir l'indice de dommages potentiels. Il est construit de la manière suivante :

- Les facteurs d'énergie chimique et physique sont multipliés par leurs pénalités respectives. Ces résultats sont sommés.
- La somme précédente est multipliée par les quatre autres pénalités qui décrivent l'environnement de l'unité étudiée.
- A partir de cet indice de dommages potentiels, l'indice FEDI se calcule grâce à une loi polynomiale proposée par les auteurs du type  $a.X^b$ .

Pour les **unités impliquant des opérations physiques**, l'indice est une fonction des trois facteurs d'énergie cités précédemment (unités de stockage). Pour la température et la pression, les valeurs de pénalités sont plus importantes que les précédentes. Par contre, les pénalités induites par la quantité de produit, les caractéristiques chimiques et la densité des unités sont identiques à celles calculées pour les unités de stockages. Les indices de dommages potentiels et l'indice FEDI sont également évalués de la même manière.

Pour les **unités impliquant des réactions chimiques**, l'indice est une fonction de quatre facteurs et huit pénalités. Les trois facteurs d'énergie et les six pénalités décrits précédemment sont pris en compte. Un nouveau facteur d'énergie, basé sur la chaleur de réaction et la masse, est introduit. Ce facteur d'énergie est corrigé par deux pénalités. La première prend en compte le type de réaction et la deuxième, la probabilité de réalisation et le type de réactions secondaires indésirables. Pour évaluer le dommage potentiel, la somme des facteurs d'énergie pondérés par les pénalités spécifiques est réalisée. Ce résultat est alors multiplié par les autres pénalités. L'indice FEDI, pour cette catégorie d'installation, est calculé suivant la loi développée précédemment.

Pour les **unités impliquant un transport**, l'indice est une fonction des trois facteurs d'énergie précédents. Par contre, en ce qui concerne les pénalités, elles portent sur la pression de transport, la quantité transportée, sur les caractéristiques chimiques d'inflammabilité et de réactivité, sur l'état physique du produit transporté (gaz, gaz liquéfié sous pression, liquide ou fines particules solides), sur la localisation de la plus proche unité dangereuse et sur la densité des unités. L'indice de dommage potentiel et le FEDI sont calculés comme cela a été vu précédemment.

Pour les **autres unités dangereuses**, l'indice est une fonction d'un facteur d'énergie unique. Ce dernier concerne l'énergie chimique du produit et est associé à trois pénalités spécifiques :

- l'une tenant compte de sa réactivité et de son inflammabilité,
- la seconde dépendant de l'état physique du produit,
- et la troisième basée sur la quantité corrélée au facteur d'inflammabilité NF.

Les autres pénalités, l'indice de dommages potentiels et l'indice FEDI sont calculés de la même manière que pour les autres catégories d'unités.

**L'indice FEDI** représente le cercle de dommages en mètres. Une table de hiérarchisation est établie pour caractériser le danger :

- $FEDI \geq 500$  extrêmement dangereux
- $500 > FEDI \geq 400$  très dangereux
- $400 > FEDI \geq 200$  dangereux
- $200 > FEDI \geq 100$  modérément dangereux
- $100 > FEDI \geq 20$  peu dangereux
- $20 > FEDI$  pas de danger

### IV.1.3 Les méthodes pour les accidents de type dispersion de gaz toxique

#### IV.1.3.1 Indice de sévérité des dommages dans le cas de la dispersion d'un nuage toxique - Indice TDI (Toxic Damage Index) [24]

L'indice Toxic Damage Index TDI permet d'évaluer les effets d'un rejet toxique sur une zone. Cette zone d'effet représente la zone où 50% de la population exposée subit un effet létal. Cet indice est fonction de la quantité de produit impliqué, de son état physique, de sa toxicité, des conditions opératoires et des caractéristiques du site. Les conditions atmosphériques sont considérées stables par hypothèse, cela correspond en fait à une approche majorante. Le TDI est constitué d'un facteur fondamental et de plusieurs pénalités. Le facteur fondamental se base sur des conditions de rejet (flash, évaporation de flaque, type de rejet, état du produit) et du taux de rejet.

Les pénalités tiennent compte des conditions opératoires de température et de pression, de la densité de vapeur, de la toxicité et des caractéristiques du site. Pour la pénalité température, un ensemble de règles est établi en fonction de la température ambiante, de la température de

flash, de la température du produit. Pour la pénalité pression, les règles dépendent de la tension de vapeur, et de la valeur de la pression opératoire du produit par rapport à la pression atmosphérique. La pénalité de densité de vapeur se base sur celle du produit par rapport à l'air ce qui permet de caractériser son comportement lors de la dispersion (si c'est un gaz lourd, la dispersion sera moins rapide et se fera à un niveau proche du sol). La pénalité toxicité chimique est une fonction de l'indice « health hazard NH » de la NFPA [27]. La pénalité caractéristique du site s'intéresse à la présence de cibles humaines par l'intermédiaire de la densité de population sur la zone étudiée.

L'indice TDI est obtenu grâce à une loi polynomiale du type  $a.X^b$  où X est le produit du facteur fondamental par l'ensemble des pénalités et a et b sont deux constantes. L'indice TDI donne un résultat en mètre représentant le cercle de 50% de mortalité et une table de hiérarchisation est établie pour caractériser le danger :

- $TDI \geq 700$  extrêmement dangereux
- $700 > TDI \geq 500$  très dangereux
- $500 > TDI \geq 200$  dangereux
- $200 > TDI \geq 50$  modérément dangereux
- $50 > TDI \geq 05$  peu dangereux
- $05 > TDI$  pas de danger

#### IV.1.3.2 Méthode d'évaluation d'un seuil de toxicité pour une durée d'exposition donnée [49]

Les seuils de toxicité étant définis pour une durée d'exposition donnée, les auteurs proposent de corriger ces valeurs seuils, en fonction du temps d'exposition réel, de la manière suivante :

$$\text{Seuil}(t_1) = \text{seuil}(t_2) \times (t_2/t_1)$$

Où :  $t_2$  correspond à la durée de l'exposition et  $t_1$  à la durée d'exposition pour laquelle la valeur seuil a été établie (s).

Seuil ( $t_i$ ) est la concentration seuil pour la durée d'exposition  $t_i$  en ppm

En fait, plus la durée  $t_2$  se rapproche de celle de  $t_1$  plus le potentiel de danger de la substance se rapproche de celui correspondant au seuil de toxicité spécifié.

Les auteurs proposent également de calculer une valeur totale de danger, qui est une fonction des effets sur l'homme et des effets sur l'environnement dont on fait la somme. Cette dernière est multipliée par un facteur d'exposition.

Les effets sur l'homme dépendent de quatre variables qui sont :

- une valeur de danger de toxicité orale,

- une valeur de danger de toxicité par inhalation,
- une valeur de danger pour les effets cancérigènes,
- et une valeur de danger de toxicité chronique.

De la même façon, les effets sur l'environnement sont quantifiés par :

- une valeur de danger de toxicité animale,
- une valeur de danger de toxicité aiguë pour les poissons,
- et une valeur de danger de toxicité chronique pour les poissons.

Pour évaluer chacune des variables de danger, les auteurs se réfèrent aux jeux de valeurs seuils disponibles dans la littérature.

Pour quantifier le facteur d'exposition, les auteurs proposent de retenir :

- une valeur de danger fonction de la biodégradation,
- une valeur de danger fonction de la dégradation par hydrolyse,
- et une valeur de danger fonction de la bio-concentration.

Il est intéressant de remarquer que, d'un côté, on détermine un potentiel par rapport à des valeurs seuils et que la somme de ces potentiels dangers est effectuée, c'est-à-dire que l'on attribue le même facteur de pondération à l'homme et à l'environnement. D'autre part, ce potentiel danger est multiplié par un facteur d'exposition qui traduit le phénomène de propagation d'un danger dans un milieu spécifique.

#### IV.1.3.3 Proposition de seuils d'effet pour une libération de gaz toxique [50]

Les auteurs construisent un indice de toxicité représentant un nombre d'unités toxiques en divisant la concentration d'une substance par sa concentration létale 50% (LC<sub>50</sub>) représentant un seuil de concentration où 50% de la population exposée meurt.

#### IV.1.3.4 Indice de sévérité pour une exposition à un gaz toxique - Indice Dow Chemical Exposure (CEI) [27]

L'indice CEI (Chemical Exposure Index) permet de quantifier le danger potentiel de l'effet d'un rejet toxique sur l'homme. Les auteurs proposent un jeu de formules pour quantifier le

rejet gaz/liquide et le phénomène de flash. Les hypothèses utilisées sont une direction de vent établie avec une vitesse de 5 m/s et des conditions atmosphériques neutres. L'indice est une fonction de la racine carrée du débit divisée par une valeur seuil caractéristique. A partir de cet indice, les auteurs proposent d'évaluer une distance de danger spécifique au seuil utilisé pour établir une zone de danger.

#### IV.1.4 Les méthodes tenant compte de l'emballement de réaction

##### IV.1.4.1 Indice spécifique à l'emballement de réaction - Indice RRHI [26]

L'indice RRHI (the Runaway Reaction Hazard Index) permet d'évaluer le risque d'avoir un emballement de réaction au cours d'un process. L'indice est une fonction de 6 variables qui sont la stabilité, la réactivité, l'enthalpie de la réaction, l'importance de l'énergie potentielle du process par type de réaction, la valeur de risque d'un process en fonction du type de réaction et les facteurs de sécurité d'un process. Chacun de ces indices est évalué grâce à un ensemble de tables.

Pour le facteur de stabilité thermique de la matière, les auteurs proposent des règles d'attribution basées sur le gradient de température et l'augmentation de la température adiabatique.

Pour le facteur de réactivité, les auteurs se sont basés sur l'approche de la NFPA [27]. Cinq classes de réactivité de produit sont proposées qui vont de la classe 0 (pour, entre autres, des produits stables même en présence d'incendie) à la classe 5 pour des produits susceptibles de générer des décompositions explosives ou des réactions explosives à température normale.

Pour le facteur d'exothermicité, les auteurs déterminent la chaleur relâchée par unité de masse.

Pour évaluer l'importance du facteur potentiel d'énergie d'une réaction, les auteurs proposent une table répertoriant des types de réactions qui sont classées en fonction de l'importance de l'énergie susceptible d'être relâchée (cf. tableau I.7).

Type de réaction	Sévérité	Facteur potentiel d'énergie
Oxydation, nitration, halogénéation, organométallique, diazotation, hydrogénation,	Très exothermique	4
Décomposition thermique, polymérisation, sulfonation, condensation,	Très exothermique ou exothermique	3-4 2-3
Amination, estérification,	Exothermique ou modérément exothermique	2
Méthylation, alkylation, hydrolyse, formation de sel	Légèrement exothermique	1
Réduction, électrolyse, isomérisation, cyclisation	Faiblement exothermique	0

Tableau I.7 : Tableau de synthèse type de réaction / sévérité / facteur potentiel d'énergie.

Pour caractériser le process et le facteur de risques associé, les auteurs proposent une typologie de systèmes :

- un procédé batch et réacteur,
- un réservoir de stockage,
- une installation multifonctions, réacteur de mélange de produit,
- un matériel de faible qualité,
- autres.

Pour caractériser le facteur de sécurité du process, les auteurs proposent :

- un système d'agitation,
- un système de refroidissement,
- un mécanisme automatique pour éviter les erreurs de mélanges,
- une information à jour,
- un manuel complet des conditions opératoires,

- un groupe énergétique pour les systèmes de contrôle,
- un système de refroidissement d'urgence fixe.

En fonction du type de système de sécurité, une valeur est attribuée empiriquement au facteur de sécurité.

L'indice RRHI est finalement une combinaison linéaire des six paramètres précédents. Il est obtenu en multipliant les termes de caractérisation des produits et des réactions par le quotient des facteurs de risques sur les facteurs de sécurité. Cet indice donne un résultat avec six niveaux allant de risque très élevé à risque très bas.

#### IV.1.5 Les méthodes prenant en compte la quantité de substance dangereuse

##### IV.1.5.1 Méthode définissant le concept de masse critique [51]

Les auteurs définissent un indice de masse critique qui correspond au quotient de la masse (ou débit) de substance rejetée divisée par une valeur seuil spécifique à la substance émise. Cela permet de créer une échelle de dangerosité de l'accident en fonction de la quantité de substance mise en jeu.

##### IV.1.5.2 L'échelle de gravité des accidents [52] [53]

Les auteurs proposent d'évaluer la gravité et plus particulièrement le facteur d'aggravation dû à la quantité de matière dangereuse en se référant à des valeurs seuils. Ces seuils correspondent à ceux présents dans les annexes des directives Seveso [5].

### ***IV.2 Le Flux de propagation des accidents majeurs***

#### IV.2.1 Méthode permettant d'identifier et de quantifier la propagation des accidents majeurs dans l'environnement [54]

La notion de chemin de transmission de l'accident majeur permet de caractériser l'évolution de ce dernier dans le milieu environnant, à savoir où et comment il se propage dans l'environnement et surtout de quelle manière il s'atténue.

Pour les radiations thermiques et les ondes de surpression, l'atténuation est une fonction de type  $1/x^2$  (où  $x$  est la distance à la source de danger). Pour les phénomènes de rejet accidentel de gaz toxique et de liquide toxique, il est nécessaire de prendre en compte la notion de distance, de direction et de vitesse de transport. La dose incidente reçue par le récepteur est une fonction de la dose incidente initiale multipliée par un facteur prenant en compte le chemin de transmission de l'accident majeur (facteur compris entre 0 et 1). Si la valeur est égale à 1, il y a une transmission complète du phénomène considéré. Une valeur comprise entre 0 et 1, représente la capacité de l'environnement à atténuer le phénomène. Cette valeur est multipliée par un facteur de pondération pour tenir compte de la présence de barrières actives ou passives (facteur compris entre 0 et 1).

Cette liste de méthodes basées sur les indices, présentées dans les paragraphes IV.1 et IV.2, caractérise la gravité des accidents majeurs générés par un site industriel et également l'évolution des effets d'un accident dans l'environnement au travers du flux de propagation. Ceci répond à une première partie du problème en quantifiant le potentiel danger de l'accident. Dans un second temps, pour atteindre une estimation du niveau de risque, il convient de prendre en compte l'environnement du site industriel en tant que cible susceptible d'être affectée par les effets des accidents majeurs.

### ***IV.3 La prise en compte de l'environnement d'un site industriel***

Pour intégrer l'environnement d'un site, il est nécessaire de caractériser les cibles présentes dans la proximité de celui-ci et donc soumises aux effets des accidents majeurs. Deux approches complémentaires sont généralement proposées, permettant l'une de qualifier le type de cibles en présence et la seconde de quantifier ces cibles.

#### **IV.3.1 Indice de danger d'accident - Indice Accident Hazard AHI [24] [25]**

La prise en compte de la présence de cibles humaines, environnementales et matérielles est traduite au travers d'un facteur de pénalité qui dépend :

- pour les cibles humaines, de la densité de population de la zone touchée,
- pour les cibles environnementales :

- ✓ pour les effets directs (c'est-à-dire à cinétique rapide), de la surface touchée,
  - ✓ pour les effets indirects (ceux dont les effets sont retardés ou à cinétique lente) de la quantité de substance rejetée dans le milieu
- pour les cibles matérielles, de la valeur par unité de surface.

Le facteur de pénalité est obtenu grâce à un abaque respectif à chaque type de cibles. Cette pénalité a une valeur comprise entre 0 et 1.

#### IV.3.2 L'échelle de gravité des accidents [52] [53]

La quantification de la vulnérabilité est réalisée en tenant compte du volume d'eau pollué, de la surface de sol polluée et de la longueur de cours d'eau à décontaminer.

#### IV.3.3 Méthode définissant une échelle d'évaluation du potentiel danger [55]

Une échelle d'évaluation du potentiel danger d'un accident est proposé et est constituée de quatre classes :

- dommages sur l'homme,
- dommages à l'environnement,
- dommages aux équipements,
- pertes économiques.

#### IV.3.4 Méthode proposant une typologie d'impacts pour la définition d'un risque acceptable [56]

Le risque est défini comme étant le produit des conséquences par une probabilité de panne. Les conséquences sont exprimées soit en terme de nombre de morts soit en terme de coûts financiers. Le risque est évalué et comparé à un niveau de risque acceptable. Pour définir un

niveau de risque acceptable, une liste d'items permettant d'évaluer le potentiel de perturbation est proposée. Ces items correspondent, en fait à des types d'impacts qui sont :

- sociaux,
- politiques,
- culturels,
- économiques,
- éthiques/ moraux,
- environnementaux.

#### IV.3.5 Méthode définissant une typologie de cibles pour évaluer la vulnérabilité [57]

L'auteur présente une typologie des cibles en six catégories :

- le tissu industriel,
- l'habitat,
- l'espace vert,
- l'hydrographie,
- la voirie principale,
- le tissu ferroviaire.

Cette approche qualifie le type de cibles à prendre en compte pour évaluer la vulnérabilité.

#### IV.3.6 Méthode permettant de prendre en compte la vulnérabilité d'un point de vue dynamique [58]

Pour caractériser le nombre de personnes susceptibles de subir l'influence d'un accident majeur, le nombre de personnes présentes ou la densité de population peuvent être pris en compte. Il peut être remarqué que la distribution de la population pour une zone donnée varie en fonction de la période de la journée (jour/nuit).

Après avoir évalué les indices propres au site industriel et à son environnement, il faut s'intéresser aux types d'agrégation à effectuer entre les différents indices pour aboutir aux niveaux de risque et également aux échelles permettant de le quantifier.

#### ***IV.4 La construction des indices de risque***

Cette partie aborde la représentation des résultats et la manière d'associer les différents indices pour construire la fonction globale de risque.

##### **IV.4.1 Indice de danger d'accident - Indice Accident Hazard AHI [24] [25]**

L'indice de risques (AHI) est une fonction des dommages potentiels et des impacts directs ou indirects. Pour calculer celui-ci, la racine carrée de la somme des indices au carré est proposée. L'échelle de valeur de l'indice de risques est composée de cinq niveaux :

- 0-1 : opération normale (risque mineur),
- 1-3 : incident (risque faible),
- 3-5 : accident (risque élevé),
- 5-8 : accident sévère (risque sévère),
- 8-10 : catastrophe (risque extrêmement sévère).

##### **IV.4.2 Indice de hiérarchisation des dangers - Indice Hazard Identification and Ranking HIRA [10] [25]**

L'indice permet de hiérarchiser des installations industrielles, en leur attribuant un niveau de risque. L'indice HIRA se base sur les indices FEDI et TDI et propose, au final, des résultats distincts en fonction du phénomène accidentel. Il n'y a pas d'agrégation des indices pour obtenir un niveau de risque global pour l'ensemble du site étudié.

##### **IV.4.3 Méthode de détermination et d'évaluation d'un risque potentiel [30]**

L'indice risque potentiel est fonction de la substance dangereuse impliquée (quantité et propriétés) et des caractéristiques des installations. Cet indice prend pour référence une situation standard acceptable et il représente la différence entre celle-ci et une situation envisagée. L'échelle de hiérarchisation est constituée de trois niveaux :

- situation ne correspondant pas à une situation critique (la situation envisagée présente des risques moins importants que la situation standard),

- situation présentant un potentiel résiduel (la situation envisagée présente un potentiel de danger équivalent à une situation standard),
- situation présentant un potentiel élevé (la situation envisagée présente un potentiel supérieur à la situation standard).

#### IV.4.4 Méthode proposant une approche spatiale du niveau de risque [58]

Les auteurs définissent un indice caractérisant l'effet de l'influence d'un accident majeur sur la population. Cet indice dépend de l'intensité de l'influence et du nombre de personnes subissant l'influence. Ce premier indice est alors corrigé par une variable temps pour prendre en compte la durée du phénomène, dans le but d'obtenir l'indice d'influence global.

#### IV.4.5 Méthode d'analyse de risque avec une prise en compte de l'efficacité du management [59]

Les auteurs développent une méthode d'analyse de risques basée sur quatre principes :

- L'importance du risque qui englobe les coûts, les bénéfices et la perception du risque. Cela permet de mettre en avant l'intérêt de l'utilisation de moyens de protection,
- Les dommages ou les conséquences sur les cibles sont abordés,
- La signification du risque qui est caractérisée par la probabilité de dommage et la capacité de l'environnement à se régénérer,
- L'incertitude qui est représentée par la probabilité d'occurrence des phénomènes.

Les auteurs font remarquer qu'il est important de se focaliser sur les accidents majeurs et de mettre en œuvre une méthodologie intégrant les moyens de sécurité. Par ailleurs, ils insistent sur l'intérêt de développer de telles méthodes pour faciliter le dialogue entre les autorités compétentes et les industriels. En effet, plus les données servant à réaliser l'évaluation du risque sont traitées dans leur globalité, plus les résultats sont proches de la réalité.

#### IV.4.6 Méthode d'évaluation des risques liés aux process [60]

L'auteur propose les grandes lignes d'une démarche d'analyse d'un système mettant en jeu un process chimique. Il s'intéresse tout d'abord à sa fonction, à son comportement, à sa structure, et à la propriété des matériaux du système. Le schéma d'analyse du process chimique porte sur les dysfonctionnements de celui-ci et leurs relations avec les déviations, sur l'arrangement spatial des unités et sur l'établissement d'une liste comprenant l'ensemble des fonctions de sécurité et de contrôle. Les barrières mises en place sont des barrières de prévention ou de protection.

#### IV.4.7 Méthode d'évaluation des risques base sur le concept source –flux – récepteurs et barrières [54]

Le système, qui est constitué à la fois du site industriel et de son environnement, est découpé en quatre entités : la source, les récepteurs, les chemins de transmission et les barrières (passives ou actives).

Les auteurs définissent la notion de dose incidente d'énergie ou de matière avec une prise en compte du temps d'exposition et de la surface d'action de l'accident qui est corrigée par une fonction de flux pour atteindre le niveau de risque.

### **V Synthèse des concepts sur les méthodes d'analyse de risque**

La description de l'ensemble des méthodes d'analyse de risques précitées permet d'établir un ensemble de recommandations qui portent sur la démarche générale, et sur la constitution des différents indices (gravité, flux de propagation, vulnérabilité et management).

#### ***V.1 La démarche générale et les grands principes***

La plupart des grands principes qui servent de base au développement d'une méthode d'analyse de risque sont synthétisés dans ce paragraphe.

Un des postulats de l'analyse de risque est que la variable risque est une fonction des aléas et des enjeux, c'est-à-dire qu'elle doit prendre en compte à la fois le phénomène dangereux et la

présence de cibles susceptibles d'être affectées par les effets de l'accident majeur. Pour tenir compte de ce postulat, il est nécessaire de mettre en œuvre une démarche formalisée.

Dans un premier temps, une approche classique, pour débiter une analyse de risques, correspond à l'élaboration d'un schéma fonctionnel de l'établissement avec une approche par systèmes et sous-systèmes. Ainsi, l'établissement est découpé en différentes zones qui correspondent à un système susceptible de générer un danger ; ce dernier est à nouveau découpé en sous-systèmes. Le passage par les sous-systèmes donne une vision assez précise du mode de fonctionnement de l'unité étudiée et facilite la compréhension des différentes interactions et déviations susceptibles de se produire au sein du système considéré [7], [60], [61]. Le découpage d'un site industriel peut également se faire en fonction du type d'utilité des différentes unités (service, extraction, fabrication, process) ou bien en se basant sur les items produits, procédés, équipements et circuits annexes et équipements de transport [54]. Cette démarche formalisée est une approche compréhensive et exhaustive du site industriel, elle permet notamment d'obtenir les arbres de causes et conséquences ou le système de boîte noire développé dans la méthode MOSAR [7], [29].

Une des hypothèses fondamentales est de se focaliser uniquement sur les accidents majeurs [59]. Par accident majeur, il est sous-entendu que les conséquences sont considérées comme graves pour le site industriel lui-même et/ou pour son environnement. A cette première hypothèse, il est nécessaire d'ajouter la notion de danger aiguë et non pas chronique.

De manière générale, le niveau de risques d'un site industriel est une fonction de plusieurs critères qui sont les suivants [54] :

- le site industriel (source),
- le milieu de propagation (voies de transmission),
- l'environnement en tant que cible (récepteur),
- l'ensemble des actions ou démarches mises en place en vue de limiter les conséquences d'un accident majeur (barrières).

Le potentiel danger réel correspond au potentiel danger corrigé par l'influence des mesures techniques et organisationnelles [48].

Les barrières de sécurité peuvent être de deux types, celles de prévention qui diminuent la probabilité d'occurrence d'un accident, et celles de protection influant sur la gravité des conséquences par une atténuation de l'intensité du phénomène accidentel (diminution du potentiel danger).

Pour établir un niveau de risques, il est nécessaire de disposer de la distribution spatiale des cibles [58]. En effet, une installation peut engendrer un accident majeur de très forte gravité mais si peu de cibles sont exposées du fait des caractéristiques de l'environnement, le niveau de risque peut être considéré comme faible. Le risque peut être alors évalué comme la somme des effets sur l'homme et l'environnement multiplié par un potentiel d'exposition [49].

Pour prendre en compte la distribution spatiale des cibles, la zone d'étude autour d'un site peut être découpée classiquement sous la forme d'un maillage, où l'on définit un ensemble de mailles de taille identique. Chacune de ces mailles contient des cibles qui sont susceptibles de subir les effets d'un accident dont l'intensité dépend entre autre de la distance source-maille. Dans le but de réaliser une analyse plus fine, il est possible de réduire ou augmenter la taille de ces mailles en fonction de la proximité de la source de danger.

Le flux de propagation d'un accident majeur peut être géré en tenant compte de l'isotropie des phénomènes accidentels (explosion, incendie) ou de l'anisotropie de ceux-ci (libération de substances toxiques) [54]. Dans ce dernier cas, une direction préférentielle de propagation peut être définie, cette approche cible de manière plus précise les zones affectées par l'accident majeur.

Du point de vue de la réglementation, la directive européenne 96/82 CE dite Seveso II spécifie la nécessité de prendre en compte la notion d'effet domino [5]. Il est intéressant d'élargir cette notion d'effet domino à d'autres types d'aléas. En effet, il est pertinent de quantifier l'influence d'un risque naturel (feux de forêts, inondations, séismes, mouvements de terrain, ...) sur un site industriel. Mais il faut également prendre en compte à la génération d'effet domino inter risques comme le déclenchement d'un feu de forêt (risques naturels) susceptible d'atteindre des cibles, à partir d'un accident majeur induit par un site industriel ou par le transport de matières dangereuses (risques technologiques) [62].

Dans la suite de ce chapitre, les indices nécessaires à la construction du niveau de risques sont détaillés de manière plus précise. Ils sont au nombre de quatre :

- l'indice de gravité portant sur la source de danger,
- l'indice de flux de propagation qui caractérise l'évolution d'un phénomène accidentel dans l'environnement,

- l'indice de management qui permet d'évaluer le niveau de sécurité d'un site industriel,
- et finalement l'indice de vulnérabilité qui a pour objectif d'identifier les cibles susceptibles d'être affectées et d'évaluer leur sensibilité face aux accidents majeurs.

Ensuite, la phase d'agrégation des indices et les types de résultats fournis sont abordés.

## ***V.2 Données sur l'indice de gravité***

L'indice de gravité caractérise le potentiel danger susceptible d'être généré par le site industriel (source de danger).

### **V.2.1 Les grands principes**

Les grands principes suivants se retrouvent dans les différentes approches présentées précédemment.

Les accidents majeurs retenus pour l'élaboration de l'indice de gravité sont les suivants [5], [48], [50], [52], [54] :

- les explosions
- les incendies
- les dispersions de gaz toxiques
- les pollutions du milieu naturel

Pour chacun de ces accidents, il est nécessaire de construire un indice caractérisant la gravité. Pour évaluer la gravité totale d'un site, la somme des gravités de chaque scénario accidentel identifié peut être effectuée [48], [54], [63].

L'indice de gravité peut être une fonction des propriétés intrinsèques de la substance en considérant le type de phénomène accidentel généré. Il peut aussi dépendre d'un facteur d'aggravation dû à la structure dans laquelle la substance est utilisée, stockée ou transportée, et de la quantité mise en jeu ou bien libérée lors de la séquence accidentelle [5]. En effet, il est important de prendre en compte le couplage entre la substance dangereuse et la structure, comme les conditions opératoires de process ou bien de stockage qui induit un facteur

d'aggravation dû aux conditions spécifiques [5]. Une approche plus simple se base sur des propriétés dangereuses de la substance et la masse mise en jeu. D'autre part, la propriété la plus dangereuse d'une substance dépend de l'environnement. En effet, si une substance présente plusieurs propriétés dangereuses, celle qui a l'impact le plus important dépend des cibles susceptibles d'être exposées [48].

De manière générale, afin de caractériser la dangerosité d'une substance une hiérarchisation à deux niveaux peut être effectuée [48], [49], [50], [51], [63] :

- Un premier niveau, où une seule classe de produits est considérée, par exemple la classe des produits toxiques. A l'intérieur de cette classe, il est nécessaire d'évaluer le potentiel de toxicité d'une substance par rapport à une autre par le biais de seuils et de caractéristiques physico-chimiques (approche quantitative). La même démarche peut être mise en œuvre pour le cas de l'explosion et de l'incendie où un potentiel d'énergie libéré est calculé.
- Un deuxième niveau, où les classes de produits sont hiérarchisées de manière qualitative.

Enfin une autre approche basée sur la réglementation permet d'évaluer la dangerosité d'une substance. Par exemple, le GORSAP (Guide Orange des Sapeurs Pompiers de Genève) propose quatre classes de substances dangereuses [50] : les substances toxiques, les substances inflammables, les substances instables et explosives. Il est également intéressant de se baser sur les phrases de risques [64] pour classer les différents produits ; dans ce cas, il faut hiérarchiser l'importance de ces phrases de risques les unes par rapport aux autres.

### V.2.2 Quantité

La quantité de substance dangereuse émise conditionne l'importance du potentiel danger généré par une séquence d'accident majeur [5], [52], [53]. Pour évaluer l'importance de la quantité mise en jeu, il est possible de se référer à un jeu de valeurs seuils comme, les seuils proposés dans la directive 96/82/CE dite directive SEVESO II [5]. Par exemple, certains indices, pour évaluer le facteur d'aggravation lié à la quantité de substance dangereuse mise en jeu, sont construits sur le principe selon lequel la masse émise accidentellement est divisée par une valeur seuil, spécifique aux phénomènes considérés.

### V.2.3 Le type de contenant

L'importance du potentiel danger dépend également du type de contenant dans lequel la substance dangereuse est utilisée, stockée ou transportée. Sept catégories de type de contenant peuvent être proposées [19] :

- les stockages de produits solides,
- les réservoirs de stockages pressurisés,
- les réservoirs de stockages atmosphériques ou cryogéniques,
- les petits conditionnements,
- les équipements de dépotage,
- les équipements de process,
- les réseaux de canalisations.

Une alternative consiste à classer les types de contenant suivant l'importance des risques induits par ceux-ci. Trois catégories de types de contenant sont alors proposées :

- Risques faiblement aggravés : les stockages en solution, les bacs réfrigérés simple ou double paroi, les stockages souterrains, les conteneurs de 1 tonne de stockage en confinement.
- Risques moyennement aggravés : les conteneurs 1 tonne de stockage en plein air, les sphères sous mode cryogénique, les sphères sous talus avec confinement par bunker, les sphères sous talus avec confinement souterrain bétonné.
- Risques fortement aggravés : les sphères sous pression, les bacs sous pression, les sphères sous talus avec confinement par bâtiment classique.

Il est important de tenir compte de l'état du type de contenant, pour cela deux types de systèmes dangereux peuvent être définis, ceux en mode de fonctionnement normal et ceux en mode de fonctionnement dégradé [55].

### V.2.4 Indice incendie explosion

La caractérisation des phénomènes d'explosion et d'incendie, est réalisée en s'appuyant sur les paramètres physicochimiques des substances dangereuses. Les plus couramment cités sont les températures de process, de flash et d'ébullition par rapport à la température ambiante, la pression d'utilisation par rapport à la pression atmosphérique, et les flux de matières [48].

Pour évaluer la dangerosité des substances inflammables, l'utilisation des températures d'ébullition et de points éclairs des substances permet la définition de trois classes de danger [48] :

- si point éclair  $< 23^{\circ}\text{C}$  et température d'ébullition  $< 38^{\circ}\text{C}$  : classe de danger A.
- si point éclair  $< 23^{\circ}\text{C}$  et température d'ébullition  $> 38^{\circ}\text{C}$  : classe de danger B.
- si  $23^{\circ}\text{C} < \text{point éclair} < 38^{\circ}\text{C}$  : classe de danger C.

Une autre classification peut être établie en se basant uniquement sur le point de flash de la substance [65]. Deux classes sont alors proposées :

- $21^{\circ}\text{C} < \text{point de flash} < 55^{\circ}\text{C}$
- $55^{\circ}\text{C} \leq \text{point de flash} < 100^{\circ}\text{C}$

Enfin une autre démarche pour évaluer un indice d'explosion ou d'incendie est de quantifier l'énergie probable relâchée, en multipliant la différence entre la température de flash et celle du process par la chaleur de combustion de la substance [48]. Plus simplement, l'énergie relâchée peut être estimée en se basant sur l'équivalent TNT. Cette méthode classique d'évaluation des conséquences d'une explosion consiste à calculer une masse équivalente de TNT en fonction de la substance dangereuse mise en jeu et à en déduire les conséquences grâce à une table d'effet.

#### V.2.5 Indice de toxicité

Pour caractériser les phénomènes de dispersion de substance gazeuse toxique, l'indice peut s'appuyer sur le fait que l'impact d'un rejet toxique dépend des effets toxiques de la substance, du temps de séjour ou d'exposition et de sa distribution spatiale.

La gravité d'un rejet toxique peut être également évaluée en calculant la différence entre le seuil des effets réversibles et le seuil léthal. Cette approche permet d'évaluer la grandeur de la plage de concentrations où l'on n'observe pas d'effets létaux, mais cela correspond à une valeur relative. Par ailleurs plus le seuil de détection olfactive est élevé et proche du seuil des effets irréversibles plus le produit est considéré comme dangereux [66].

### V.2.6 Indice de pollution accidentelle

Dans une optique de simplification, seules les pollutions par des substances liquides sont traitées. Pour les phénomènes de dispersion de substance liquide toxique, plusieurs approches sont envisageables. Une première classe les substances dangereuses pour l'environnement aquatique de la manière suivante [50] :

- les substances très toxiques pour l'environnement aquatique,
- les substances toxiques ou néfastes à long terme pour l'environnement aquatique,
- les substances nocives pour l'environnement aquatique,
- les substances susceptibles d'avoir des effets néfastes pour l'environnement aquatique.

Une seconde méthode évalue l'impact d'une pollution liquide par le quotient du produit solubilité d'une substance et de son niveau de concentration maximale par rapport à une substance de référence (comme le benzène) [67].

Il est par ailleurs envisageable de cumuler les effets des rejets dans l'eau et le sol [63].

L'indice de gravité a été présenté sous diverses approches dans les chapitres précédents, il est donc, dans un second temps, intéressant de quantifier son évolution dans l'environnement par l'indice de flux de propagation.

### ***V.3 Données sur l'indice de flux de propagation***

Le flux de propagation ou vecteur de propagation permet de caractériser le transfert d'un phénomène accidentel au travers de l'environnement [54]. Il représente le lien entre les effets de l'accident et les impacts subis par les cibles et peut être fonction de :

- la distance ou de la surface d'effet. La valeur de flux est une fonction de la distance d'effet avec des facteurs correctifs qui prennent en compte les particularités de l'environnement en fonction du type d'accident considéré et du compartiment environnemental traversé (potentiomètre d'exposition).

- l'environnement en tant que milieu de propagation. Chaque compartiment environnemental (air, eau, sol) doit être caractérisé.
- la cinétique de propagation du phénomène (durée d'exposition).

Pour les phénomènes accidentels tels que l'explosion, l'incendie, et la dispersion de gaz toxique, le compartiment environnemental est l'air. Pour les pollutions liquides, deux compartiments sont susceptibles d'être affectés, l'eau et le sol [54].

Les différents modes de transfert des polluants en fonction du milieu, sont synthétisés dans le tableau I.8 [54] :

Air	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ dispersion atmosphérique</li> <li>✓ émission de poussières ou de particules du sol</li> <li>✓ volatilisation de polluant</li> </ul>
Eaux souterraines	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ lixiviation</li> </ul>
Eaux superficielles	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ ruissellement</li> <li>✓ alimentation par des eaux souterraines contaminées</li> </ul>
Sol	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ lixiviation</li> <li>✓ ruissellement, inondations</li> <li>✓ émission et déposition de poussières ou de particules</li> <li>✓ émission (gaz) dissolution et déposition</li> </ul>

Tableau I.8 : Mode de transfert des polluants en fonction du milieu.

De manière plus précise, la fonction de flux peut prendre en compte les barrières présentes dans l'environnement par l'intermédiaire d'un facteur d'atténuation. Cette fonction dépend de divers paramètres et diffère selon le phénomène accidentel [54] :

- pour les radiations thermiques, les paramètres importants sont entre autres, le facteur de vue, les conditions météorologiques,
- pour les surpressions, l'intensité est une fonction de la distance source-cible,
- pour les nuages de gaz, les grandeurs importantes sont l'intensité et la direction du vent (rose des vents) [68], ainsi que la distance source-cible.

- pour les rejets dans les cours d'eau la perméabilité et l'absorption sont des paramètres caractéristiques à retenir.
- pour le transfert de polluant dans le sol, la distance, l'existence de drainage, le type de sol et de surface et le relief sont à prendre en considération [69].

D'un point de vue spatial, l'environnement peut être découpé en zones circulaires en se basant sur les seuils d'effets. Pour chacune de ces zones, des caractéristiques de décroissance de l'intensité du potentiel danger peuvent être établies [5], [49], [50]. En complément, une approche sectorielle peut être utilisée pour découper l'environnement, dans le cas d'un phénomène accidentel anisotrope, il existe un secteur principal où l'influence est importante et des secteurs secondaires pour lesquels l'intensité de l'influence dépend des caractéristiques de l'environnement et de son éloignement par rapport au secteur principal [54].

#### ***V.4 Données sur l'indice de management***

La gestion de la sécurité du point de vue organisationnel et technique est abordée par l'indice de management. L'indice de management peut regrouper l'ensemble des barrières de sécurité (prévention et protection) ainsi que la capacité d'intervention. Les différents types de barrières sont [54] :

- les rideaux d'eau,
- les doubles enveloppes,
- les bâtiments classiques,
- les confinements souterrains bétonnés,
- le confinement par bunker,
- les murs de blast,
- les isolants thermiques, ...

En fait, les barrières physiques influent sur l'indice de flux en réduisant l'intensité du potentiel de danger.

En ce qui concerne l'organisation, les points d'étude du système de management de la sécurité sont [70] :

- la politique de gestion de la sécurité,
- l'organisation et le personnel,
- l'identification et l'évaluation des dangers,
- le contrôle,
- la gestion des modifications,

- les plans d'urgence,
- le suivi des performances et le retour d'expérience,
- l'audit et la revue de direction,
- la communication.

Un dernier type d'indice doit être abordé pour caractériser l'environnement.

### ***V.5 Données sur l'indice de vulnérabilité***

L'indice d'environnement caractérise la vulnérabilité des cibles présentes dans l'environnement du site industriel et susceptibles d'être affectées par les effets d'un accident majeur. Pour effectuer cette caractérisation, il est nécessaire d'identifier les cibles et de les quantifier.

La notion de cibles est abordée de manière équivalente par une majorité d'auteurs, en effet, ces derniers proposent généralement les catégories de cibles suivantes [53], [55], [56], [62] :

- les cibles humaines
- les cibles environnementales
- les cibles de type matériel ou équipement basées sur les pertes économiques

Une autre approche définit des catégories plus précises que les précédentes. La typologie proposée contient [57] :

- le tissu industriel,
- l'habitat,
- les espaces verts,
- l'hydrographie,
- les voiries principales,
- le réseau ferroviaire.

Cette approche fait appel aux types de cibles et non aux catégories, bien qu'il soit envisageable de classer ces dernières grâce à la première typologie développée (humaine, environnementale et matérielle).

Par ailleurs, il semble intéressant de caractériser ces cibles en fonction de la cinétique de l'effet (effet direct / effet indirect ou différé) et des types d'impacts générés [56], tels que :

- l'impact social,
- l'impact politique,

- l'impact culturel,
- l'impact économique,
- l'impact éthique ou moral,
- l'impact environnemental.

Ces impacts donnent une évaluation du potentiel de perturbation de la cible touchée.

Enfin après avoir identifié le type de cibles, il est nécessaire de les dénombrer. Pour cela, il existe plusieurs approches selon les catégories humaines, environnementales et matérielles :

- Pour les cibles humaines [5], la densité ou le nombre de personnes présentes dans une zone et également un taux de passage pour quantifier les entités du type voies de communication peuvent être retenus. L'évolution de la population en fonction de la période de la journée doit également être prise en compte.
- Pour les cibles environnementales, la surface touchée ou bien la longueur et le volume peuvent être des indicateurs pour quantifier ces types de cibles [52], [53].
- Finalement, pour les cibles matérielles, une approche économique, ou en terme d'unité de surface touchée [52], [53] peuvent permettre de quantifier ces cibles.

Après avoir caractérisé tous les indices, il est nécessaire de s'intéresser à leur mode d'agrégation.

### ***V.6 Les interactions entre les indices***

Le couplage des différents indices et surtout la construction d'un niveau de risques sont essentiels. Une démarche classique correspond à la multiplication du niveau de gravité de l'accident majeur considéré par la fonction de flux représentant la capacité de propagation d'un accident majeur au travers d'un environnement spécifique. Ce terme représente le potentiel danger que l'on peut multiplier par la fonction représentant la sensibilité de l'environnement soumis aux effets de l'accident majeur [49], [54], [58]. Ce dernier étant multiplié par un facteur représentant l'ensemble des dispositifs techniques permet d'obtenir le potentiel danger réel qui sera inférieur à la valeur initiale [48].

## ***V.7 Les résultats***

Les résultats sont globalement toujours représentés de façon similaire. Ils peuvent être sous forme numérique, comme les niveaux de risques, ils sont alors basés sur une échelle avec une représentation sous la forme de diagramme en barres. Ils peuvent être sous la forme cartographique, par l'intermédiaire de courbes d'iso risques ou bien de zones de risques. La valeur de risque calculée peut être comparée à une valeur de risque de référence dite de risque acceptable qui sera définie par les experts appliquant la méthode [56], [59].

## **VI Conclusion**

Ce rapport bibliographique a permis de présenter les différents types de méthodes utilisées en analyse et évaluation des risques que sont les méthodes :

- déterministes et qualitatives
- déterministes et quantitatives
- probabilistes et qualitatives
- probabilistes et quantitatives

Ces méthodes d'analyse et d'évaluation des risques peuvent être simples ou combinées. Une méthode combinée est composée de plusieurs méthodes simples d'analyse qui peuvent être complétées par un module de hiérarchisation des risques à l'aide d'un indice de niveau de risque par exemple. Les champs d'application de ces méthodes portent sur les installations fixes, le transport de matières dangereuses ou la prise en compte du facteur humain. Les types de résultats sont des recommandations, un indice de niveau de risque, une identification des contributeurs d'accident ou les fréquences d'occurrence des événements et des probabilités des conséquences. De manière générale, il existe une importante disjonction entre l'analyse de risque et la prise en compte du facteur humain. Les évolutions concernant les méthodes portent à l'heure actuelle sur le développement de méthodes d'analyse et d'évaluation simples et rapides à mettre en oeuvre qui sont basées sur le calcul d'un indice de niveau risque.

Différentes échelles pouvant être utilisées pour hiérarchiser les différents risques identifiés ont été répertoriées lors de l'analyse. Elles peuvent être déterministes ou probabilistes et en général sont spécifiques aux types d'installations étudiées.

L'approche par indice permet de développer une démarche cohérente pour l'analyse d'un site industriel et la prise en compte de son environnement. En effet, cette approche s'intéresse aux différentes parties du système et en évalue l'importance.

Le couplage des différents indices permet de décrire la séquence accidentelle à partir du système dangereux jusqu'aux cibles susceptibles d'être affectées. Pour caractériser le site industriel (indice de gravité), il est pertinent de tenir compte de la substance dangereuse impliquée, en la caractérisant par l'intermédiaire de données spécifiques aux effets générés, en fonction du phénomène accidentel. D'autre part, il est nécessaire de retenir la quantité de substance mise en jeu pour évaluer l'intensité du potentiel danger libéré. Il est également intéressant de caractériser la structure (stockage, process, ...) pour quantifier notamment les conditions de rejets (cinétique, temps de rejet, débit,...). Ensuite, la propagation du phénomène accidentel dans l'environnement doit être évaluée (caractérisation du milieu de propagation en fonction du phénomène accidentel). Le facteur de propagation est alors multiplié au potentiel danger libéré pour obtenir l'intensité d'exposition d'une cible présente dans l'environnement. Pour cela, l'indice de propagation est une fonction de la distance source-cible et des différentes barrières naturelles ou anthropiques présentes dans l'environnement, susceptibles d'influencer l'intensité du potentiel danger. Ce facteur correctif pourra prendre comme valeur 100% de transmission jusqu'à 0 % pour une direction de propagation donnée. Pour définir des directions préférentielles, la zone d'étude peut être découpée en secteurs et complétée par des cercles de zones d'effet (approche toile d'araignée). Cette approche permet d'être cohérent face aux phénomènes accidentels qui peuvent ne pas être isotropes [54]. Enfin, pour caractériser les cibles présentes dans l'environnement, une approche classique consiste à les diviser en trois catégories et à leur affecter une variable de dénombrement adapté (densité de population, surface touchée, coût d'une structure par exemple). Mais cette caractérisation semble être insuffisante parce qu'implicitement, les poids de chaque type de cibles sont pris égaux, et il peut être intéressant de quantifier cette sensibilité face à un phénomène accidentel [31].

**CHAPITRE 2 : METHODE D'EVALUATION D'UN NIVEAU DE RISQUE  
D'UN SITE INDUSTRIEL**

## I Evaluation du niveau de risque par accident majeur

Ce chapitre aborde le développement de la méthode d'évaluation du niveau de risques, proposée dans le cadre de cette étude, pour une installation industrielle de type Seveso II.

La directive 96/82/CE du conseil du 9/12/96 concerne la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses susceptibles d'affecter la population et l'environnement d'un site industriel.

En France, les inspecteurs des installations classées en charge de l'application de la directive 96/82/CE [5] n'ont pas actuellement de méthode d'analyse formalisée pour évaluer le risque lié aux accidents majeurs.

Une des conséquences de ce manque de méthode formalisée est que les mesures de prévention des accidents majeurs ne sont pas toujours prises en compte de manière cohérente pour la détermination des zones de sécurité.

Généralement, les zones de sécurité sont déterminées à partir du potentiel de danger de l'établissement sans prendre en compte ni :

- l'ensemble des dispositifs de sécurité et l'efficacité du système de management de la sécurité,
- l'environnement propre au site.

Il est clair que le niveau de risque que présente un site industriel dépend de la présence de cibles potentielles susceptibles d'être affectées et également des moyens mis en jeu pour limiter la probabilité d'occurrence ou bien pour limiter les conséquences d'un accident.

Dans le but d'une meilleure compréhension, prenons un exemple : deux établissements similaires, avec les mêmes produits, avec des procédés identiques et des quantités de produits équivalentes. Le premier établissement présente un niveau de sécurité élevé, tandis que le second réalise le strict minimum pour faire face aux accidents majeurs. A l'heure actuelle, en considérant uniquement le potentiel danger de l'établissement, les zones de sécurité associées à ceux ci, seront, dans le meilleur des cas, identiques alors qu'il peut y avoir des différences importantes du point de vue de l'environnement.

A cause du manque de méthode formalisée, il est impossible de comparer de manière non ambiguë le niveau de risque entre deux établissements industriels.

L'objectif de cette étude est de proposer une nouvelle méthodologie d'évaluation du risque permettant d'obtenir un premier diagnostic en se focalisant sur les accidents majeurs et en prenant en compte le site industriel et son environnement (approche globale du système site industriel et environnement). Cette méthodologie doit permettre d'aboutir à une hiérarchisation des différents sites Seveso II en France (approche quantitative et transférable aux différents types d'installations classées Seveso, basée sur le développement d'indices). Dans un premier temps, le niveau de risque ne prendra pas en compte de manière explicite les mesures de sécurité mises en œuvre par l'industriel.

### *1.1 Caractérisation du système*

Il est tout d'abord nécessaire de caractériser le système auquel va correspondre un niveau de risque. Le système considéré est composé de trois entités (figure II.1) :

- la source de danger (le site industriel),
- le flux de danger (vecteur de propagation),
- les cibles (environnement).

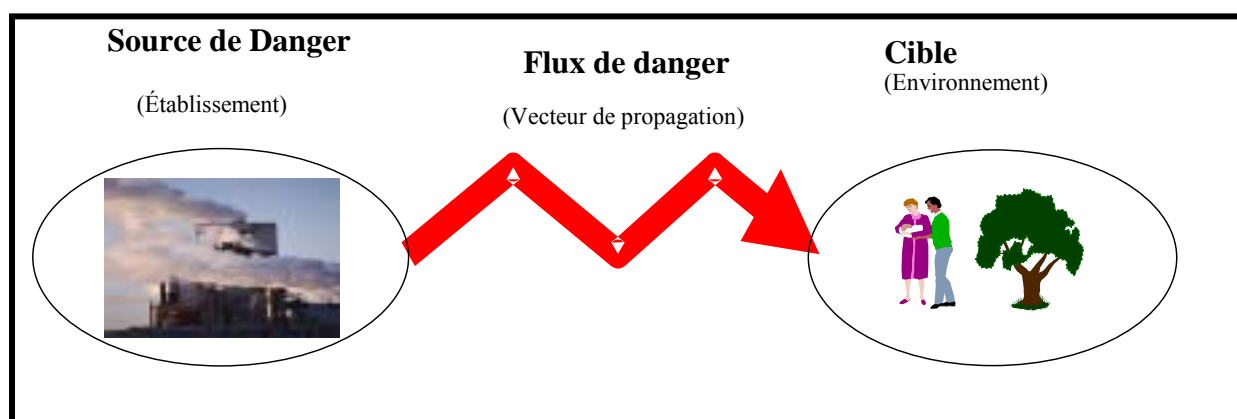


Figure II.1 : schématisation du système site industriel et environnement.

La zone d'étude permet de prendre en compte l'influence des accidents majeurs dans le but d'évaluer le niveau de risque de l'installation. En effet, cette zone d'étude est suffisamment grande pour contenir les effets des accidents majeurs. Afin de pouvoir atteindre un traitement spatial de l'information plus précis, la zone d'étude est découpée en mailles de 250 mètres de côté. Pour chacune de ces mailles, un potentiel danger et une vulnérabilité sont calculés et sont couplés pour atteindre un niveau de risque par accident majeur.

## *1.2 Approche générale de la méthodologie*

La méthodologie élaborée s'articule autour du calcul de trois indices qui sont :

- l'indice de gravité G
- l'indice de flux de propagation F
- et finalement l'indice de vulnérabilité V

La méthode se base sur l'évaluation d'un potentiel danger qui est l'agrégation des indices définis pour la source de danger et pour le flux de danger. Le niveau de risque est évalué en agrégeant la valeur de potentiel danger avec celle de la vulnérabilité de l'environnement.

En général, les différentes phases d'une évaluation du niveau de risque sont les suivantes :

- Phase 1 : un indice de gravité est calculé pour l'ensemble des scénarios potentiellement générés par les différentes unités du site industriel. Cet indice dépend du type d'accident majeur considéré. Quatre types d'effet d'accident ont été retenus :
  - o les surpressions (phénomène d'explosion)
  - o les flux thermiques (phénomène d'explosion et d'incendie)
  - o l'exposition à un gaz toxique (perte de confinement d'un produit toxique)
  - o la pollution liquide (libération d'une substance toxique dans le milieu aquatique terrestre)
- Phase 2 : l'indice de flux de propagation est évalué en fonction de la distance source- cible et de la distance obtenue pour différents seuils d'effet.
- Phase 3 : l'indice de vulnérabilité de l'environnement est calculé. Au travers d'une méthode de décision multicritères, un jeu de facteurs de pondération préalablement établi permet d'évaluer l'indice de vulnérabilité. Cet indice est, dans un premier temps, indépendant du potentiel danger.
- Phase 4 : l'agrégation des indices « potentiel danger » et vulnérabilité par scénario est effectuée. Cela est réalisé en multipliant le potentiel danger d'une maille donnée de la zone d'étude par sa vulnérabilité.

Les résultats finaux sont de plusieurs types :

- une cartographie par scénario
- une cartographie d'évaluation du niveau de risques global de l'installation

Les paragraphes suivants détaillent l'établissement des trois indices en vue de l'évaluation du niveau de risques.

## **II L'indice de gravité G**

La gravité a pour objectif de caractériser la source de danger en évaluant le potentiel destructeur des accidents majeurs. Ce paragraphe détaille le calcul de l'indice de gravité par accident majeur,  $G_{AMi}$ .

Les accidents retenus pour la détermination du niveau de gravité  $G_{AMi}$  sont les suivants :

- les incendies
- les explosions
- les dispersions accidentelles de gaz toxique
- les pollutions liquide ou solide du milieu naturel

Ces accidents sont supposés générer les effets suivants :

- les flux thermiques
- les surpressions
- la toxicité des gaz
- la toxicité des liquides

### ***II.1 Généralités***

La démarche générale d'obtention du niveau de gravité se base sur les étapes clés d'une méthode d'analyse de risque (identification, évaluation et hiérarchisation).

La première étape porte sur l'identification de l'ensemble des zones critiques de l'établissement étudié. Pour cela, les documents administratifs tels que les études de danger (E.D.D.) ou les plans d'opérations internes (P.O.I.) peuvent être utilisés. Les zones critiques

retenues seront ensuite numérotées et reportées sur un schéma de principe de l'établissement. A chaque zone critique est associé un scénario d'accident majeur.

La deuxième étape consiste à calculer le niveau de gravité  $G_{AMi}$  de chaque zone critique. La gravité s'appuie sur :

- les propriétés intrinsèques de la substance en fonction du type d'effet
- la capacité d'aggravation due à la structure du réservoir de stockage, du réacteur de process
- et la quantité de substance dangereuse impliquée dans l'accident majeur

## *II.2 Calcul de la gravité $G_{AMi}$*

La gravité est une fonction des propriétés de la substance dangereuse, du type de contenant, et de la quantité mise en jeu lors de l'accident majeur. Les propriétés de la substance dangereuse sont traduites par la dangerosité de la substance. En revanche, le type de stockage et la quantité mise en jeu sont caractérisés par un facteur d'aggravation.

### *II.2.1 Les indices de dangerosité $I_{surp}$ , $I_{ft}$ , $I_{tox}$ et $I_{poll}$*

Les propriétés intrinsèques d'une substance dangereuse peuvent être caractérisées par leurs caractéristiques physico-chimiques.

La dangerosité d'une substance, liée à ses propriétés intrinsèques, permet pour une classe d'accident donné (ou bien un type d'effet donné), de hiérarchiser une substance impliquée dans un accident majeur par rapport aux substances générant le même type d'effet. Par exemple, une substance toxique comme le phosgène a un potentiel de toxicité supérieur à l'ammoniac.

Une substance peut être dangereuse par différents aspects (incendie, explosion, émission de gaz toxique, ...). Sa dangerosité peut être évaluée et caractérisée pour les différents types d'effet générés de la façon suivante :

- pour les flux thermiques : le point éclair de la substance, la température d'ébullition et la chaleur de combustion de la substance

- pour la surpression : la capacité d'une substance à s'enflammer ou sa capacité à détonner et la masse équivalente TNT.

- pour la toxicité des gaz : le seuil d'effet létal et le seuil d'effet irréversible

- pour la toxicité des liquides : le seuil d'effet létal et le seuil d'effet irréversible

Pour une même classe de produit, la dangerosité d'une substance peut être évaluée à l'aide des phrases de risques qui prennent en compte la dangerosité propre à chaque type de produit.

### II.2.1.1 L'indice de dangerosité pour un effet de flux thermique $I_{ft}$

Pour le cas d'un effet physique de flux thermiques, l'indice de dangerosité d'une substance est caractérisé par :

- sa capacité d'inflammation
- son intensité énergétique

La caractérisation de la capacité d'inflammation se réalise grâce aux phrases de risques qui proposent trois classes de dangerosité [64] :

- Substances et préparations extrêmement inflammables
- Substances et préparations facilement inflammables
- Substances et préparations inflammables

Pour chacune des classes présentées, les phrases de risques associées sont :

- **Substances et préparations extrêmement inflammables**

- o R 12. Extrêmement inflammable :

Substances et préparations liquides dont le point d'éclair est inférieur à 0 °C et la température d'ébullition (ou bien, dans le cas d'un intervalle de distillation, la température initiale d'ébullition) inférieure ou égale à 35 °C;

Substances et préparations gazeuses qui, à température et à pression ambiantes, sont inflammables à l'air.

- **Substances et préparations facilement inflammables**

- R 11. Facilement inflammable

Substances et préparations solides, susceptibles de s'enflammer facilement après un bref contact avec une source d'inflammation, et qui continuent à brûler ou à se consumer après élimination de cette source.

Substances et préparations liquides dont le point d'éclair est inférieur à 21 °C, mais qui ne sont pas extrêmement inflammables.

- R 15. Au contact de l'eau, dégage des gaz extrêmement inflammables

Substances et préparations qui, au contact de l'eau ou de l'air humide, dégagent des gaz extrêmement inflammables en quantités dangereuses à raison de 11/kg/h au minimum.

- R 17. Spontanément inflammable à l'air

Substances et préparations susceptibles de s'échauffer et, finalement, de s'enflammer au contact de l'air à la température ambiante, sans apport d'énergie.

- **Substances et préparations inflammables**

- R 10. Inflammable

Substances et préparations liquides dont le point d'éclair est égal ou supérieur à 21 °C et inférieur ou égal à 55 °C.

Ces trois classes traduisent la capacité d'inflammation d'une substance dangereuse.

Par ailleurs, il est également nécessaire d'évaluer l'intensité énergétique générée par le flux thermique émis par la substance. Pour cela, la chaleur de combustion de la substance peut être retenue et cette donnée est intégrée au classement précédent afin d'obtenir une classification plus précise. Une chaleur de combustion de référence est retenue (la chaleur de combustion de référence est celle de l'hydrogène) [48].

Ainsi pour tenir compte des deux remarques précédentes, chaque chaleur de combustion, d'une substance appartenant à une classe définie par les phrases de risques est divisée par celle de l'hydrogène et suivant la valeur de ce rapport, les règles d'attribution du niveau de dangerosité de la substance sont présentées dans le tableau II.1. Cela permet d'affiner et de rendre plus pertinente l'échelle de l'indice de dangerosité pour l'incendie.

Classe de dangerosité	Phrases de risques	Règles en fonction de la chaleur de combustion	Indice de dangerosité pour l'incendie
extrêmement inflammables	R 12	Si $\Delta H_i / \Delta H_{H_2} \geq 0,5$	6
		Si $\Delta H_i / \Delta H_{H_2} < 0,5$	5
facilement inflammables	R 11, R15 et R17	Si $\Delta H_i / \Delta H_{H_2} \geq 0,5$	4
		Si $\Delta H_i / \Delta H_{H_2} < 0,5$	3
inflammables	R 10	Si $\Delta H_i / \Delta H_{H_2} \geq 0,5$	2
		Si $\Delta H_i / \Delta H_{H_2} < 0,5$	1

Tableau II.1 : Echelle de l'indice de dangerosité pour le cas d'effet physique de type flux thermique.

En fonction du classement de la substance dangereuse définie par la classe de dangerosité et par le terme représentant l'intensité énergétique, l'indice de dangerosité prend la valeur qui lui est affectée.

Le tableau II.2 présente un ensemble de substances et les classes en fonction de leur capacité d'inflammation et de leur intensité de flux énergétique.

Substance	Phrase de risques [71]	Classe de dangerosité	Enthalpie de combustion (kJ/kg) [71]	Indice de dangerosité
Hydrogène	R12	extrêmement inflammable	119 000	6
Propane	R12	extrêmement inflammable	46300	5
Butane	R12	extrêmement inflammable	45300	5
Sulfure d'hydrogène	R12	extrêmement inflammable	11803	5
Essence sans plomb	R12	extrêmement inflammable	41840	5
Monoxyde de carbone	R12	extrêmement inflammable	10110	5
Benzène	R11	facilement inflammable	40200	3
Ammoniac	R10	inflammable	18603	1

Tableau II.2 : Exemple de valeurs d'indice de dangerosité pour les effets physiques de flux thermique.

### II.2.1.2 L'indice de dangerosité pour un effet de surpression $I_{\text{surp}}$

Pour le cas d'un effet physique de surpression, l'indice de dangerosité d'une substance est caractérisé par :

- sa capacité d'explosion,
- son intensité énergétique.

Pour quantifier l'intensité énergétique du phénomène de surpression, le principe de l'équivalent TNT a été retenu et le rapport  $Q / Q_{\text{TNT}}$ , où  $Q$  est l'énergie libérée par la combustion complète dans l'air de l'unité de masse du produit en kJ/kg et  $Q_{\text{TNT}}$  est l'énergie libérée par la combustion complète dans l'air de l'unité de masse de TNT en kJ/kg

Pour évaluer la capacité d'explosion, il est nécessaire de classer les substances en deux types, les substances solides et celles générant des gaz susceptibles d'exploser. Pour ce dernier cas, la classification établie pour l'indice de dangerosité pour les flux thermiques a été retenue.

Classe de dangerosité	Phrases de risques [71]	Règles en fonction de l'énergie libérée par la combustion complète	Indice de dangerosité pour la surpression
extrêmement inflammables	R 12	Si $Q_i / Q_{\text{TNT}} \geq 0,5$	6
		Si $Q_i / Q_{\text{TNT}} < 0,5$	5
facilement inflammables	R 11, R15 et R17	Si $Q_i / Q_{\text{TNT}} \geq 0,5$	4
		Si $Q_i / Q_{\text{TNT}} < 0,5$	3
inflammables	R 10	Si $Q_i / Q_{\text{TNT}} \geq 0,5$	2
		Si $Q_i / Q_{\text{TNT}} < 0,5$	1

Tableau II.3 : Echelle de l'indice de dangerosité pour le cas d'effet physique de type surpression.

Dans le cas de substances générant des explosions en masse, les phrases de risque [64] à prendre en compte sont les suivantes :

- R 1. Explosif à l'état sec.

Substances et préparations explosibles mises sur le marché en solution ou sous forme humide, par exemple la nitrocellulose contenant plus de 12,6% d'azote.

- R 2. Risque d'explosion par le choc, la friction, le feu ou autres sources d'ignition.
- R 3 Grand risque d'explosion par le choc, la friction, le feu ou autres sources d'ignition.
- R 4. Forme des composés métalliques explosifs très sensibles.

Substances et préparations susceptibles de donner naissance à des dérivés métalliques sensibles explosifs, par exemple l'acide picrique, l'acide styphnique.

- R 5. Danger d'explosion sous l'action de la chaleur.

Substances et préparations instables à la chaleur, non classées comme explosibles, par exemple l'acide perchlorique > 50 p. 100.

- R 6. Danger d'explosion en contact ou sans contact avec l'air.

Substances et préparations instables à la température ambiante, par exemple l'acétylène.

- R9. Peut exploser en mélange avec des matières combustibles.
- R 16. Peut exploser en mélange avec des substances comburantes.

Substances et préparations réagissant de manière explosive en présence d'agents comburants, par exemple le phosphore rouge.

- R 18. Lors de l'utilisation, formation possible de mélange vapeur air inflammable/explosif.

Préparations non classées comme inflammables en tant que telles, contenant des composants volatils inflammables à l'air.

- R 19. Peut former des peroxydes explosifs.

Substances et préparations susceptibles de former des peroxydes explosifs pendant le stockage, par exemple l'éther éthylique, le 1,4-dioxane.

- R 44. Risque d'explosion si chauffé en ambiance confinée.

A partir de ces considérations, la classification de ces phrases de risques est alors proposée (voir tableau II.4).

Classe de dangerosité	Phrases de risques	Règles en fonction de l'énergie libérée par la combustion complète	Indice de dangerosité pour la surpression
Explosif sensible	R1 et R4	Si $Q_i / Q_{TNT} \geq 0,5$	<b>6</b>
		Si $Q_i / Q_{TNT} < 0,5$	<b>5</b>
Explosif	R3 et R6	Si $Q_i / Q_{TNT} \geq 0,5$	4
		Si $Q_i / Q_{TNT} < 0,5$	3
Possibilité d'être explosif	R2, R5, R9, R16, R18, R19 et R44	Si $Q_i / Q_{TNT} \geq 0,5$	2
		Si $Q_i / Q_{TNT} < 0,5$	1

Tableau II.4 : Echelle de l'indice de dangerosité pour le cas d'un effet de surpression.

Le tableau II.5 regroupe quelques substances et leur indice de dangerosité à titre d'exemple.

Substance	Phrase de risques	Classe de dangerosité	Enthalpie de combustion (KJ/kg)	Indice de dangerosité
Hydrogène	R12	extrêmement inflammable	119 000	6
Propane	R12	extrêmement inflammable	46300	5
Butane	R12	extrêmement inflammable	45300	5

Tableau II.5 : Exemple de valeurs d'indice de dangerosité pour les effets physiques de surpression.

### II.2.1.3 L'indice de dangerosité pour un effet de toxicité due au gaz $I_{tox}$

Dans le cas d'une substance dangereuse toxique lors d'une dispersion de gaz, les phrases de risques classent la dangerosité d'une substance toxique en sept catégories.

L'arrêté du 20 avril 1994 propose de classer les substances toxiques, pour la toxicité aiguë, en fonction des données expérimentales concernant les effets létaux et irréversibles après une seule exposition [64].

Sept classes de phrases de risques sont retenues :

- R37 : irritant pour les voies respiratoires  
Substances et préparations qui causent une irritation grave du système respiratoire, sur la base :
  - d'observations chez l'homme;
  - de résultats positifs obtenus au cours d'essais appropriés sur l'animal.
- R20 : nocif par inhalation  
CL<sub>50</sub> par inhalation, rat, pour les gaz et les vapeurs :  $2 < CL_{50} \leq 20$  mg pour 1/4 heure d'exposition
- R23 : toxique par inhalation  
CL<sub>50</sub> par inhalation, rat, pour les gaz et les vapeurs :  $0,5 < CL_{50} \leq 2$  mg pour 1/4 heure d'exposition.
- R26 : très toxique par inhalation  
CL<sub>50</sub> par inhalation, rat, pour les gaz et les vapeurs :  $CL_{50} \leq 0,5$  mg pour 1/4 heure d'exposition.
- R39/26 : très toxique : danger d'effets irréversibles très graves par inhalation
- R39/23 : toxique : danger d'effets irréversibles très graves par inhalation
- R40/20 : nocif : possibilité d'effets irréversibles par inhalation

Dans un but d'obtenir une échelle de toxicité gaz avec 6 niveaux comme les deux précédentes (surpression et flux thermique), les deux phrases de risques, présentant la dangerosité la plus faible, ont été regroupées (Tableau II.6).

Classe de dangerosité	Phrases de risques	Indice de dangerosité pour la toxicité
très toxique : danger d'effets irréversibles très grave par inhalation	R39/26	<b>6</b>
très toxique par inhalation	R26	<b>5</b>
toxique : danger d'effets irréversibles très grave par inhalation	R39/23	<b>4</b>
toxique par inhalation	R23	<b>3</b>
nocif : possibilité d'effets irréversibles par inhalation	R40/20	<b>2</b>
nocif par inhalation irritant pour les voies respiratoires	R20 R37	<b>1</b>

Tableau II.6 : Echelle de toxicité

L'échelle de toxicité (tableau II.6) comporte six niveaux en fonction des classes de toxicité.

Le tableau II.7 suivant présente quelques exemples de substances toxiques et leur indice de dangerosité.

Substance	Phrase de risques	Classe de dangerosité	Indice de dangerosité
Acide fluorhydrique	R26	Très toxique par inhalation	<b>5</b>
Sulfure d'hydrogène	R26	Très toxique par inhalation	<b>5</b>
Phosgène	R26	Très toxique par inhalation	<b>5</b>
Ammoniac	R23	Toxique par inhalation	<b>3</b>
Chlore	R23	Toxique par inhalation	<b>3</b>
Benzène	R23	Toxique par inhalation	<b>3</b>
Dioxyde de soufre	R23	Toxique par inhalation	<b>3</b>
Monoxyde de carbone	R23	Toxique par inhalation	<b>3</b>
Acide chlorhydrique	R37	Irritant pour les voies respiratoires	<b>1</b>

Tableau II.7 : Exemple de substances toxiques et de leur indice de dangerosité.

#### II.2.1.4 L'indice de dangerosité pour un effet de toxicité due à un liquide $I_{poll}$

Dans le cas d'une substance liquide toxique, la dangerosité de la substance est appréciée au regard de sa toxicité. Pour cela, les phrases de risques classifient les substances d'un point de vue de l'écotoxicité. L'indice de dangerosité, spécifique à la pollution liquide, est alors élaboré à partir des phrases de risques.

Les phrases de risques [64] retenues pour construire l'échelle de dangerosité face à une pollution liquide sont celles mettant en avant l'environnement ou écosystème sous toutes ses formes (aquatique, faune, flore) et sont les suivantes :

- **R50** : Très toxique pour les organismes aquatiques

Toxicité aiguë :  $CL_{50}$  (poisson)  $\leq 1$  mg/l pour 96 heures d'exposition ou  $CE_{50}$  (daphnie)  $\leq 1$  mg/l pour 48 heures d'exposition ou  $CI_{50}$  (algues)  $\leq 1$  mg/l pour 72 heures d'exposition.

- **R51** : Toxique pour les organismes aquatiques

Toxicité aiguë :

CL<sub>50</sub> (poisson) : 1 mg/l < CL<sub>50</sub> ≤ 10 mg/l pour 96 heures d'exposition ou

CE<sub>50</sub> (daphnie) : 1 mg/l < CE<sub>50</sub> ≤ 10 mg/l pour 48 heures d'exposition ou

CI<sub>50</sub> (algues) : 1 mg/l < CI<sub>50</sub> ≤ 10 mg/l pour 72 heures d'exposition

- **R52** : Nocif pour les organismes aquatiques

Substances qui pourraient présenter un danger pour la structure et/ou le fonctionnement d'écosystèmes aquatiques

CL<sub>50</sub> (poisson) : 10 mg/l < CL<sub>50</sub> ≤ 100 mg/l pour 96 heures d'exposition ou

CE<sub>50</sub> (daphnie) : 10 mg/l < CE<sub>50</sub> ≤ 100 mg/l pour 48 heures d'exposition ou

CI<sub>50</sub> (algues) : 10 mg/l < CI<sub>50</sub> ≤ 100 mg/l pour 72 heures d'exposition

- **R53** : Peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement aquatique

Substances qui, sur la base d'éléments disponibles concernant leur persistance, leur potentiel d'accumulation ainsi que leur devenir et leur comportement prévus ou observés dans l'environnement pourraient présenter un danger à long terme et/ou différé pour la structure et/ou le fonctionnement d'écosystèmes aquatiques.

- **R54** : Toxique pour la flore.

- **R55** : Toxique pour la faune.

- **R56** : Toxique pour les organismes du sol.

- **R58** : Peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement.

Substances qui, sur la base d'éléments disponibles concernant leurs "propriétés", persistance, potentiel d'accumulation ainsi que leur devenir et leur comportement prévus ou observés dans l'environnement, pourraient présenter un danger immédiat ou à long terme et/ou différé pour la structure et/ou le fonctionnement d'écosystèmes naturels.

- **R50/53** : Très toxique pour les organismes aquatiques, peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement aquatique

Toxicité aiguë :

$CL_{50}$  (poisson)  $\leq 1$  mg/l pour 96 heures d'exposition ou  $CE_{50}$  (daphnie)  $\leq 1$  mg/l pour 48 heures d'exposition ou  $CI_{50}$  (algues)  $\leq 1$  mg/l pour 72 heures d'exposition.

Où le log  $P_{oe}$  (expression logarithmique du coefficient de partage octanol/eau) est supérieur ou égal à 3,0 (sauf si le facteur de bio-concentration déterminé expérimentalement est inférieur ou égal à 100)

- **R51/53** : Toxique pour les organismes aquatiques, peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement aquatique

Toxicité aiguë :

$CL_{50}$  (poisson) :  $1 \text{ mg/l} < CL_{50} \leq 10 \text{ mg/l}$  pour 96 heures d'exposition ou

$CE_{50}$  (daphnie) :  $1 \text{ mg/l} < CE_{50} \leq 10 \text{ mg/l}$  pour 48 heures d'exposition ou

$CI_{50}$  (algues) :  $1 \text{ mg/l} < CI_{50} \leq 10 \text{ mg/l}$  pour 72 heures d'exposition

et la substance ne se dégrade pas facilement,

Où le log  $POE$  est supérieur ou égal à 3,0 (sauf si le facteur de bio-concentration déterminé expérimentalement est inférieur ou égal à 100).

-**R52/53** : Nocif pour les organismes aquatiques, peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement aquatique

Toxicité aiguë :

$CL_{50}$  (poisson) :  $10 \text{ mg/l} < CL_{50} \leq 100 \text{ mg/l}$  pour 96 heures d'exposition ou

$CE_{50}$  (daphnie) :  $10 \text{ mg/l} < CE_{50} \leq 100 \text{ mg/l}$  pour 48 heures d'exposition ou

$CI_{50}$  (algues) :  $10 \text{ mg/l} < CI_{50} \leq 100 \text{ mg/l}$  pour 72 heures d'exposition

et la substance ne se dégrade pas facilement [64].

Ce critère s'applique sauf s'il existe des preuves scientifiques supplémentaires concernant la dégradation et/ou la toxicité, suffisantes pour fournir une garantie adéquate que ni la substance, ni les produits de sa dégradation ne constitueront un danger potentiel à long terme et/ou différé pour l'environnement aquatique.

La classification suivante est alors proposée pour évaluer la dangerosité de la substance mise en cause. Le couplage des phrases R50 et R51 (« très toxique » et « toxique ») avec la phrase R53 (« peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement aquatique ») conduit à des niveaux de dangerosité plus élevés que les phrases R50 et R51 prises individuellement.

A partir de ces remarques et des phrases de risques présentées ci-dessus, l'échelle de toxicité due à une pollution aquatique est la suivante (tableau II.8) :

Niveau	Phrase de risques			
	Aquatique	Faune	Flore	Sol
6	R50/53			
5	R50			
4	R51/53			
3	R51	R55	R54	R56
2	R52/53 ; R52			
1	R58 ; R53			

Tableau II.8 : Echelle de toxicité due à une pollution liquide ( $I_{poll}$ )

La principale limitation de l'utilisation des phrases de risques est liée au fait que pour la faune, la flore et les organismes présents dans les sols, il existe un niveau unique de dangerosité, le niveau de toxicité 3.

Le tableau II.9 présente quelques substances concernant la pollution aquatique et leur indice de dangerosité.

Substance	Phrase de risques	Classe de dangerosité	Indice de dangerosité
Ammoniac	R50	Très toxique pour les organismes aquatiques	5
Chlore	R50	Très toxique pour les organismes aquatiques	5
Essence sans plomb	R51/53	Toxique pour les organismes aquatiques, peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement aquatique	4
Gazole	R51/53	Toxique pour les organismes aquatiques, peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement aquatique	4

Tableau II.9 : Exemple de substances concernant la pollution liquide et leur indice de dangerosité.

#### II.2.1.5 Synthèse sur les indices de dangerosité

Pour chaque type d'accident (incendie, explosion, dispersion de gaz toxique et pollution), des indices de dangerosité ont été établis. Ils sont au nombre de quatre :

- un indice de surpression  $I_{surp}$
- un indice de flux thermique  $I_{ft}$
- un indice de toxicité  $I_{tox}$
- un indice de pollution  $I_{poll}$

Tous ces indices sont basés sur une échelle à six niveaux qui évalue la dangerosité d'une substance par rapport à une autre pour un type d'effet physique généré par un accident majeur. Les différents indices ne sont pas hiérarchisés les uns par rapport aux autres, et dans le cas où la comparaison entre deux types effets physiques est faite, une pollution liquide de niveau 6 et une surpression également de niveau 6 aurait le même poids. La comparaison à ce stade n'est pas en réalité justifiée. En fait, la hiérarchisation des effets devient implicite à partir du moment où le flux de propagation et la présence de cibles sont pris en compte. Mais avant d'aborder la notion de flux et cibles, il est important d'évaluer les facteurs d'aggravation dus au type de contenant et également celui impliquant la quantité de substance dangereuse émise lors d'un accident majeur.

## II.2.2 Les facteurs d'aggravation $F_{\text{contenant}}$ et $F_{\text{quantité}}$

Au delà de la dangerosité propre d'une substance, il est nécessaire de tenir compte à la fois :

- du mode de stockage ou d'utilisation, cela correspond aux types de contenant dans lesquelles la substance est stockée [27], [60].

- et de la quantité de substance mise en jeu lors de la séquence accidentelle [52], [72] pour arriver à évaluer la gravité du phénomène accidentel.

### II.2.2.1 Facteur d'aggravation dû au type de contenant $F_{\text{contenant}}$

Le débit et l'évolution du rejet lié à un type de contenant, sont principalement caractérisés par la pression de stockage. En effet, plus celle-ci est élevée plus le débit de rejet est fort. En partant de ce principe, cinq types de contenants peuvent être retenus [19] :

- sous pression,
- atmosphérique,
- semi réfrigéré,
- réfrigéré,
- cryogénique.

Dans le cas d'une rupture sur une structure **sous pression**, le débit de produit rejeté est important. Par ailleurs, l'évaporation du produit répandu est forte. Dans ces conditions, la structure possède un pouvoir d'aggravation très important au vu des cinétiques de rejet qui sont mises en jeu.

S'agissant d'une structure à **pression atmosphérique**, la cinétique de rejet a un débit moins important que précédemment mais il reste conséquent. La structure possède un pouvoir d'aggravation moyen.

Pour une structure **semi réfrigérée ou réfrigérée**, le débit de rejet est fonction de la température de la structure. Plus cette dernière diminue, plus le rejet est faible. Par ailleurs, l'évaporation est uniquement conditionnée par les apports extérieurs de chaleur. La structure possède un pouvoir d'aggravation faible.

Et finalement pour une **structure cryogénique**, les conséquences immédiates correspondent à un faible débit de produit rejeté et une faible évaporation. En effet, l'évaporation de la substance répandue est uniquement conditionnée par les apports extérieurs de chaleur. Dans ces conditions, la cinétique de rejet est peu aggravante, donc la structure possède un pouvoir d'aggravation très faible.

En se basant sur ce qui précède, une échelle d'aggravation liée à la cinétique de rejet comportant 5 niveaux est proposée (tableau II.10).

Type de conditions	Niveaux d'aggravation	F <sub>contenant</sub>
Sous pression ( $P_{\text{stockage}} > P_{\text{atmosphérique}}$ )	Aggravation très importante	<b>5</b>
A pression atmosphérique	Aggravation importante	<b>4</b>
Semi réfrigéré ( $P_{\text{stockage}} \approx P_{\text{atmosphérique}}$ )	Aggravation peu importante	<b>3</b>
Réfrigéré ( $P_{\text{stockage}} \approx P_{\text{atmosphérique}}$ )	Aggravation faible	<b>2</b>
Cryogénique	Aggravation très faible	<b>1</b>

Tableau II.10 : Echelle du facteur d'aggravation lié au type de contenant.

L'attribution d'un type de stockage se base sur la caractéristique la plus importante, c'est-à-dire par exemple, dans le cas d'un stockage réfrigéré d'ammoniac qui a une pression de stockage au environ de 4 bars, sera considéré comme un stockage sous pression.

#### II.2.2.2 Facteur d'aggravation dû à la quantité de substance dangereuse impliquée dans l'accident majeur $F_{\text{qté}}$

Un des paramètres primordiaux pour l'évaluation de la gravité d'une séquence accidentelle est la quantité de substance susceptible d'être libérée lors d'un accident majeur. Une échelle d'aggravation liée à la quantité de substance stockée peut être construite en se basant sur les seuils haut et bas de la réglementation Seveso II [5], comme le montre la figure II.2.

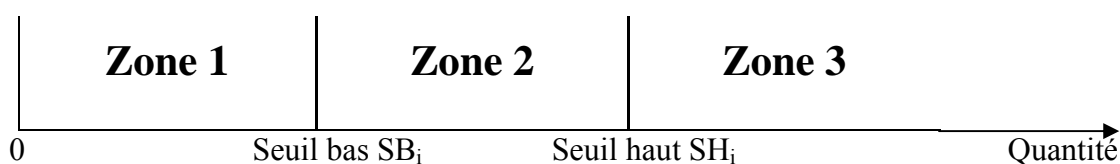


Figure II.2 : Définition des zones caractérisant la quantité impliquée en fonction des seuils haut et bas.

Pour affiner cette classification, chacune de ces zones a été divisée en deux selon les règles suivantes :

- Si  $0 < Q_i < SB_i$  alors  $R_{qté} = Q_i / (SB_i)$   
 Si  $SB_i \leq Q_i < SH_i$  alors  $R_{qté} = (Q_i - SB_i) / (SH_i - SB_i)$   
 Si  $SH_i \leq Q_i$  alors  $R_{qté} = (Q_i - SH_i) / (10.SH_i)$  [53]

Avec  $R_{qté}$  est le rapport de quantité de substance

$Q_i$  la quantité susceptible d'être émise accidentellement.

$SH_i$  le seuil haut de la substance  $i$  émise accidentellement

$SB_i$  le seuil bas de la substance  $i$  émise accidentellement

La valeur du facteur d'aggravation  $F_{qté}$  sera égale à :

- Pour une quantité rejetée comprise dans la zone 1 (figure II.2)
  - o 1 pour une valeur brute de  $R_{qté}$  inférieure à 0,5
  - o 2 pour une valeur brute de  $R_{qté}$  supérieure ou égale à 0,5
- Pour une quantité rejetée comprise dans la zone 2 (figure II.2)
  - o 3 pour une valeur brute de  $R_{qté}$  inférieure à 0,5
  - o 4 pour une valeur brute de  $R_{qté}$  supérieure ou égale à 0,5
- Pour une quantité rejetée comprise dans la zone 3 (figure II.2)
  - o 5 pour une valeur brute de  $R_{qté}$  inférieure à 0,5
  - o 6 pour une valeur brute de  $R_{qté}$  supérieure ou égale à 0,5

Le tableau II.11 résume l'ensemble des règles énoncées ci-dessus

			$F_{qté}$
Seuil haut SH	Q <sub>3</sub>	$F_{qté} = (Q_3 - SH_i) / (10.SH_i)$	Si $F_{qté} \geq 0.5$ Alors <b>6</b>
			Si $F_{qté} < 0.5$ Alors <b>5</b>
Seuil bas SB	Q <sub>2</sub>	$F_{qté} = (Q_2 - SB_i) / (SH_i - SB_i)$	Si $F_{qté} \geq 0.5$ Alors <b>4</b>
			Si $F_{qté} < 0.5$ Alors <b>3</b>
0	Q <sub>1</sub>	$F_{qté} = Q_1 / SB_i$	Si $F_{qté} \geq 0.5$ Alors <b>2</b>
			Si $F_{qté} < 0.5$ Alors <b>1</b>

Tableau II.11 : Règles d'affectation d'une valeur au facteur d'aggravation dû à la quantité.

### II.2.3 Calcul de l'indice de gravité

La fonction permettant d'obtenir la valeur de gravité ( $I_{\text{gravité}}$ ) est composée de l'indice de dangerosité ( $I_{\text{dangerosité}}$ ) corrigé des facteurs d'aggravation dû au type de contenant ( $F_{\text{contenant}}$ ) et à la quantité ( $F_{\text{qté}}$ ) [48]. Ces trois éléments sont multipliés entre eux pour obtenir la valeur de la gravité directe.

$$I_{\text{gravité}} = I_{\text{dangerosité}} \times F_{\text{qté}} \times F_{\text{contenant}}$$

Les valeurs extrêmes pouvant être obtenues grâce à cet indice sont mentionnées dans le tableau II.12 :

	Indice de dangerosité	Facteur d'aggravation dû au type de contenant $F_{\text{contenant}}$	Facteur d'aggravation dû à la quantité $F_{\text{qté}}$	Indice de gravité par accident majeur
Valeur minimale	1	1	1	1
Valeur maximale	6	5	6	180

Tableau II.12 : Valeurs limites brutes de l'indice de gravité par accident majeur

La démarche générale pour atteindre l'indice de gravité d'un accident majeur est synthétisée dans la figure II.3.

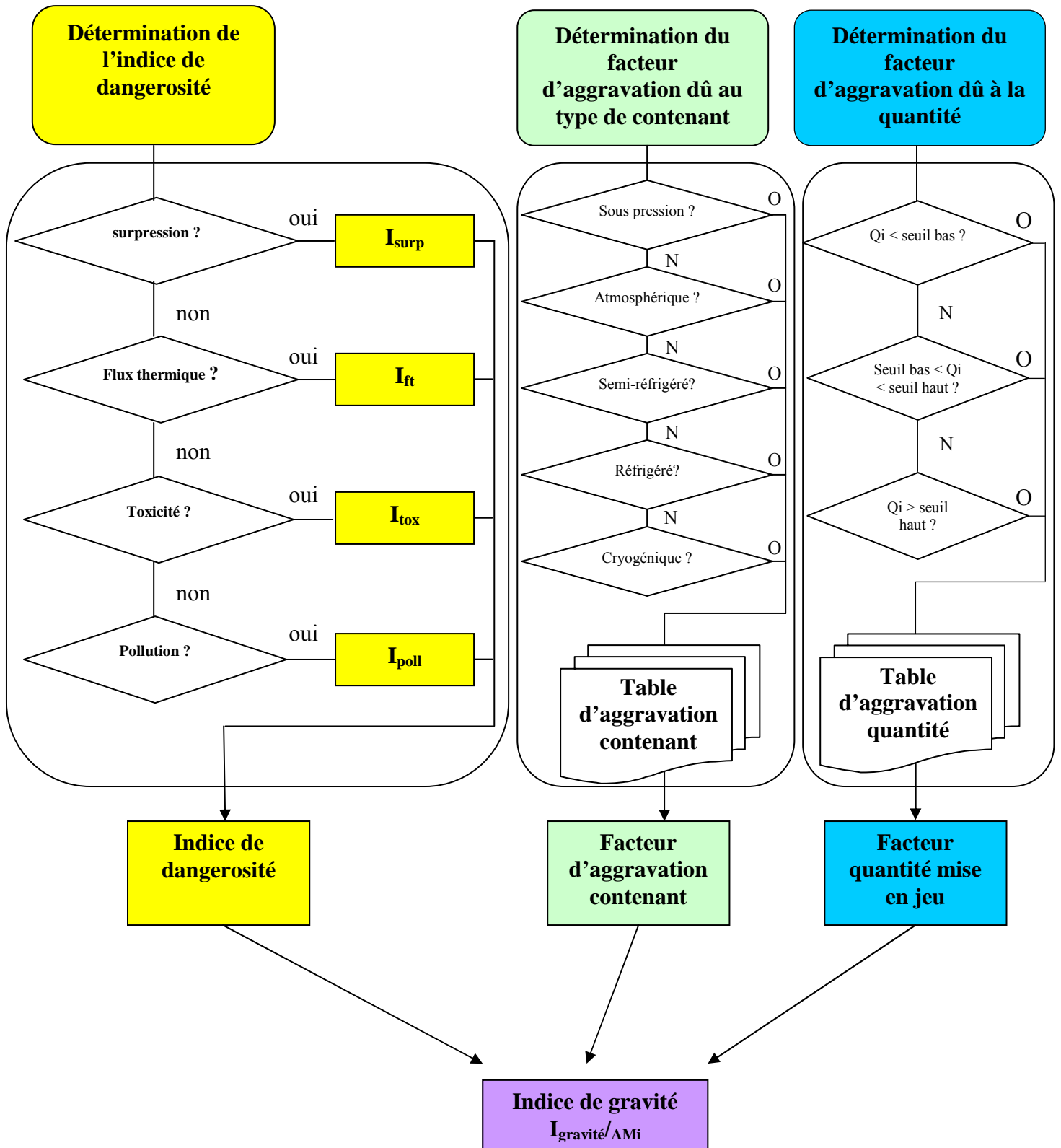


Figure II.3 : Schéma de synthèse pour le calcul de la gravité  $I_{gravité/AMi}$

La suite de la démarche est la prise en compte de la propagation des effets d'accident majeur dans son environnement, afin d'évaluer le potentiel danger de chaque accident majeur.

### **III L'indice de flux de propagation d'un accident majeur F**

#### *III.1 Le flux de propagation*

L'intensité du flux généré par un accident évolue en fonction des différents paramètres de son milieu de propagation (air, eau et sol). L'indice de flux de propagation permet de tenir compte de ces phénomènes. Ainsi, l'indice de gravité de l'effet physique considéré est pondéré par la valeur du flux de propagation [48], [54] [58].

L'intensité du flux de propagation est fonction principalement :

- de l'éloignement par rapport à la source de danger (distance source-cible) [48], [54],
- des caractéristiques propres à l'environnement [69], comme le relief, la rose des vents [66],
- de la cinétique de propagation [54], [58] qui caractérise la vitesse de propagation de l'accident. Elle dépend du milieu (air, eau et sol) et des caractéristiques de celui-ci.

Cette dernière caractéristique est délicate à prendre en compte. En effet, des phénomènes d'explosion ont des cinétiques très rapides mais le temps nécessaire pour que l'explosion se produise peut être long et de ce fait, il aura été possible de gérer la protection ou l'évacuation des cibles. Dans une première approche, la cinétique de propagation n'est pas prise en compte. Pour les caractéristiques propres à l'environnement, seule la rose des vents a été retenue.

#### *III.2 Atténuation du flux et calcul de l'intensité du flux*

##### *III.2.1 La distance*

De manière classique, l'intensité du flux de danger est, de façon très approchée, inversement proportionnelle à la distance entre la source et la cible au carré [54]. Ce type d'approche est valable lorsque la source de danger est quantifiée par une énergie. Dans notre cas, la source de danger est quantifiée par des niveaux de gravité qui ne représentent pas un potentiel d'énergie. La démarche proposée pour évaluer le flux de propagation est donc différente de cette approche classique.

Ainsi, pour définir l'atténuation en fonction de la distance, il a été choisi de se baser sur les seuils d'effet, et au travers de ceux-ci, de définir quatre zones d'effets spécifiques à chaque accident majeur. Pour cela, l'utilisation des trois seuils d'effet suivants est proposée :

- seuils des effets létaux (SEL)
- seuils des effets irréversibles (SEI)
- seuils des effets réversibles (SER).

Les seuils correspondant aux effets létaux et irréversibles sont classiques, ils sont notamment demandés lors d'une étude de danger. Le seuil des effets réversibles, noté SER, permet de définir la distance à partir de laquelle les effets d'un accident majeur ne sont plus ressentis de manière significative et donc de définir une zone sans effet.

Les zones d'effet sont alors les suivantes (figure n°II.4) :

- la zone d'effet léthal (ZEL)
- la zone d'effet irréversible (ZEI)
- la zone d'effet réversible (ZER)
- la zone sans effet (ZSE)

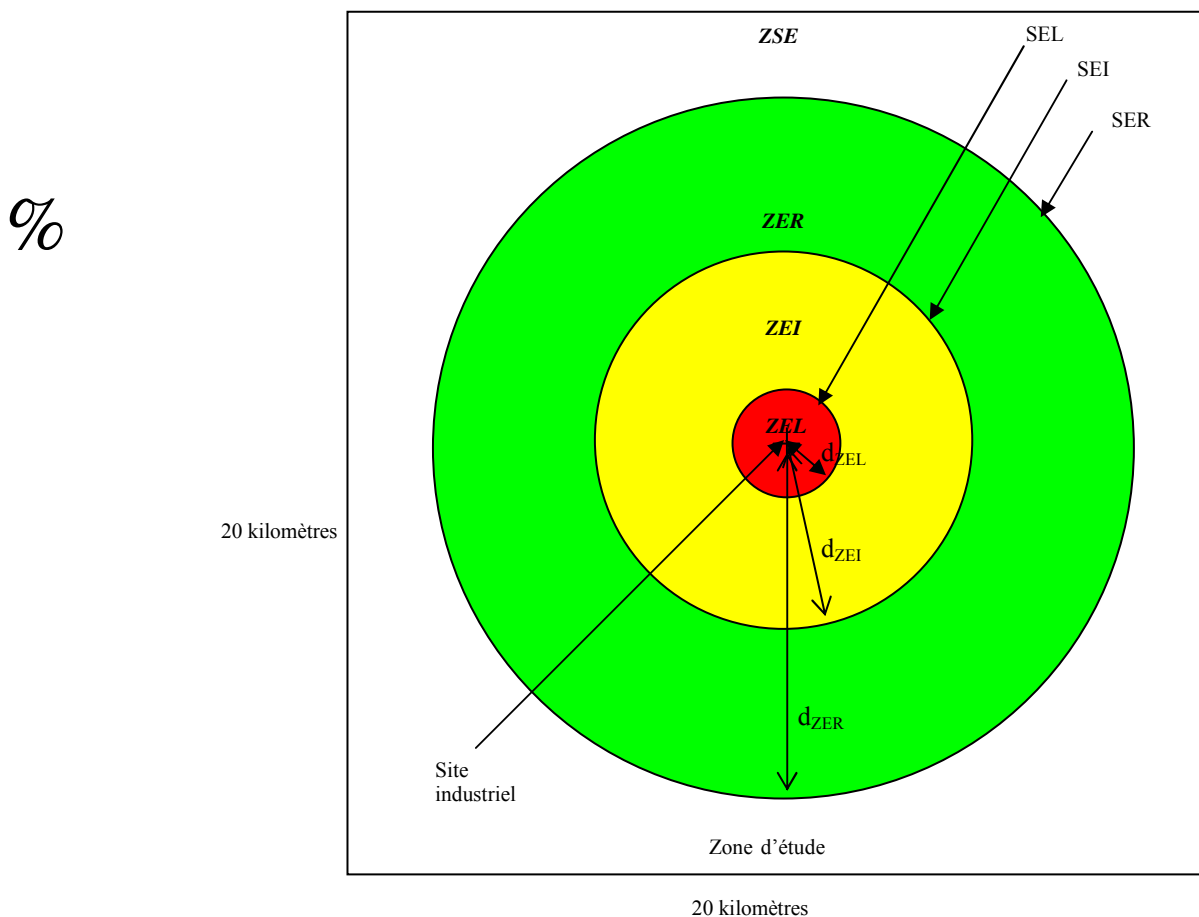


Figure II.4 : Représentation des zones d'effet autour de la zone d'étude.

Le tableau II.13 propose les différents seuils énumérés ci-dessus en fonction du type d'effet physique généré par les accidents majeurs [48] [50] [72].

	SEL	SEI	SER
Surpression	140 mbars	50 mbars	30 mbars
Flux thermique	5 kW/m <sup>2</sup>	3 kW/m <sup>2</sup>	1,5 kW/m <sup>2</sup>
Toxicité	LC 1% (30min)	IDLH	NOAEL
Pollution liquide	LC 1% (30min)	EC50	NOAEL

Tableau II.13 : Seuils d'effet par effet physique.

Pour les phénomènes de surpressions et de flux thermiques, les seuils retenus sont constants quelle que soit la substance dangereuse considérée. En revanche, pour les phénomènes de pollution atmosphérique accidentelle et de pollution aquatique accidentelle, les valeurs de seuils retenus sont spécifiques à la substance dangereuse.

L'atténuation des effets physiques n'est pas linéaire, mais dans une première approche, la méthode considère que le phénomène est linéaire par zone. En effet, l'intensité du vecteur de flux et le facteur d'atténuation sont évalués pour chaque zone d'effet. Le facteur d'atténuation est alors construit sur le principe détaillé ci-dessous. Il est constitué :

- du rapport des distances  $d_i/D$ , où  $d_i$  représente la distance source – cible et  $D$  la longueur de la zone d'effet  $i$  où se localise la cible. Le rapport représente le degré d'avancement du phénomène accidentel dans une zone d'effet spécifique. Ce rapport dépend de la zone d'effet considérée et est défini de la manière suivante :
  - o si  $0 \leq d_i \leq d_{ZEL}$  alors  $D = d_{ZEL}$
  - o si  $d_{ZEL} < d_i \leq d_{ZEI}$  alors  $D = (d_{ZEI} - d_{ZEL})$
  - o si  $d_{ZEI} < d_i \leq d_{ZER}$  alors  $D = (d_{ZER} - d_{ZEI})$

Le degré d'avancement du phénomène dans une zone d'effet étant représenté par un rapport implique l'hypothèse, que le phénomène d'atténuation est linéaire dans chaque zone d'effet.

- et du rapport  $d_{ZEi}/d_{ZER}$ , avec  $d_{ZEi} = d_{ZEL}$ ,  $d_{ZEI}$ , ou  $d_{ZER}$  en fonction de la zone d'effet  $i$ . Ce rapport permet de prendre en compte l'importance de la zone d'effet étudiée (ZEL, ZEI ou ZER) par rapport à la zone d'effet globale, qui est par hypothèse la zone des effets réversibles (ZER).

Ces deux derniers rapports sont alors multipliés pour obtenir le facteur d'atténuation  $\alpha$  et celui-ci est normalisé par le facteur  $\alpha_{\text{normalisation}}$ .

Le facteur d'atténuation  $\alpha$  est une variable représentant l'atténuation du phénomène accidentel en fonction de la distance source – cible et des distances de seuils d'effet spécifiques au type d'accident et/ou à la substance dangereuse impliquée. Le facteur d'atténuation  $\alpha$  est sans unité et représente un pourcentage de distance.

De manière plus précise, les formules du facteur d'atténuation  $\alpha$  sont les suivantes :

1<sup>er</sup> cas : La cible est présente dans la zone des effets létaux ( $0 < d_i \leq d_{ZEL}$ ) figure II.5

$$\alpha = [(d_i - 0) / (d_{ZEL} - 0) \times d_{ZEL} / d_{ZER}] / \alpha_{\text{normalisation}}$$

Où  $\alpha_{\text{normalisation}}$  est défini par  $\alpha_{\text{normalisation}} = (d_{ZEL} + d_{ZEI} + d_{ZER}) / d_{ZER}$

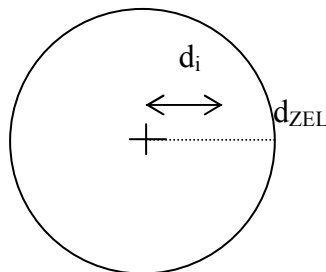


Figure II.5 : Degré d'avancement du phénomène accidentel dans la zone d'effet létaux

Pour cette zone, le facteur d'atténuation a pour valeur minimale 0 (pour  $d_i = 0$ ) et pour valeur maximale ( $d_{ZEL} / (d_{ZEL} + d_{ZEI} + d_{ZER})$ ) pour  $d_i = d_{ZEL}$ .

2<sup>ème</sup> cas : La cible se trouve dans la zone des effets irréversibles ( $d_{ZEL} < d_i \leq d_{ZEI}$ )

$$\alpha = [((d_i - d_{ZEL}) / (d_{ZEI} - d_{ZEL}) \times d_{ZEI} / d_{ZER}) + d_{ZEL} / d_{ZER}] / \alpha_{\text{normalisation}}$$

Le terme en  $d_{ZEL} / d_{ZER}$  représente le pourcentage d'avancement dû à la zone précédente c'est-à-dire celle des effets létaux.

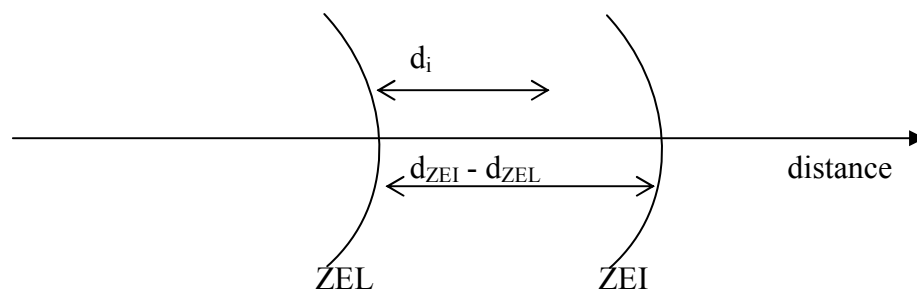


Figure II.6 : Degré d'avancement du phénomène accidentel dans la zone d'effet irréversible.

Pour cette zone, le facteur d'atténuation a pour valeur minimale ( $d_{ZEL} / (d_{ZEL} + d_{ZEI} + d_{ZER})$ ) (pour  $d_i = d_{ZEL}$ ) et pour valeur maximale ( $(d_{ZEL} + d_{ZEI}) / (d_{ZEL} + d_{ZEI} + d_{ZER})$ ) pour  $d_i = d_{ZEI}$ .

3<sup>ème</sup> cas : La cible est située dans la zone des effets réversibles ( $d_{ZEI} < d_i \leq d_{ZER}$ )

$$\alpha = [((d_i - d_{ZEI}) / (d_{ZER} - d_{ZEI}) * d_{ZER} / d_{ZER}) + (d_{ZEL} + d_{ZEI}) / d_{ZER}] / \alpha_{normalisation}$$

Le terme en  $(d_{ZEL} + d_{ZEI}) / d_{ZER}$  représente le pourcentage d'avancement des deux zones précédentes, c'est-à-dire celles des effets létaux (ZEL) et des effets irréversibles (ZEI).

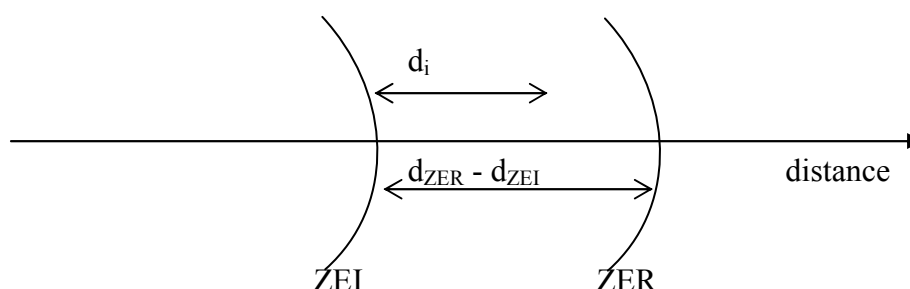


Figure II.7 : Degré d'avancement du phénomène accidentel dans la zone d'effet réversible.

Pour cette zone, le facteur d'atténuation a pour valeur minimale ( $(d_{ZEL} + d_{ZEI}) / (d_{ZEL} + d_{ZEI} + d_{ZER})$ ) (pour  $d_i = d_{ZEI}$ ) et pour valeur maximale 1 pour  $d_i = d_{ZER}$ .

4<sup>ème</sup> cas :  $d_i > d_{ZER}$  alors  $\alpha = 1$  car la cible se trouve dans la zone sans effet. Il est donc considéré que l'accident ne se propage pas au delà de cette limite.

L'indice de flux de propagation F est le complément à 1 du facteur d'atténuation et est alors obtenu grâce à la formule suivante :

$$F = (1 - \alpha), F \text{ est exprimé en pourcentage.}$$

Par exemple, en prenant un accident majeur avec les zones d'effet suivantes :

- $d_{seuil_{ZEL}} = 200 \text{ m,}$
- $d_{seuil_{ZEI}} = 1500 \text{ m,}$
- et  $d_{seuil_{ZER}} = 4000 \text{ m,}$

le résultat (figure II.8) est obtenu pour le facteur d'atténuation  $\alpha$  et également pour l'indice de flux de propagation F.

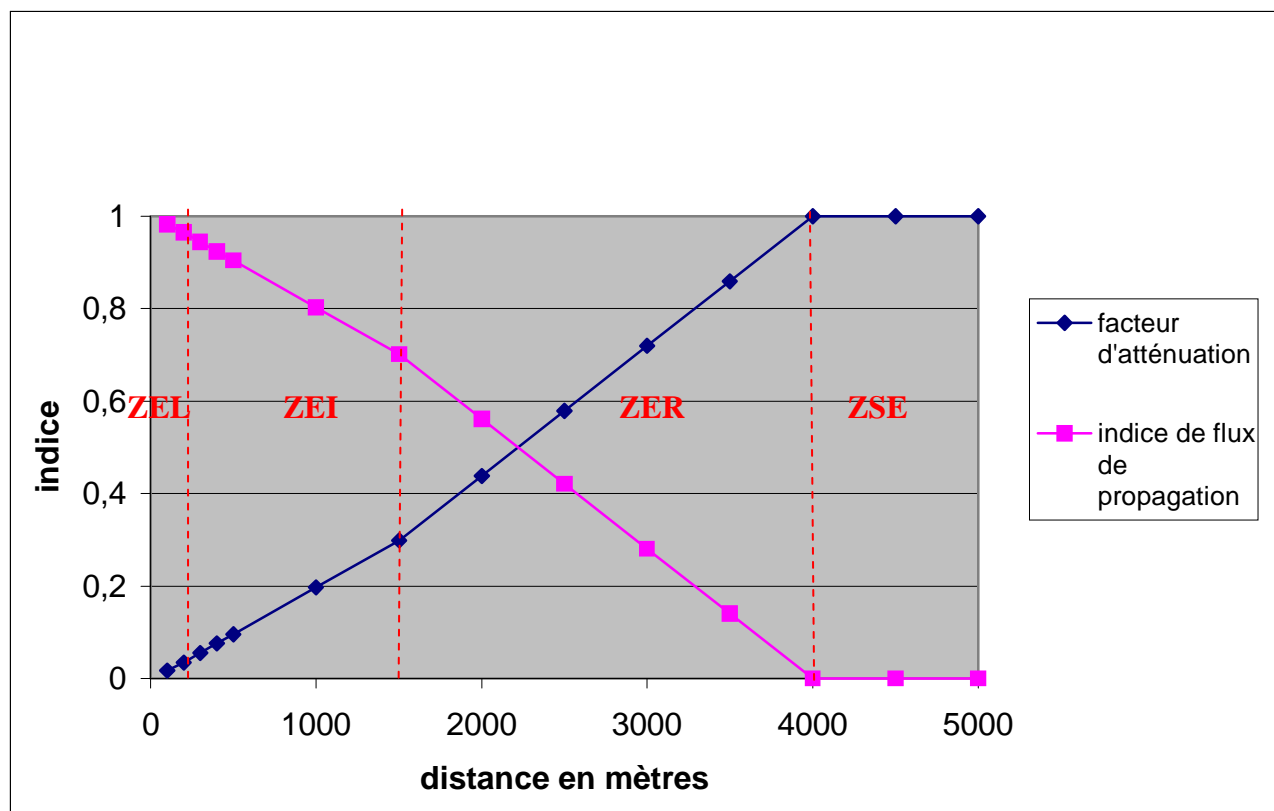


Figure II.8 : Exemple d'évolution de l'indice de flux de propagation et du facteur d'atténuation.

L'exemple de la figure II.5 montre, que pour chaque zone d'effet, l'indice de flux décroît de manière différente. Cela correspond aux hypothèses initiales, où il a été posé que l'atténuation du phénomène pour une zone d'effet dépendait :

- d'une part du degré d'avancement dans cette zone
- et d'autre part de l'importance de la zone d'effet considérée par rapport à la zone d'effet globale.

### III.2.2 Isotropie et anisotropie des phénomènes

La notion d'isotropie est prise en compte de manière spatiale et les règles d'application sont les suivantes :

- pour les phénomènes isotropes, les zones d'effet sont circulaires,
- pour les phénomènes anisotropes, les zones d'effet sont sectorielles.

A titre d'exemple, pour la dispersion de gaz toxique, l'anisotropie est prise en compte grâce à la connaissance de la rose des vents qui sectorise l'espace de propagation en directions privilégiées. En tenant compte à la fois de la notion de seuils d'effets et de l'isotropie ou anisotropie du phénomène accidentel, deux types de découpage de la zone d'étude sont alors proposés :

- Dans le cas de phénomènes isotropes, l'environnement du site industriel est découpé alors de la façon présentée sur la figure II.4. La zone d'effet retenue correspond à la zone d'étude complète qui est susceptible d'être affectée du point de vue spatial par l'accident majeur étudié (zone carrée de 20 kilomètres de coté). Le facteur de flux de propagation est donc évalué pour l'ensemble de la zone d'étude.

- Pour les phénomènes anisotropes, l'environnement du site industriel est découpé en secteurs, de la façon suivante [54] (figure II.6) :

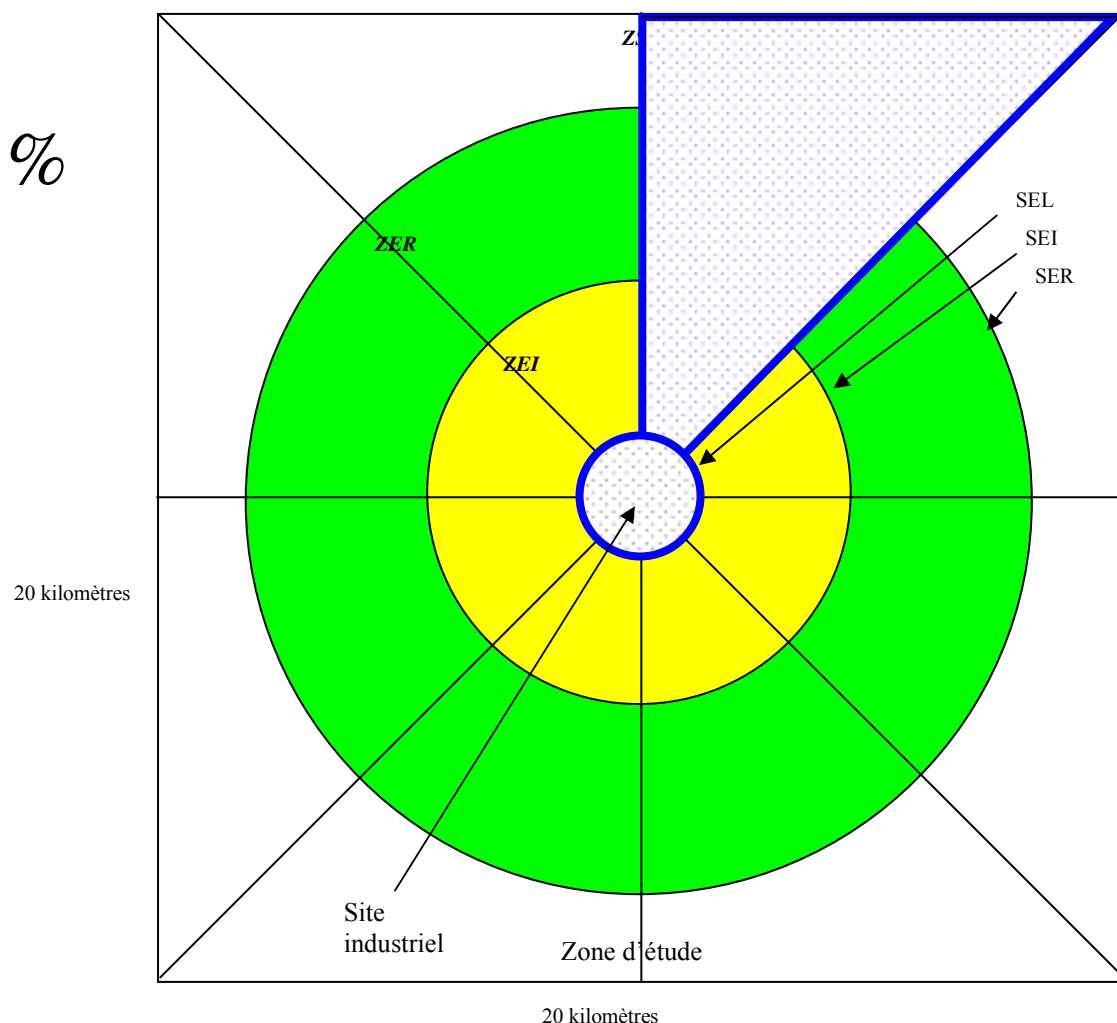


Figure II.9 : Exemple de zone d'évaluation d'indice de flux de propagation pour un phénomène anisotrope.

La zone d'effet retenue correspond au couplage de la zone circulaire « zone d'effets létaux et du ou des secteurs susceptibles d'être affectés du point de vue spatial par l'accident majeur étudié (zone en pointillés pour la ZEI et ZER). En effet, à l'intérieur de la zone létale, il est délicat de proposer une direction préférentielle car il est possible, par exemple pour le cas d'une dispersion atmosphérique de gaz toxique, d'observer des variations assez importantes de direction de vent. Le facteur de flux de propagation est donc évalué pour la zone en pointillée.

Toutefois, un ou plusieurs secteurs peuvent être pris en compte pour la détermination de la zone d'effet, si cela s'avère nécessaire.

Les paragraphes II et III de ce chapitre ont présenté la manière de calculer l'indice de gravité et l'indice de flux de propagation. L'agrégation de ces deux derniers permet d'obtenir le potentiel danger, cette partie est abordée dans le paragraphe V.1 du chapitre II. Cette valeur de potentiel danger quantifie le niveau de l'influence affectant une cible, il est donc nécessaire de s'intéresser maintenant aux cibles présentes dans l'environnement. Pour ce faire, une méthode de hiérarchie multicritères aboutissant à un jeu de facteurs de pondération représentant la vulnérabilité des différentes cibles en présence dans la zone d'étude est utilisée.

## **IV L'indice de vulnérabilité V**

La notion de vulnérabilité a été choisie pour quantifier l'influence des accidents majeurs afin d'aboutir à un niveau de risque. Pour cela, la méthode de hiérarchie multicritères (M.H.M.) SAATY [73] a été retenue. D'autres méthodes de hiérarchie multicritères existent comme les méthodes ELECTRE, PROMETHEE [74], [75], mais l'avantage de celle de SAATY réside dans l'approche quantitative de la vulnérabilité au travers de l'établissement de facteurs de pondération spécifiques à chaque type de cibles.

Dans une première partie de ce paragraphe, la notion de prise de décision est abordée ainsi que le mode de fonctionnement de la méthode SAATY. Dans une seconde partie, la méthode SAATY est appliquée à la problématique de quantification de la vulnérabilité des cibles autour d'un site industriel de type Seveso II. Pour cela le système étudié est décrit et structuré pour aboutir au facteur de pondération et à la fonction de vulnérabilité.

### *IV.1 L'aide à la décision grâce à une approche analytique multicritères*

Ce premier paragraphe permet d'aborder le processus de prise de décision face à une situation complexe ainsi que son mode de représentation pour aboutir à une modélisation de la situation réelle et à une hiérarchisation des choix.

#### *IV.1.1 La prise de décision face à une situation complexe*

De manière générale, une prise de décision est un processus complexe qui n'est pas uniquement fondé sur l'ensemble des informations collectées sur un sujet. Elle dépend aussi des sentiments, des impressions qui correspondent à une vision plus ou moins floue de la réalité et dépend également de l'influence de telle ou telle personne du groupe de décision [73]. En fait, il semblerait que les préférences personnelles et la persuasion aient plus d'importance dans le processus de décision qu'une logique claire et rigoureuse. Ainsi la logique intervient en second lieu pour ordonner les mots et les idées et donner du poids aux décisions retenues.

Les méthodes de hiérarchie multicritères sont des outils opérationnels fournissant une meilleure connaissance du système complexe à étudier et une appréciation des conséquences des préférences induites par une prise de décision [73]. Ces méthodes sont basées sur la structuration d'une situation complexe (il n'existe pas de liens de cause à effet direct) dans le but d'identifier, de comprendre et d'évaluer les critères pertinents et d'obtenir leurs interactions en tenant compte du système dans sa globalité. Le but de la M.H.M. n'est pas de fournir un mode de pensée plus complexe, mais un cadre qui amène à considérer ces situations de manière simple.

Pour cela l'application d'une M.H.M. apporte une organisation de l'information et des appréciations qui interviennent dans le processus de prise de décision.

Chaque exemple de prise de décision se fait dans un système qui peut être qualifié de complexe au vu du nombre d'éléments à prendre en compte pour le décrire et des interactions et interdépendances entre ceux-ci. Le but d'une telle démarche est d'arriver à ordonner les priorités. Pour y parvenir, le premier point est l'obtention d'un consensus sur l'objectif déterminant pour l'ensemble des personnes intervenant dans le processus de décision, pour ensuite dans un second temps, décomposer la situation complexe et non structurée en ses composantes ou facteurs principaux. Les types de résultats peuvent être un classement selon un ordre hiérarchique, l'attribution de valeurs numériques à des jugements subjectifs ou bien la synthèse de jugements afin de déterminer les variables ayant les plus grandes priorités. La M.H.M. permet de réaliser une prise de décision de groupe de manière consensuelle grâce à une meilleure cohérence des jugements.

Ainsi, il existe deux approches fondamentales pour l'analyse [73] :

- l'approche déductive,
- et l'approche inductive (ou approche système).

L'approche déductive considère le système comme un réseau où chaque partie qui le compose doit s'expliquer de manière fonctionnelle, dans le but de fournir un mode de fonctionnement global du système. Cette approche peut être qualifiée de parcellaire, car les interactions entre les parties composant le système et celles avec l'environnement extérieur ne sont pas prises en compte.

L'approche système permet une meilleure compréhension du fonctionnement de l'ensemble du système par une approche globale qui n'est pas ciblée sur les fonctions des composantes du système (éléments constituant le système et interactions).

La combinaison de ces deux approches permet une amélioration de la compréhension d'un système pour peu qu'elles soient intégrées dans un cadre logique, c'est-à-dire par une structuration du système et de son environnement en composantes interactives. Ainsi la méthode de hiérarchie multicritères permet d'organiser les sentiments, les intuitions et la logique dans une approche structurée de la prise de décision.

#### *IV.1.2 La méthode de hiérarchie multicritères SAATY [73]*

La méthode de hiérarchie multicritères SAATY précise une situation complexe par l'intermédiaire d'une structuration et de la création d'une hiérarchie des niveaux de détails. De manière implicite, les niveaux de détails dits « hauts » correspondent à l'objectif général et ceux dits « bas » aux solutions ou mesures envisagées.

La méthode de hiérarchie multicritères SAATY est basée sur trois étapes clés :

- la construction des hiérarchies,
- l'établissement des priorités,
- et la cohérence logique.

De manière générale, la méthode de hiérarchie multicritères peut être considérée comme une approche globale de la situation complexe permettant de hiérarchiser les éléments en tenant des interactions entre ces derniers.

Un exemple explicitant les niveaux de détails est présenté dans le paragraphe IV.1.2.1.

##### IV.1.2.1 Les différents types de structuration hiérarchique

La construction hiérarchique dans la méthode SAATY permet une structuration de la réalité complexe par une décomposition hiérarchique en composantes, cela correspond à une décomposition du système en éléments séparés. La structuration hiérarchique réalise une identification des éléments d'un problème et les classe par groupes et par niveaux de hiérarchie. Pour réaliser une structuration hiérarchique il faut :

- intégrer suffisamment de détails pertinents caractérisant la situation,
- prendre en compte l'environnement,
- identifier les aspects et caractéristiques nécessaires à la compréhension du problème.

La condition nécessaire pour la construction d'une structure hiérarchique correspond à la création ou à la mise en évidence de liens entre les différents niveaux de cette structure.

Deux types de hiérarchie existent [73] :

- les hiérarchies structurelles,
- et les hiérarchies fonctionnelles, qui permettent une décomposition en éléments en fonction des relations essentielles reliant ces éléments.

Chaque élément d'une hiérarchie fonctionnelle se place à un niveau donné de la structure dont le niveau supérieur correspond à l'objectif global (élément dominant). Chaque élément d'un niveau donné est alors comparé avec l'ensemble des autres éléments du même niveau en fonction des éléments du niveau supérieur à celui considéré. Les différents niveaux d'une hiérarchie sont, par conséquent, interconnectés. Il n'existe pas de construction hiérarchique type et de méthodes établies pour y aboutir mais des exemples peuvent être proposés.

La figure II.10 présente une construction hiérarchique de base où les éléments de 1 à j sont comparés deux à deux en fonction de chaque critère pour un objectif général donné. Cette approche peut être adaptée et complétée en fonction du système étudié et de représentation de celui-ci.

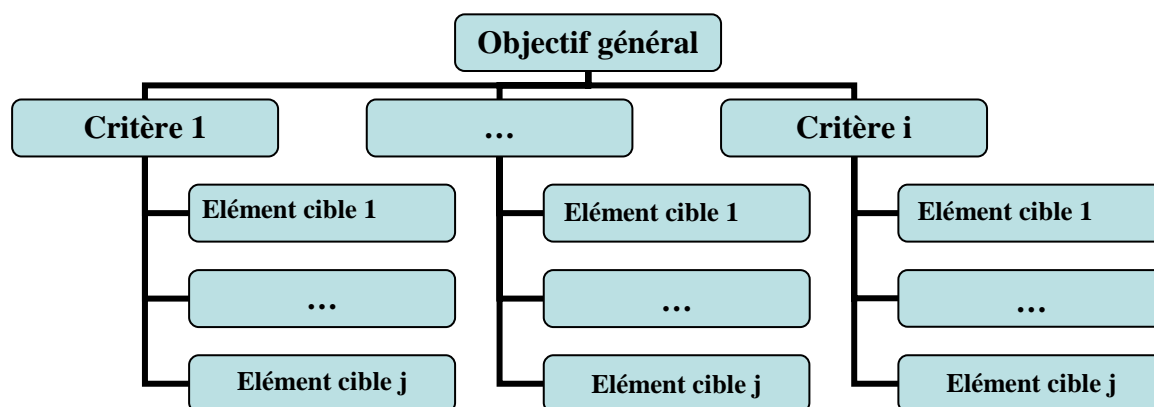


Figure II.10 : Construction hiérarchique élémentaire [73]

La structuration hiérarchique présentée figure II.10 est dite élémentaire car elle est constituée du nombre de niveaux minimal pour appliquer la méthode SAATY. L'exemple suivant de la structure hiérarchique (Figure II.11) inclut un niveau de sous-critères permettant de décrire le système de manière plus précise. Une remarque importante pour la construction de ces hiérarchies est qu'il n'existe pas de limite pour le nombre de niveaux, ce dernier est adapté en

fonction du degré de description voulu. Par ailleurs, une structure hiérarchique peut être évolutive par l'introduction de nouveaux critères.

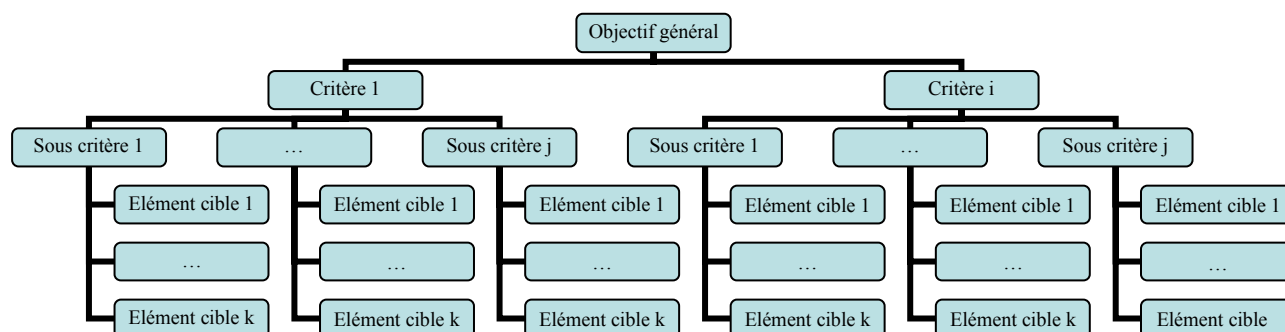


Figure II.11 : Structuration hiérarchique détaillée [73].

De manière générale, la méthode de hiérarchie multicritères, grâce à l'outil de structuration hiérarchique, permet d'ordonner logiquement les éléments décrivant un système complexe, de créer des niveaux hiérarchiques et d'établir des liens entre ces différents niveaux. Ces étapes sont utilisées pour visualiser les relations complexes qui conditionnent une situation pour établir les facteurs de pondération de chaque élément.

#### IV.1.2.2 Etablissement des priorités (calcul des vecteurs)

Une situation complexe peut être analysée par une approche systémique grâce à la structuration hiérarchique. Cette dernière peut être complétée par une approche causale qui se base sur une comparaison binaire des éléments constituant la hiérarchie. La comparaison binaire correspond au processus d'établissement des priorités. Ce processus s'effectue par une comparaison deux à deux des éléments, celle-ci donne le classement des éléments selon leur importance relative. Finalement, la cohérence logique valide l'ensemble du processus appliqué.

Pour réaliser l'étape de comparaison deux à deux, il est nécessaire d'utiliser une échelle basée sur des grandeurs classiques ou bien plus qualitatives permettant de prendre en compte des qualités intangibles.

L'approche matricielle permet d'établir ces comparaisons binaires. Par exemple, considérons la structuration hiérarchique de la figure II.12 :

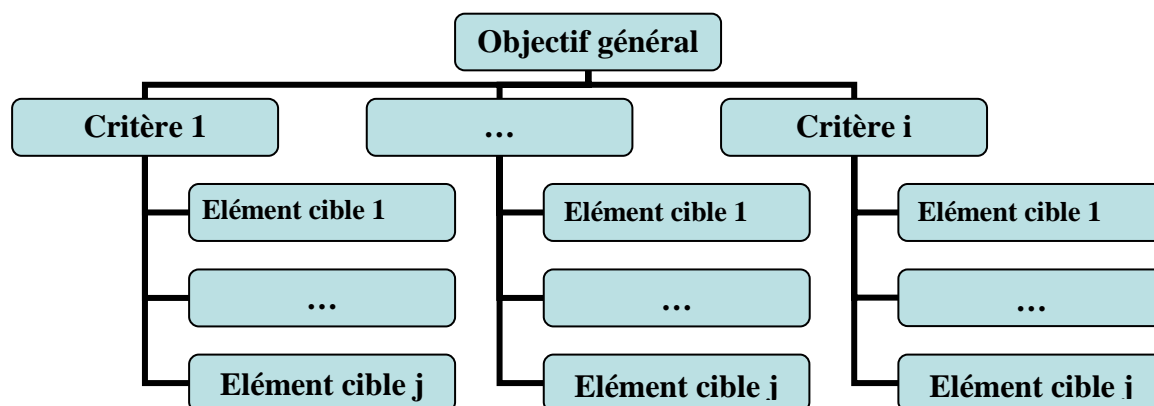


Figure II.12 : Exemple de structuration hiérarchique

De la partie supérieure de la construction hiérarchique, la matrice suivante est obtenue.

Objectif général	Critère 1	...	Critère i
Critère 1	1		
...		1	
Critère i			1

Les différents critères sont comparés deux à deux par rapport à l'objectif général grâce à une échelle de valeurs qui peut être constituée de 18 niveaux [73]. Pour compléter cette matrice et donc réaliser les appréciations, l'élément de la colonne de gauche est comparé successivement à chaque élément de la ligne du haut de la matrice en fonction de l'objectif général. Si la comparaison n'est pas favorable à l'élément de la colonne de gauche par rapport à un élément de la ligne, l'appréciation est exprimée à l'aide d'une fraction (cf. tableau II.13) et dans le cas contraire à l'aide d'un entier.

Le résultat d'un élément comparé à lui-même a pour valeur 1. Lorsqu'une appréciation d'un élément (i, j) de la matrice a une valeur alors l'appréciation de l'élément (j, i) a la valeur réciproque. Le nombre d'appréciations à effectuer pour compléter une matrice d'ordre n est donc égal à la taille au carré de la matrice (n<sup>2</sup>), moins le nombre d'éléments présents sur la

diagonale, et enfin divisé par deux puisque la moitié de la matrice est déduite par hypothèse. Par exemple, pour une matrice d'ordre 3, le nombre d'appréciations est égal à  $(3^2-3)/2$ , soit 3 appréciations. Pour chaque comparaison binaire, il est essentiel d'avoir une question qui permet de mettre en avant la relation existant entre eux.

L'échelle de comparaisons binaires est présentée dans le tableau II.14 :

Degré d'importance	Définition	Commentaire
1	Importance égale des deux éléments	Deux éléments contribuent autant à la propriété
3	Faible importance d'un élément par rapport à l'autre	L'expérience et l'appréciation personnelle favorisent légèrement un élément par rapport à un autre
5	Importance forte ou déterminante d'un élément par rapport à un autre	L'expérience et l'appréciation personnelle favorisent fortement un élément par rapport à un autre
7	Importance attestée d'un élément par rapport à un autre	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique
9	Importance absolue d'un élément par rapport à un autre	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires entre deux appréciations voisines	Un compromis est nécessaire entre deux appréciations
1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9 (réciproques)	Si l'élément i se voit attribuer l'un des chiffres précédents lorsqu'il est comparé à l'élément j, l'appréciation est défavorable à l'élément i.	

Tableau II.14 : Echelle des comparaisons binaires

Chaque niveau de la structure génère un ensemble de matrices permettant de réaliser les appréciations pour au final obtenir les priorités globales d'un problème de décision.

A titre d'exemple la structure hiérarchique (figure II.10) est composée d'un objectif général, de trois critères de caractérisation et trois éléments. Elle peut être retranscrite sous forme matricielle, comme le montre la figure II.11.

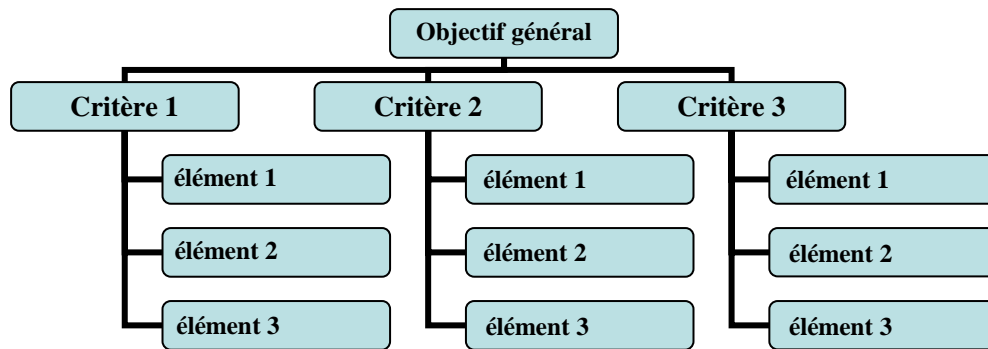


Figure II.13 : Exemple de structure hiérarchique (3 critères, 3 éléments).

Objectif Général	Critère 1	Critère 2	Critère 3
Critère 1	1		
Critère 2		1	
Critère 3			1

Matrice X1

Critère 1	Elément 1	Elément 2	Elément 3
Elément 1	1		
Elément 2		1	
Elément 3			1

Matrice X2

Critère 2	Elément 1	Elément 2	Elément 3
Elément 1	1		
Elément 2		1	
Elément 3			1

Matrice X3

Critère 3	Elément 1	Elément 2	Elément 3
Elément 1	1		
Elément 2		1	
Elément 3			1

Matrice X4

Figure II.14 : Matrices obtenues à partir de la structure hiérarchique (figure II.9)

La matrice X1 permet d'évaluer l'importance des critères (1, 2 et 3), les uns par rapport aux autres en fonction de l'objectif général. Les matrices X2, X3 et X4 permettent, quant à elles, d'évaluer l'importance des éléments 1, 2 et 3 pour chaque critère.

Les appréciations réalisées par des experts peuvent se faire directement en gardant l'approche matricielle, mais en fait cela est difficilement lisible en cas de structuration hiérarchique complexe. Dans ce dernier cas, il est souhaitable de réaliser un questionnaire traduisant les matrices sous la forme de phrases. Un exemple de questionnaire est présenté pour la constitution de l'indice de vulnérabilité V en annexe I.

A partir de ces matrices, les formules traduisant le problème exposé sont les suivantes :

$$OG = Ax C_1 + Bx C_2 + Cx C_3 \text{ (matrice X1)}$$

$$C1 = a_1 x E_1 + a_2 x E_2 + a_3 x E_3 \text{ (matrice X2)}$$

$$C2 = b_1 x E_1 + b_2 x E_2 + b_3 x E_3 \text{ (matrice X3)}$$

$$C3 = c_1 x E_1 + c_2 x E_2 + c_3 x E_3 \text{ (matrice X4)}$$

Où A, B et C sont les composantes du vecteur propre de la matrice 1

$a_1$ ,  $a_2$  et  $a_3$  sont les composantes du vecteur propre de la matrice 2

$b_1$ ,  $b_2$  et  $b_3$  sont les composantes du vecteur propre de la matrice 3

$c_1$ ,  $c_2$  et  $c_3$  sont les composantes du vecteur propre de la matrice 4

L'ensemble de ces vecteurs propres constitue les facteurs de pondération du système étudié.

## *IV.2 Application de la méthode de hiérarchisation SAATY à la problématique de l'indice de vulnérabilité*

Pour appliquer la méthode SAATY à la construction de l'indice de vulnérabilité, il faut réaliser :

- la description du système étudié et la définition d'un objectif,
- la caractérisation du système étudié,
- la construction de la structure hiérarchique permettant d'ordonner logiquement les éléments décrivant le système,
- la représentation matricielle et le questionnaire associé pour la réalisation des appréciations,
- l'établissement de la formule de calcul de l'indice de vulnérabilité,
- l'obtention des facteurs de pondération.

### *IV.2.1 Définition de l'objectif*

L'objectif est de mettre au point une fonction permettant de quantifier la vulnérabilité de cibles présentes autour d'un site industriel et plus particulièrement sur la zone d'étude préalablement définie. Pour mémoire, il s'agit d'un carré de 20 kilomètres de côté qui est subdivisé en mailles de 250 mètres de côté avec en son centre le site industriel.

Sur cette zone d'étude se trouvent trois catégories de cibles (humaine, environnementale et matérielles) pour lesquelles une quantification de la vulnérabilité est à réaliser.

## *IV.2.2 Caractérisation des cibles*

Pour caractériser la zone d'étude, il faut tout d'abord la décrire, comme cela a été vu précédemment, trois catégories de cibles ont été proposées et chacune de ces catégories est déclinée en différents types de cibles.

L'une des principales limitations de la méthode de décision multicritères de SAATY réside dans le nombre important d'appréciations à faire par les experts. Plus il y aura de types de cibles, plus le nombre d'appréciations est important. Donc, pour obtenir des appréciations cohérentes, le nombre de types de cibles a été fixé à quatre par catégorie de cible (humaine, environnementale et matérielle).

### IV.2.2.1 Cibles Humaines (H)

La typologie des cibles humaines se base sur quatre catégories de cibles. Les catégories retenues permettent de décrire de manière exhaustive les cibles humaines, ce sont :

- le personnel du site. Ce type correspond aux cibles susceptibles d'être affectées par les effets d'accident majeur de manière forte, en effet le potentiel danger est voisin de sa valeur maximale puisque ces cibles sont localisées dans une zone très proche de la source de danger.
- Les populations locales sédentaires. Ce type de cibles prend en compte la répartition de la population en fonction de la variable densité de population d'une zone habitée.
- Les personnes présentes dans les établissements recevant du public. Ce type de cibles est spécifique car ces lieux regroupent en général un nombre de personnes assez important.
- Et enfin, les usagers des voies de communication. Ce dernier type est caractérisé par une densité de trafic.

De manière plus détaillée, les types de cibles humaines sont :

✓ Personnel du site (H1)

Ce type de cible correspond aux personnes présentes sur le site industriel

✓ Population locale sédentaire (H2)

- concentration de type rural

- concentration de type péri urbain
- concentration de type urbain
  
- ✓ Etablissement Recevant du Public (ERP) (H3)
  - lié au transport : gare, aéroport, port
  - lié au commerce : magasins de vente et centres commerciaux
  - lié aux loisirs : restaurant, hôtel, pension, débit de boissons, salle à usages multiples, colonie de vacances, établissement de plein air, établissement sportif couvert
  - lié à la culture : bibliothèque, centre de documentation, salle d'exposition, musée, établissement de culte
  - lié à la santé et service : établissement sanitaire et d'enseignement, banque, bureaux, administration.

Ce type de cible englobe l'ensemble des personnes présentes dans les établissements recevant du public.

- ✓ Usagers des voies de communication (H4)
  - routes (autoroutes, nationales, ...)
  - lignes de chemin de fer
  - voies navigables

#### IV.2.2.2 Cibles Environnementales (E)

Les cibles environnementales sont classées en quatre types :

- les terres dédiées aux activités agricoles et à l'élevage
- les terres occupées par la végétation de tous types (hormis les zones protégées)
- les terres occupées par des espaces naturels protégés
- les cibles environnementales impliquant un milieu aquatique

La typologie des cibles environnementales est décrite ci-dessous de manière plus précise.

- ✓ Terres agricoles (E1)
  - dédiées à l'élevage,
  - dédiées à la culture maraîchère,
  - dédiées aux vignobles
  - dédiées à la culture céréalière,
  - dédiées à la culture des oléagineux

- ✓ Espaces naturels (E2)
  - Forêts (feuillus, conifère, mélangées),
  - Milieu à végétation arbustive et/ou herbacée (prairies, pelouses et pâturages naturels, landes et broussailles, forêt et végétation arbustive en mutation).
  - Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation (plages, dunes et sables, roches nues, végétations clairsemées, zones incendiées, glaciers et neiges éternelles)
- ✓ Espaces naturels protégés (E3)
  - Zone Nationale d'Intérêt Ecologique Faunistique ou Floristique,
  - site classé,
  - particularités naturelles (grottes, ...),
  - parc naturel (national, régional)
- ✓ Milieu aquatique (E4)
  - lac, mer, étangs, marais,
  - cours d'eau, sources,
  - rizière, activités aquacoles, marais salants

#### IV.2.2.3 Cibles Matérielles (M)

Les cibles matérielles sont de quatre types :

- les sites industriels
- l'ensemble des réseaux (communication et énergie)
- les cibles matérielles d'ordre privé
- les cibles matérielles d'ordre public

Une typologie détaillée des cibles matérielles est présentée ci-dessous.

- ✓ Site industriel (M1)
- ✓ Utilités publiques et infrastructures (M2)
  - services de sécurité publique (service d'ordre, service d'intervention),
  - communication
  - gaz, électricité
  - réseau routier, ferroviaire, fluvial et aérien
  - péage, zone de stationnement, gare, aéroport, port, pont, tunnel
  - équipements impliqués dans l'eau potable

- ✓ Structure bâimentaire privée (M3)
  - maison individuelle
  - immeuble
- ✓ Structure bâimentaire publique (M4)
  - monument, église, château, musée
  - administration
  - enseignement et recherche
  - loisir
  - zone commerciale
  - hôpital, clinique, maison de retraite

### *IV.2.3 Critères de caractérisation de la vulnérabilité*

Il est également nécessaire de caractériser ces cibles en fonction de l'objectif, afin de quantifier leur vulnérabilité. Pour cela, deux notions sont utilisées pour relier les cibles et le potentiel danger établi qui permet au final d'accéder à la vulnérabilité. Il s'agit :

- des effets physiques générés par un accident majeur
- du type d'impact

Les effets physiques sont au nombre de quatre et correspondent à ceux retenus pour le calcul de l'indice de gravité :

- les surpressions
- les flux thermiques
- la toxicité du gaz
- la toxicité de la pollution liquide

Les impacts caractérisent l'importance des effets physiques sur les cibles. En effet, on ne s'intéresse pas directement à l'influence d'un effet physique sur une cible mais à l'influence d'un effet physique au travers d'un impact sur la cible. Ces impacts sont au nombre de trois :

- impact sanitaire pour les cibles humaines et environnementales et intégrité pour les cibles matérielles.
- impact économique
- impact psychologique pour un groupe de personnes

#### IV.2.4 Construction de la structure hiérarchique

Pour construire une structure hiérarchique, il faut se baser sur la description de la zone d'étude (typologie de cibles, d'impacts et d'effets physiques). Ces données sont structurées de manière hiérarchique dans le but de quantifier la vulnérabilité des cibles exposées aux effets d'un accident majeur.

Pour répondre à cet objectif, plusieurs niveaux d'analyses sont proposés :

- le premier niveau consiste à classer l'importance des catégories de cibles (humaines, environnementales et matérielles) en fonction des effets physiques (surpression, flux thermique, la toxicité du gaz, la toxicité de la pollution liquide).
- le deuxième niveau où, pour une catégorie de cibles donnée en fonction d'un effet physique donné, l'importance des types de cibles est quantifiée au travers des trois impacts (sanitaire, économique et psychologique). Au final, en considérant les trois catégories de cibles, douze structures hiérarchiques sont obtenues.

La structure hiérarchique de la figure II.12 permet de classer de l'importance des différentes catégories de cibles (humaines, environnementales et matérielles) en fonction des effets physiques pour atteindre la vulnérabilité globale.

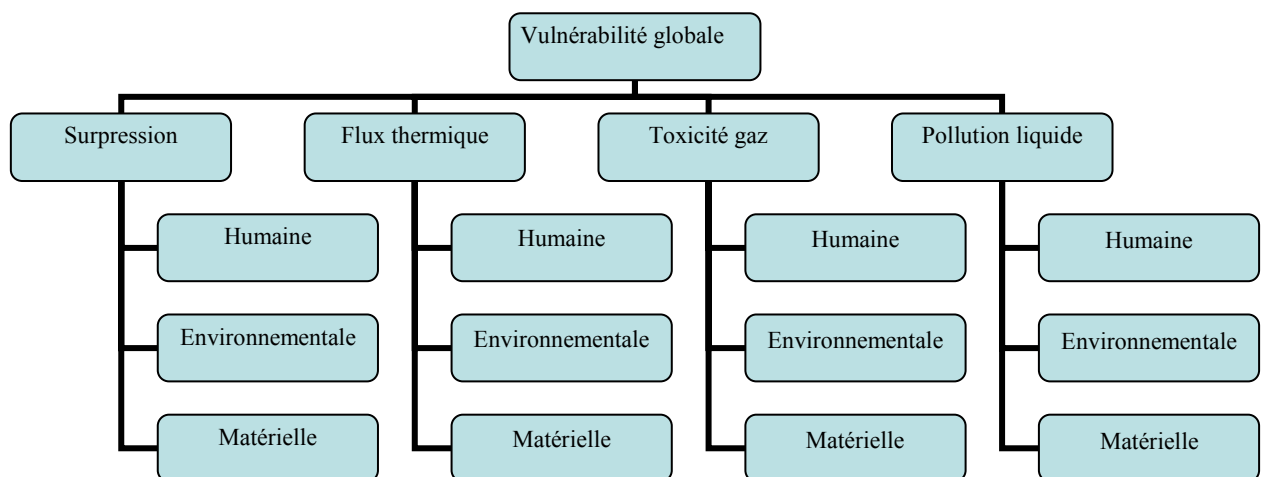


Figure II.15 : Structure hiérarchique pour évaluer la vulnérabilité globale (matrices 1, 2, 3 et 4).

Les matrices 1, 2, 3 et 4 sont données dans l'annexe II présentant la représentation matricielle des structures hiérarchiques. La matrice 1 est représentée ci-dessous :

Vulnérabilité globale	Vulnérabilité humaine	Vulnérabilité environnementale	Vulnérabilité matérielle
Vulnérabilité humaine	1		
Vulnérabilité environnementale		1	
Vulnérabilité matérielle			1

Figure II.16 : Exemple de matrice (matrice 1).

L'ensemble des matrices traduisant toutes les structures hiérarchiques sont présentées en annexe III.

Dans la suite de ce paragraphe, seules les structures hiérarchiques propres aux cibles humaines sont détaillées. En ce qui concerne, les cibles matérielles et environnementales les structures hiérarchiques sont obtenues en suivant un raisonnement identique à celui conduit pour établir les structures hiérarchiques des cibles humaines et celles-ci sont présentées en annexe III.

La vulnérabilité d'une cible humaine est caractérisée en considérant les impacts (sanitaire, économique et psychologique) induits pour chaque type d'effets (surpression, flux thermique, toxicité due à un gaz et toxicité due à un liquide) sur les types de cibles humaines (H1, H2, H3 et H4).

De cette caractérisation découlent quatre structures hiérarchiques propres aux cibles humaines qui sont présentées dans les figures II.17, II.18, II.19 et II.20.

La structure hiérarchique présentée dans la figure II.17 permet de quantifier la vulnérabilité des cibles humaines (H1 à H4) au travers des différents impacts pour l'effet de surpression. Cette structure hiérarchique est liée à celle présentée en figure II.15 En fait l'élément « humaine » pour un effet de « surpression » de la figure II.15 est l'objectif global de la

structure hiérarchique présentée en II.17. Les structures hiérarchiques II.18, II.19 et II.20 sont liées de la même façon à la structure hiérarchique de la figure II.15.

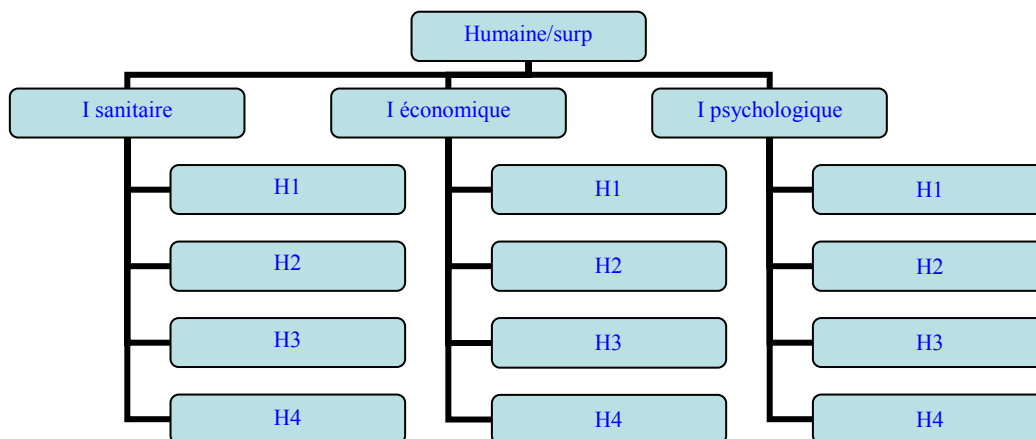


Figure II.17 : Vulnérabilité humaine par rapport l'effet de surpression (surp)(matrices 5, 6, 7, 8)

La vulnérabilité humaine (cible H1, H2, H3 et H4) face à un effet de flux thermique pour les impacts sanitaire, économique et psychologique est présentée sur la figure II.18.

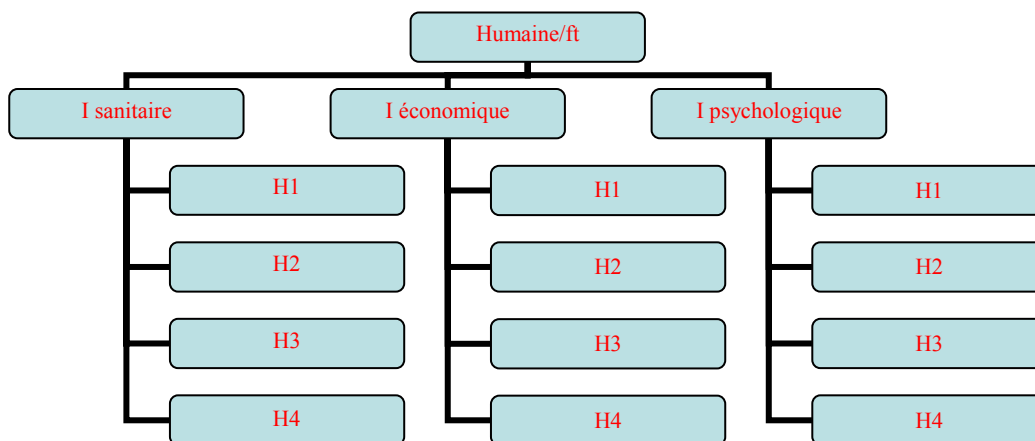


Figure II.18 : Vulnérabilité humaine par rapport l'effet de flux thermique (ft) (matrices 9, 10, 11, 12)

La structure hiérarchique présentée sur la figure II.19 permet de quantifier la vulnérabilité des cibles humaines (H1 à H4) au travers d'impacts pour l'effet de toxicité dû à un gaz.

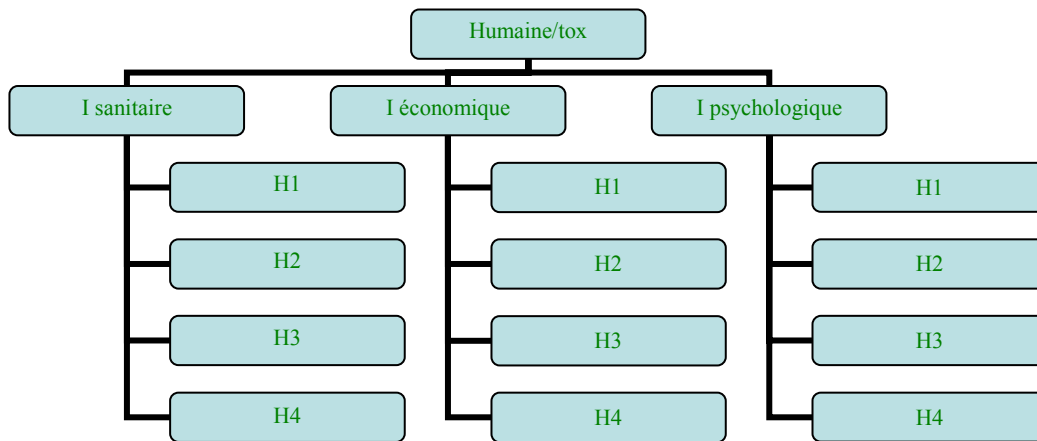


Figure II.19 : Vulnérabilité humaine par rapport l'effet de toxicité dû à un gaz (tox) (matrices 13, 14, 15, 16)

La structure hiérarchique présentée dans la figure II.20 permet de quantifier la vulnérabilité des cibles humaines (H1 à H4) au travers d'impacts pour l'effet physique de pollution liquide.

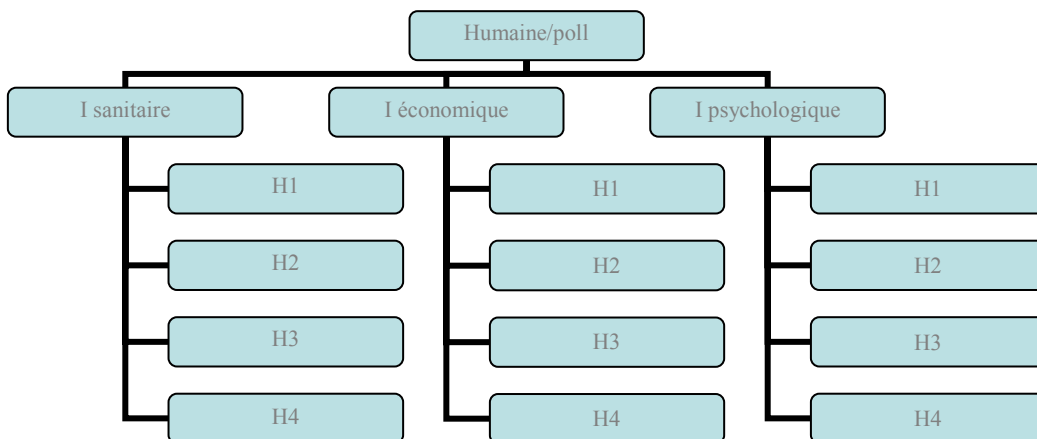


Figure II.20 : Vulnérabilité humaine par rapport à un effet de pollution liquide (poll) (matrice 17, 18, 19, 20)

Quatre structures hiérarchiques équivalentes sont déduites pour les cibles environnementales et de même pour les cibles matérielles (annexe III).

L'ensemble de ces structures hiérarchiques est alors représenté sous la forme matricielle pour pouvoir réaliser la phase d'appréciation. Mais dans un premier, elles permettent de construire la fonction de vulnérabilité.

#### *IV.2.5 Etablissement de la formule de calcul de l'indice de vulnérabilité*

Ce paragraphe détaille la démarche qui a permis de mettre au point la fonction de calcul de l'indice de vulnérabilité. Pour la vulnérabilité globale, l'indice correspondant se calcule selon la formule X1 (paragraphe IV.1.2.2) à partir de la matrice 1 (voir figure II.14).

$$V_{\text{globale}} = \alpha \cdot V_{\text{Humaine}} + \beta \cdot V_{\text{Environnementale}} + \gamma \cdot V_{\text{Matérielle}}$$

Où  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  sont les facteurs de pondération de la fonction de vulnérabilité globale. D'un point de vue mathématique, cela correspond au vecteur propre de la matrice 1 (voir figure II.14).

##### IV.2.5.1 Vulnérabilité humaine

De la même façon, en raisonnant sur le principe de la formule X2, la vulnérabilité humaine se calcule à partir de la matrice 2 selon l'expression :

$$V_H = \alpha_1 \cdot V_H^{\text{surp}} + \alpha_2 \cdot V_H^{\text{ft}} + \alpha_3 \cdot V_H^{\text{tox}} + \alpha_4 \cdot V_H^{\text{poll}}$$

Où les facteurs de pondérations  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  et  $\alpha_4$  sont les facteurs de pondération de la fonction de vulnérabilité humaine. Chacun des facteurs de pondération représente respectivement l'importance d'un effet :

- de surpression
- de flux thermique
- de toxicité gaz
- de pollution liquide

pour une cible humaine.

### a) surpression

Des matrices 5, 6, 7 et 8, la vulnérabilité humaine par rapport à un effet de surpression est déduite en fonction des différents impacts.

La matrice 5 évalue la vulnérabilité d'une cible humaine face à un effet de surpression pour les impacts sanitaire, économique et psychologique.

$$\text{matrice 5 : } V_{H/\text{surp}} = x_1^H \cdot V_{H/\text{surpS}} + y_1^H \cdot V_{H/\text{surpE}} + z_1^H \cdot V_{H/\text{surpP}}$$

avec  $V_{H/\text{surp}}$  qui est la vulnérabilité humaine face à un effet de surpression

$V_{H/\text{surpS}}$  qui est la vulnérabilité humaine face à un effet de surpression pour un impact sanitaire

$V_{H/\text{surpE}}$  qui est la vulnérabilité humaine face à un effet de surpression pour un impact économique

$V_{H/\text{surpP}}$  qui est la vulnérabilité humaine face à un effet de surpression pour un impact psychologique

Les matrices 6, 7 et 8 permettent d'évaluer la vulnérabilité humaine face à un effet de surpression pour un impact donné ( $V_{H/\text{surpi}}$ ). Chacune des fonctions  $V_{H/\text{surpi}}$  est construite avec les éléments (H1, H2, H3 et H4) représentant les cibles.

$$\text{matrice 6 : } V_{H/\text{surpS}} = a_1^H \cdot H_{1/\text{surpS}} + b_1^H \cdot H_{2/\text{surpS}} + c_1^H \cdot H_{3/\text{surpS}} + d_1^H \cdot H_{4/\text{surpS}}$$

$$\text{matrice 7 : } V_{H/\text{surpE}} = a_2^H \cdot H_{1/\text{surpE}} + b_2^H \cdot H_{2/\text{surpE}} + c_2^H \cdot H_{3/\text{surpE}} + d_2^H \cdot H_{4/\text{surpE}}$$

$$\text{matrice 8 : } V_{H/\text{surpP}} = a_3^H \cdot H_{1/\text{surpP}} + b_3^H \cdot H_{2/\text{surpP}} + c_3^H \cdot H_{3/\text{surpP}} + d_3^H \cdot H_{4/\text{surpP}}$$

Dans les parties b), c) et d), la vulnérabilité humaine par rapport respectivement à un flux thermique, une toxicité et une pollution liquide. Les fonctions sont déduites de la même façon qu'en IV.2.5.1 a).

### b) flux thermique

La matrice 9 quantifie la vulnérabilité des cibles humaines face à un flux thermique ( $V_{H/\text{rT}}$ ) qui est fonction de la vulnérabilité humaine face à un flux thermique :

- pour un impact sanitaire ( $V_{H/\text{rTS}}$ )
- pour un impact économique ( $V_{H/\text{rTE}}$ )
- pour un impact psychologique ( $V_{H/\text{rTP}}$ )

$$\text{matrice 9 : } V_{H/\text{rT}} = x_2^H \cdot V_{H/\text{rTS}} + y_2^H \cdot V_{H/\text{rTE}} + z_2^H \cdot V_{H/\text{rTP}}$$

Les matrices 10, 11 et 12 définissent les fonctions pour chaque impact ( $V_{H/\text{rTS}}$ ,  $V_{H/\text{rTE}}$  et  $V_{H/\text{rTP}}$ ) concernant les cibles humaines face à un flux thermique.

$$\text{matrice 10 : } V_{H/\text{rTS}} = f_1^H \cdot H_{1/\text{rTS}} + g_1^H \cdot H_{2/\text{rTS}} + h_1^H \cdot H_{3/\text{rTS}} + i_1^H \cdot H_{4/\text{rTS}}$$

$$\text{matrice 11 : } V_{H/ftE} = f_2^H \cdot H_{1/ftE} + g_2^H \cdot H_{2/ftE} + h_2^H \cdot H_{3/ftE} + i_2^H \cdot H_{4/ftE}$$

$$\text{matrice 12 : } V_{H/ftP} = f_3^H \cdot H_{1/ftP} + g_3^H \cdot H_{2/ftP} + h_3^H \cdot H_{3/ftP} + i_3^H \cdot H_{4/ftP}$$

### c) toxicité

La matrice 13 donne la vulnérabilité humaine pour un effet de toxicité ( $V_H^{\text{tox}}$ ).

$$\text{matrice 13 : } V_{H/tox} = x_3^H \cdot V_{H/toxS} + y_3^H \cdot V_{H/toxE} + z_3^H \cdot V_{H/toxP}$$

Les matrices 14, 15 et 16 définissent la vulnérabilité humaine face à un effet toxique en fonction des impact sanitaire, économique et psychologique et des cibles H1, H2, H3 et H4.

$$\text{matrice 14 : } V_{H/toxS} = k_1^H \cdot H_{1/toxS} + l_1^H \cdot H_{2/toxS} + m_1^H \cdot H_{3/toxS} + n_1^H \cdot H_{4/toxS}$$

$$\text{matrice 15 : } V_{H/toxE} = k_2^H \cdot H_{1/toxE} + l_2^H \cdot H_{2/toxE} + m_2^H \cdot H_{3/toxE} + n_2^H \cdot H_{4/toxE}$$

$$\text{matrice 16 : } V_{H/toxP} = k_3^H \cdot H_{1/toxP} + l_3^H \cdot H_{2/toxP} + m_3^H \cdot H_{3/toxP} + n_3^H \cdot H_{4/toxP}$$

### d) pollution liquide

De la même façon, pour la pollution liquide une vulnérabilité humaine est définie ( $V_{H/poll}$ )

$$\text{matrice 17 : } V_{H/poll} = x_4^H \cdot V_{H/pollS} + y_4^H \cdot V_{H/pollE} + z_4^H \cdot V_{H/pollP}$$

Les matrices 18, 19 et 20 explicitent de manière complète la fonction définie grâce à la matrice 17 pour chaque impact en fonction des cibles H1, H2, H3 et H4.

$$\text{matrice 18 : } V_{H/pollS} = p_1^H \cdot H_{1/pollS} + q_1^H \cdot H_{2/pollS} + r_1^H \cdot H_{3/pollS} + s_1^H \cdot H_{4/pollS}$$

$$\text{matrice 19 : } V_{H/pollE} = p_2^H \cdot H_{1/pollE} + q_2^H \cdot H_{2/pollE} + r_2^H \cdot H_{3/pollE} + s_2^H \cdot H_{4/pollE}$$

$$\text{matrice 20 : } V_{H/pollP} = p_3^H \cdot H_{1/pollP} + q_3^H \cdot H_{2/pollP} + r_3^H \cdot H_{3/pollP} + s_3^H \cdot H_{4/pollP}$$

En suivant le même raisonnement que pour les cibles humaines, les fonctions de vulnérabilités spécifiques aux cibles environnementales (paragraphe V.2.5.2) et aux cibles matérielles (paragraphe IV.2.5.3) sont construites.

#### IV.2.5.2 Vulnérabilité environnementale

La vulnérabilité environnementale est établie par l'expression suivante :

$$\text{matrice 3 : } V_E = \beta_1 \cdot V_{E/surp} + \beta_2 \cdot V_{E/ft} + \beta_3 \cdot V_{E/tox} + \beta_4 \cdot V_{E/poll}$$

De la même manière que pour les cibles humaines, chaque vulnérabilité environnementale face à un effet est décomposée en fonction des impacts et finalement exprimée avec les cibles E1, E2, E3 et E4.

L'importance relative des impacts pour un effet de surpression, de flux thermique, de toxicité et de pollution liquide est respectivement évaluée au travers des matrices 21, 25, 29 et 33.

$$\text{matrice 21 : } V_{E/\text{surp}} = x_1^E \cdot V_{E/\text{surpS}} + y_1^E \cdot V_{E/\text{surpE}} + z_1^E \cdot V_{E/\text{surpP}}$$

$$\text{matrice 25 : } V_{E/\text{ft}} = x_2^E \cdot V_{E/\text{ftS}} + y_2^E \cdot V_{E/\text{ftE}} + z_2^E \cdot V_{E/\text{ftP}}$$

$$\text{matrice 29 : } V_{E/\text{tox}} = x_3^E \cdot V_{E/\text{toxS}} + y_3^E \cdot V_{E/\text{toxE}} + z_3^E \cdot V_{E/\text{toxP}}$$

$$\text{matrice 33 : } V_{E/\text{poll}} = x_4^E \cdot V_{E/\text{pollS}} + y_4^E \cdot V_{E/\text{pollE}} + z_4^E \cdot V_{E/\text{pollP}}$$

L'importance relative des cibles E1, E2, E3 et E4, respectivement pour chaque impact, est évaluée pour :

➤ un effet de surpression par les matrices 22, 23 et 24

$$\text{matrice 22 : } V_{E/\text{surpS}} = a_1^E \cdot E_{1/\text{surpS}} + b_1^E \cdot E_{2/\text{surpS}} + c_1^E \cdot E_{3/\text{surpS}} + d_1^E \cdot E_{4/\text{surpS}}$$

$$\text{matrice 23 : } V_{E/\text{surpE}} = a_2^E \cdot E_{1/\text{surpE}} + b_2^E \cdot E_{2/\text{surpE}} + c_2^E \cdot E_{3/\text{surpE}} + d_2^E \cdot E_{4/\text{surpE}}$$

$$\text{matrice 24 : } V_{E/\text{surpP}} = a_3^E \cdot E_{1/\text{surpP}} + b_3^E \cdot E_{2/\text{surpP}} + c_3^E \cdot E_{3/\text{surpP}} + d_3^E \cdot E_{4/\text{surpP}}$$

➤ un effet de flux thermique par les matrices 26, 27 et 28

$$\text{matrice 26 : } V_{E/\text{ftS}} = f_1^E \cdot E_{1/\text{ftS}} + g_1^E \cdot E_{2/\text{ftS}} + h_1^E \cdot E_{3/\text{ftS}} + i_1^E \cdot E_{4/\text{ftS}}$$

$$\text{matrice 27 : } V_{E/\text{ftE}} = f_2^E \cdot E_{1/\text{ftE}} + g_2^E \cdot E_{2/\text{ftE}} + h_2^E \cdot E_{3/\text{ftE}} + i_2^E \cdot E_{4/\text{ftE}}$$

$$\text{matrice 28 : } V_{E/\text{ftP}} = f_3^E \cdot E_{1/\text{ftP}} + g_3^E \cdot E_{2/\text{ftP}} + h_3^E \cdot E_{3/\text{ftP}} + i_3^E \cdot E_{4/\text{ftP}}$$

➤ un effet de toxicité par les matrices 30, 31 et 32

$$\text{matrice 30 : } V_{E/\text{toxS}} = k_1^E \cdot E_{1/\text{toxS}} + l_1^E \cdot E_{2/\text{toxS}} + m_1^E \cdot E_{3/\text{toxS}} + n_1^E \cdot E_{4/\text{toxS}}$$

$$\text{matrice 31 : } V_{E/\text{toxE}} = k_2^E \cdot E_{1/\text{toxE}} + l_2^E \cdot E_{2/\text{toxE}} + m_2^E \cdot E_{3/\text{toxE}} + n_2^E \cdot E_{4/\text{toxE}}$$

$$\text{matrice 32 : } V_{E/\text{toxP}} = k_3^E \cdot E_{1/\text{toxP}} + l_3^E \cdot E_{2/\text{toxP}} + m_3^E \cdot E_{3/\text{toxP}} + n_3^E \cdot E_{4/\text{toxP}}$$

➤ un effet de pollution liquide par les matrices 34, 35 et 36

$$\text{matrice 34 : } V_{E/\text{pollS}} = p_1^E \cdot E_{1/\text{pollS}} + q_1^E \cdot E_{2/\text{pollS}} + r_1^E \cdot E_{3/\text{pollS}} + s_1^E \cdot E_{4/\text{pollS}}$$

$$\text{matrice 35 : } V_{E/\text{pollE}} = p_2^E \cdot E_{1/\text{pollE}} + q_2^E \cdot E_{2/\text{pollE}} + r_2^E \cdot E_{3/\text{pollE}} + s_2^E \cdot E_{4/\text{pollE}}$$

$$\text{matrice 36 : } V_{E/\text{pollP}} = p_3^E \cdot E_{1/\text{pollP}} + q_3^E \cdot E_{2/\text{pollP}} + r_3^E \cdot E_{3/\text{pollP}} + s_3^E \cdot E_{4/\text{pollP}}$$

#### IV.2.5.3 Vulnérabilité matérielle

La vulnérabilité matérielle est exprimée grâce à la fonction suivante :

$$\text{matrice 4 : } V_M = \gamma_1 \cdot V_{M/\text{surp}} + \gamma_2 \cdot V_{M/\text{ft}} + \gamma_3 \cdot V_{M/\text{tox}} + \gamma_4 \cdot V_{M/\text{poll}}$$

De la même manière que pour les cibles humaines, chaque vulnérabilité matérielle face à un effet est décomposée en fonction des impacts et finalement exprimée avec les cibles M1, M2, M3 et M4.

L'importance relative des impacts pour un effet de surpression, de flux thermique, de toxicité et de pollution liquide est respectivement évaluée au travers des matrices 37, 41, 45 et 49.

$$\text{matrice 37 : } V_{M/\text{surp}} = x_1^M \cdot V_{M/\text{surps}} + y_1^M \cdot V_{M/\text{surpe}} + z_1^M \cdot V_{M/\text{surpp}}$$

$$\text{matrice 41 : } V_{M/\text{ft}} = x_2^M \cdot V_{M/\text{fts}} + y_2^M \cdot V_{M/\text{fte}} + z_2^M \cdot V_{M/\text{ftp}}$$

$$\text{matrice 45 : } V_{M/\text{tox}} = x_3^M \cdot V_{M/\text{toxs}} + y_3^M \cdot V_{M/\text{toxe}} + z_3^M \cdot V_{M/\text{toxP}}$$

$$\text{matrice 49 : } V_{M/\text{poll}} = x_4^M \cdot V_{M/\text{polls}} + y_4^M \cdot V_{M/\text{polle}} + z_4^M \cdot V_{M/\text{pollp}}$$

L'importance relative des cibles M1, M2, M3 et M4, respectivement pour chaque impact, est évaluée pour :

➤ un effet de surpression par les matrices 38, 39 et 40

$$\text{matrice 38 : } V_{M/\text{surpS}} = a_1^M \cdot M_{1/\text{surpS}} + b_1^M \cdot M_{2/\text{surpS}} + c_1^M \cdot M_{3/\text{surpS}} + d_1^M \cdot M_{4/\text{surpS}}$$

$$\text{matrice 39 : } V_{M/\text{surpE}} = a_2^M \cdot M_{1/\text{surpE}} + b_2^M \cdot M_{2/\text{surpE}} + c_2^M \cdot M_{3/\text{surpE}} + d_2^M \cdot M_{4/\text{surpE}}$$

$$\text{matrice 40 : } V_{M/\text{surpP}} = a_3^M \cdot M_{1/\text{surpP}} + b_3^M \cdot M_{2/\text{surpP}} + c_3^M \cdot M_{3/\text{surpP}} + d_3^M \cdot M_{4/\text{surpP}}$$

➤ un effet de flux thermique par les matrices 42, 43 et 44

$$\text{matrice 42 : } V_{M/\text{ftS}} = f_1^M \cdot M_{1/\text{ftS}} + g_1^M \cdot M_{2/\text{ftS}} + h_1^M \cdot M_{3/\text{ftS}} + i_1^M \cdot M_{4/\text{ftS}}$$

$$\text{matrice 43 : } V_{M/\text{ftE}} = f_2^M \cdot M_{1/\text{ftE}} + g_2^M \cdot M_{2/\text{ftE}} + h_2^M \cdot M_{3/\text{ftE}} + i_2^M \cdot M_{4/\text{ftE}}$$

$$\text{matrice 44 : } V_{M/\text{ftP}} = f_3^M \cdot M_{1/\text{ftP}} + g_3^M \cdot M_{2/\text{ftP}} + h_3^M \cdot M_{3/\text{ftP}} + i_3^M \cdot M_{4/\text{ftP}}$$

➤ un effet de toxicité par les matrices 46, 47 et 48

$$\text{matrice 46 : } V_{M/\text{toxS}} = k_1^M \cdot M_{1/\text{toxS}} + l_1^M \cdot M_{2/\text{toxS}} + m_1^M \cdot M_{3/\text{toxS}} + n_1^M \cdot M_{4/\text{toxS}}$$

$$\text{matrice 47 : } V_{M/\text{toxE}} = k_2^M \cdot M_{1/\text{toxE}} + l_2^M \cdot M_{2/\text{toxE}} + m_2^M \cdot M_{3/\text{toxE}} + n_2^M \cdot M_{4/\text{toxE}}$$

$$\text{matrice 48 : } V_{M/\text{toxP}} = k_3^M \cdot M_{1/\text{toxP}} + l_3^M \cdot M_{2/\text{toxP}} + m_3^M \cdot M_{3/\text{toxP}} + n_3^M \cdot M_{4/\text{toxP}}$$

➤ un effet de pollution liquide par les matrices 50, 51 et 52

$$\text{matrice 50 : } V_{M/pollS} = p_1^M \cdot M_{1/pollS} + q_1^M \cdot M_{2/pollS} + r_1^M \cdot M_{3/pollS} + s_1^M \cdot M_{4/pollS}$$

$$\text{matrice 51 : } V_{M/pollE} = p_2^M \cdot M_{1/pollE} + q_2^M \cdot M_{2/pollE} + r_2^M \cdot M_{3/pollE} + s_2^M \cdot M_{4/pollE}$$

$$\text{matrice 52 : } V_{M/pollP} = p_3^M \cdot M_{1/pollP} + q_3^M \cdot M_{2/pollP} + r_3^M \cdot M_{3/pollP} + s_3^M \cdot M_{4/pollP}$$

L'agrégation de l'ensemble de ces formules permet d'aboutir à l'indice de vulnérabilité V de vulnérabilité globale.

#### IV.2.6 Représentation matricielle et questionnaire associé pour la réalisation des appréciations

A partir des structures hiérarchiques présentées ci-dessus, un jeu de 54 matrices est construit (annexe II). Ces matrices permettent de recueillir les appréciations des experts en vue d'évaluer les facteurs de pondération. La forme matricielle est le mode de représentation le plus synthétique, mais il reste peu lisible. En effet, les matrices traduisent les appréciations à réaliser de manière schématique et les experts doivent reconstruire une phrase représentant chaque appréciation ce qui augmente alors de manière considérable le temps pour compléter l'ensemble des matrices. Pour pallier à cet inconvénient, un questionnaire avec des réponses à choix multiples a été fait (annexe I) et soumis à des experts.

Pour réaliser les appréciations, les experts utilisent l'échelle de comparaisons binaires citée dans le paragraphe V.1.2.2. Seuls cinq niveaux (5, 3, 1, 1/3 et 1/5) ont été retenus pour réaliser ces appréciations dans le but de simplifier les avis des experts. L'échelle retenue et la définition des niveaux sont présentées dans le tableau II.15.

Degré d'importance	Définition	Commentaire
1	Égale importance des deux éléments	Les deux éléments ont une contribution identique
5	Importance d'un élément par rapport à l'autre	L'expérience et l'appréciation personnelle favorisent un élément par rapport à l'autre
9	Importance forte ou déterminante d'un élément par rapport à l'autre	L'expérience et l'appréciation personnelle favorisent fortement un élément par rapport à l'autre
1/5, 1/9	Comparaisons inverses	

Tableau II.15 : Echelle de comparaison binaire pour l'élaboration de la vulnérabilité

#### *IV.2.7 Obtention des facteurs de pondération*

Le questionnaire a été soumis à une dizaine d'experts :

- des inspecteurs des installations classées de la DRIRE,
- des tiers experts dans le domaine des risques industriels,
- des chercheurs dans le domaine des risques industriels,
- des officiers de sapeurs-pompiers spécialisés dans le risque chimique.

Plus le nombre d'experts consultés est important plus les résultats sont valides. Il est nécessaire de réaliser un traitement spécifique de chaque réponse pour les synthétiser et donc pour pouvoir évaluer les vecteurs propres qui correspondent aux facteurs de pondération de la fonction de vulnérabilité. Deux approches sont envisageables [73] :

- une première où les experts consultés sont regroupés et leurs appréciations sont concaténées au travers d'une phase de discussion (un seul questionnaire complété représentant les avis de l'ensemble du groupe d'expert consulté)

- une seconde où chaque expert est consulté de manière indépendante. Les appréciations sont concaténées en réalisant une moyenne géométrique [73] de chaque type d'appréciations (autant de questionnaires qu'il y a d'experts sont remplis).

La première solution présente l'avantage d'arriver à un consensus sur l'ensemble des appréciations mais par contre, les personnes qui ont une influence importante au vu de leur expérience vont prendre le dessus sur les autres experts et donc cela fausserait les appréciations recueillies. D'un point de vue fonctionnel et pour recueillir le plus grand nombre d'avis d'experts il a été retenu la deuxième solution qui consiste en une consultation indépendante de chaque expert.

Les résultats obtenus, décrits dans le chapitre III, sont les facteurs de pondération et sont reportés dans les formules de calcul de l'indice V.

Au travers des trois indices G, F et V, le site industriel et son environnement ont été étudiés. A ce stade, il s'agit d'agrèger ces trois indices pour aboutir au niveau de risque.

## V Niveau de risques par accident majeur et niveau de risque global

### V.1 Niveau de risques par accident majeur

Pour obtenir le niveau de risque d'un accident majeur  $NR_i$ , il faut :

- évaluer le potentiel danger en multipliant l'indice de gravité  $G$  par l'indice de flux  $F$  [54].
- multiplier le potentiel danger ainsi obtenu par la vulnérabilité de la maille étudiée [54] [58].

La figure II.21 présente les différents types de niveaux de risques qui peuvent être évalués et donc les différents types de cartographie.

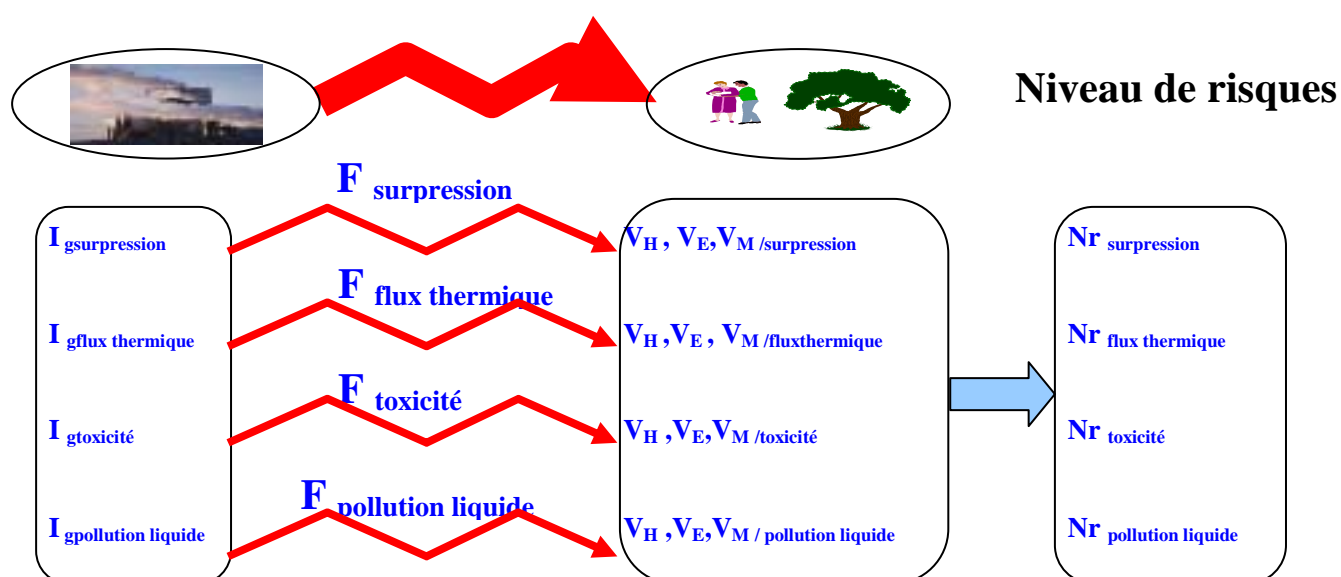


Figure II.21 : Schématisation du niveau de risques

Pour chaque maille, un niveau de risque par accident majeur ( $Nr_i$ ) est évalué.

### V.2 Niveau de risques global

En fait, lors des étapes précédentes, chaque scénario d'accident majeur donne une carte de niveau de risque, mais il est nécessaire de les agréger dans le but d'obtenir une cartographie du niveau de risque unique. Pour cela, il suffit d'attribuer à chaque maille le score le plus

important avec comme référence la séquence d'accident majeur qui génère ce score. Ceci permet d'obtenir une carte avec les niveaux de risques maximums. Finalement, l'évaluation du niveau de risque global est égale à la moyenne des niveaux de risques de chaque maille de la carte.

Par exemple, une étude simplifiée pourrait donner les résultats suivants :

Nr par accident n°1

3	5
1	2

Nr pour accident n°2

1	2
2	2

A partir du niveau de risque des deux accidents majeurs, la carte des niveaux de risques maximums est la suivante :

<b>3</b> accident 1	<b>5</b> accident 1
<b>2</b> accident 2	<b>2</b> accident 1 ou 2

Pour obtenir la carte des niveaux de risques, c'est-à-dire celle qui permet de tenir compte de l'ensemble des accidents majeurs identifiés, à chaque maille est attribuée la valeur maximale de niveau de risque.

Le niveau de risque global est calculé en faisant la moyenne des valeurs des niveaux de risques maximums et est donc égal à 3 sur une échelle de 6 niveaux pour l'exemple précédent.

## VI Les principales limitations de la méthode

La méthode présentée permet dans un premier temps d'évaluer un niveau de risque dépendant

- de l'accident majeur (gravité et flux)
- et des cibles présentes dans l'environnement (vulnérabilité)

Cette approche fait un état des lieux de la situation à risque pour cibler les efforts nécessaires permettant une meilleure gestion du risque.

Une limitation importante à cette méthode repose sur le fait que les résultats de l'étude de danger lui servent de base, donc la validité des résultats de la méthode dépend de la validité des résultats affichés et aussi de la mise à jour de ces données.

**CHAPITRE 3 : Outil cartographique et application**

## **I Développement de l’outil cartographique**

Dans le chapitre précédent, la méthode de calcul du niveau de risque a été décrite, grâce à un jeu d’indices (gravité, flux de propagation et vulnérabilité). Elle permet d’évaluer un niveau de risque par accident majeur et l’agrégation de ces niveaux de risque aboutit à un niveau de risque global. Le traitement des données relatives au site industriel peut se réaliser de manière rapide à partir d’une étude de danger ou bien d’un plan d’opération interne. En effet, ces deux documents décrivent les principales séquences accidentelles susceptibles de se produire sur le site industriel considéré. Par contre, l’étude des données relatives à l’environnement du site industriel demande un temps plus important si l’on n’utilise pas d’outil adapté. L’utilisation d’un système d’information géographique permet un traitement automatisé des informations. Au préalable, il faut avoir développé une interface spécifique à la problématique.

### ***1.1 Les principes du traitement cartographique***

Le système d’information géographique (S.I.G.) est un logiciel de cartographie informatisé [76], [77]. Il permet l’affichage et le traitement de bases de données. Les informations contenues dans la base de données, sous la forme de tables, sont retranscrites sous la forme de couches d’information grâce à des objets de type région (objet surfacique du système d’information géographique Mapinfo®) auxquels sont attribués un ensemble d’informations spécifiques. Plusieurs types de couches d’informations sont superposables en fonction des objectifs de l’étude. Dans le cadre de ce travail, la superposition de couches d’informations relatives à la population et à l’environnement naturel est réalisée. Le logiciel regroupe des informations géographiques de même type dans une couche donnée (couverture naturelle, réseau hydrographique, réseau routier,...). L’agrégation de ces couches donne une carte (figure III.1).

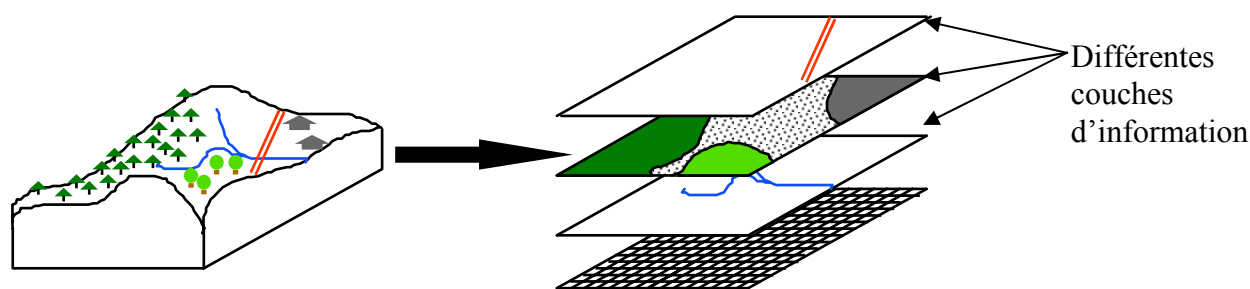


Figure III.1 : La structure d'une carte sous un système d'information géographique [77].

En France, il existe deux principaux fournisseurs de bases de données :

- l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE),
- et l'Institut Géographique National (IGN).

Les couches d'informations, qui ont été retenues pour cette étude, sont :

- pour les données concernant les populations : Le recensement de 1999 de la population en France (INSEE) [78] associé à une couche d'informations cartographiques de l'IGN, la BDcarto [79].

- pour les données concernant l'environnement naturel : La base de données Corine Land Cover. Cette base de données a pour but de décrire, au niveau européen, l'occupation du sol sous la forme d'une information géographique homogène [80].

La base de données Corine Land Cover est structurée selon une nomenclature de 44 éléments structurés en cinq grands types d'occupation du territoire qui sont :

- Les territoires artificialisés, c'est-à-dire les territoires sur lesquels la présence de l'homme est quotidienne (tissus urbains, zones commerciales, réseaux de communications, ...)
- Les territoires agricoles, qui correspondent aux terres arables, aux prairies, aux cultures permanentes,...
- Les forêts et les milieux semi naturels : ce sont tous les types de forêts, les zones à végétation arbustive ou avec peu de végétation
- Les zones humides (les marais, ...)
- Les surfaces en eau (les plans d'eau, les lagunes, les rivières, les mers, les océans, ...)

Un exemple de représentation de la base de données de Corine Land Cover est présenté sur la figure III.2. Cette carte permet de visualiser le type de végétation dans le département du Gard.

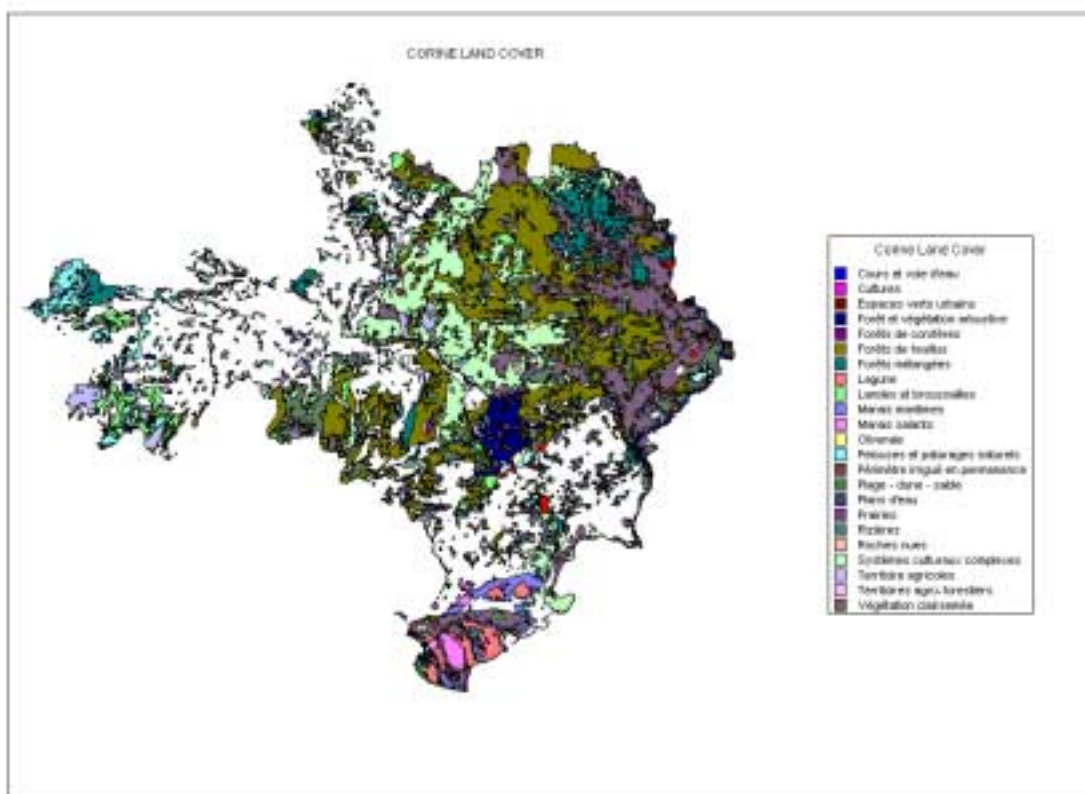


Figure III.2 : Analyse thématique sous le S.I.G. MapInfo des différents types de végétation dans le Gard.

## ***1.2 Les objectifs de l'outil cartographique***

L'outil cartographique a pour but d'évaluer et de représenter l'indice de vulnérabilité (indice V) propre au site industriel étudié. Il doit permettre un traitement informatisé des informations (identification et quantification) concernant le type de cibles présentes dans une zone définie. Par identification, il est entendu l'appartenance d'une cible d'une base de données à la typologie développée. Par quantification, il est entendu un facteur représentant l'importance de la cible en terme de nombre ou bien de surface occupée.

Pour atteindre cet objectif, il est tout d'abord nécessaire de découper l'environnement en mailles, ceci permet d'aboutir à une analyse plus précise, d'un point de vue spatial, du niveau de risque.

### ***1.3 Les étapes clés de l’outil cartographique***

Les étapes clés de l’outil sont les suivantes :

- Etape 1 : la création de la grille : il s’agit de créer un ensemble de mailles carrées de 250 mètres de côté formant une zone d’étude carrée de 20 kilomètres de côté. Le site industriel est situé au centre de la zone d’étude,
- Etape 2 : l’identification et la quantification des types de cibles par maille,
- Etape 3 : le calcul de la vulnérabilité de chaque maille,
- Etape 4 : l’affichage de cartes thématiques comme la vulnérabilité globale, ou bien plus spécifique comme une couche propre à la vulnérabilité humaine ou bien relative à un effet physique (surpression , flux thermique, ...).

La figure III.3 synthétise les grandes parties de l’outil cartographique.

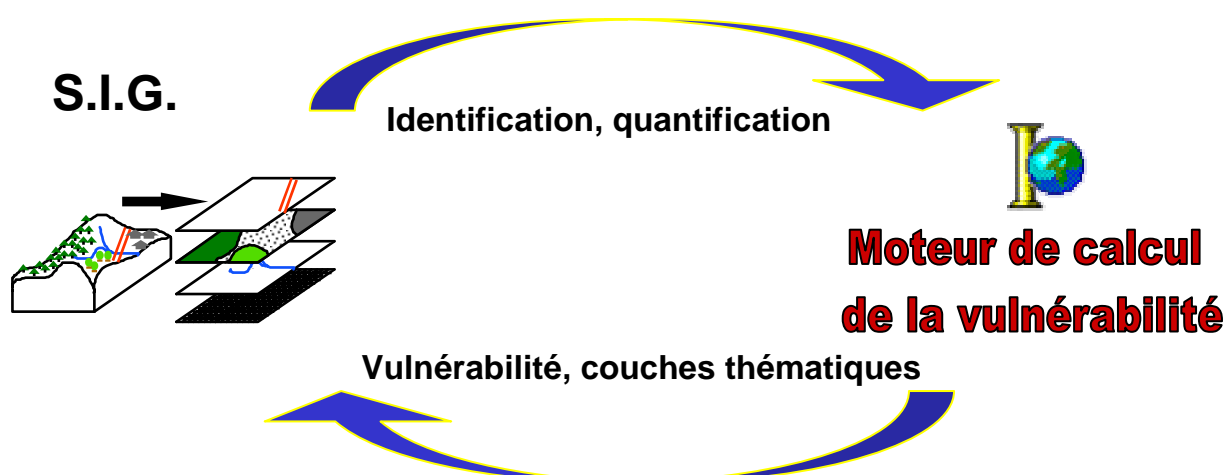


Figure III.3 : Schéma de fonctionnement de l’application S.I.G. pour la détermination de la vulnérabilité d’une zone.

#### **1.3.1 Création de la grille d’étude**

La zone d’étude carrée de 20 kilomètres de côté est créée à l’aide d’objets unitaires qui représentent une maille de la zone géoréférencée. L’assemblage de toutes les mailles constitue la zone d’étude. Cette grille est alors stockée dans une table pour la gestion de l’enregistrement d’une analyse de vulnérabilité.

### I.3.2 Récupération des données sur les couches d'informations

L'outil développé à l'aide du S.I.G. MapInfo fonctionne maille par maille. Ainsi, la récupération des cibles présentes dans chaque maille est réalisée grâce à un jeu de requêtes permettant l'intersection entre la maille et la couche de données (figure III.4).

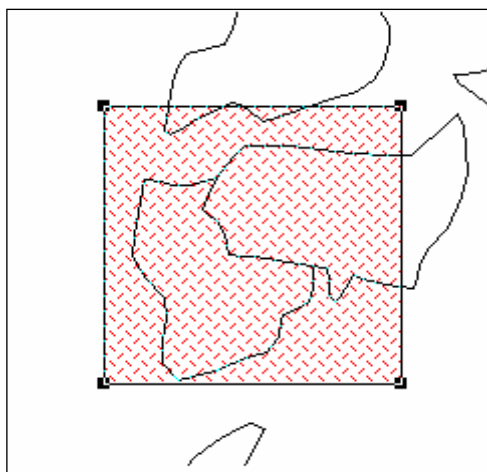


Figure III.4 : Représentation d'une maille et visualisation de la phase de récupération des données.

Le résultat de cette phase est un tableau contenant le type de cible identifié et un facteur quantitatif associé. Ce facteur correspond :

- Pour les cibles humaines : le facteur de quantification est représenté par un pourcentage de population et dépend en fait du type d'objet.
  - Pour les objets surfaciques (cibles de type « population locale sédentaire »), le facteur quantitatif est égal à la densité de la commune multipliée par la surface de la commune contenue dans la maille divisée par le nombre de population maximum présent dans une maille.
  - Pour les objets linéiques (cibles de type « usagers des voies de communication ») : le facteur quantitatif est construit à partir de la densité horaire de trafic par kilomètre multipliée par la longueur du tronçon de route contenue dans la maille et divisée par le nombre de population maximum présent dans une maille.
  - Pour les objets de type ponctuel (cibles de type « personnel du site » et « personnes fréquentant les ERP ») : le facteur quantitatif est évalué par le

rapport entre le nombre de personnes présents dans l'ERP ou bien sur le site industriel et le nombre de population maximum présent dans une maille. Le nombre de personnes présentes dans un ERP sera évalué grâce à la réglementation des établissements recevant du public [81].

- Pour les cibles environnementales. Quelle que soit la cible environnementale (E1, E2, E3 et E4), la représentation est un objet de type surfacique. Pour obtenir un facteur quantitatif normalisé, il suffit de faire le rapport entre la surface de l'objet en intersection avec la maille d'étude et la surface de la maille d'étude. Ce rapport représente le pourcentage surfacique d'un objet contenu dans une maille.
- Pour les cibles matérielles (objets ponctuels), le facteur quantitatif se base sur un dénombrement.

### **I.3.3 Moteur de calcul de la vulnérabilité**

Les résultats types de l'identification des cibles et de la quantification de celles-ci, sont alors exportés vers le moteur de calcul qui permet de prendre en compte les facteurs de pondération propres à chaque cible.

Le moteur de calcul évalue la valeur de l'indice de vulnérabilité globale (méthode développée dans le chapitre II, paragraphe IV) et les valeurs de vulnérabilité intermédiaires comme par exemple :

- la vulnérabilité humaine, environnementale ou matérielle
- la vulnérabilité par type d'effet physique comme la surpression, le flux thermique, la toxicité gaz ou bien la pollution liquide.

### **I.3.4 Représentation cartographique des résultats**

Les résultats obtenus grâce au moteur de calcul ne sont pas retranscrits sur le S.I.G. sous la forme numérique. Ils sont représentés grâce à une échelle de vulnérabilité proposée ci-dessous qui traduit le niveau de vulnérabilité en fonction d'un code couleur (figure III.5).

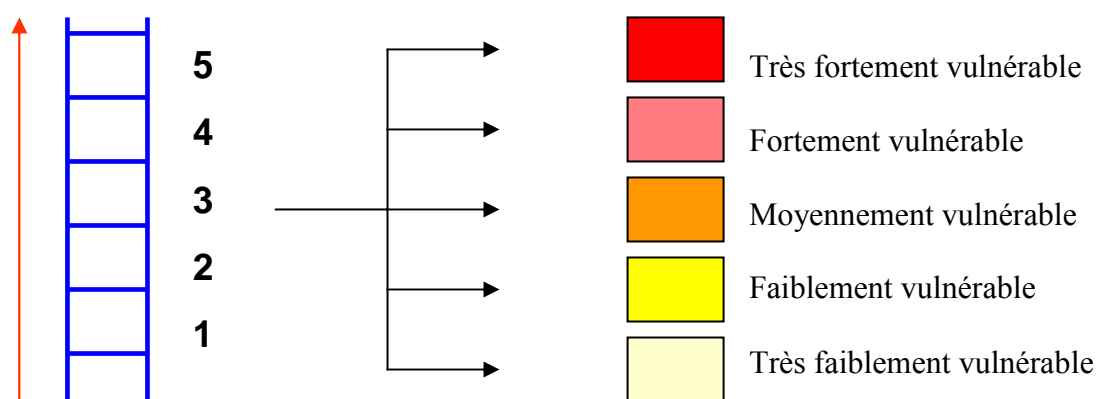


Figure III.5 : L'échelle de vulnérabilité

L'échelle de vulnérabilité est constituée de 5 niveaux de vulnérabilité, car c'est une approche commune avec les services de secours pour la politique de prévention, d'une vulnérabilité très faible (niveau 1, couleur bleu) à une vulnérabilité très forte (niveau 5, couleur rouge).

Cette séquence, décrite pour une maille, est alors réalisée pour l'ensemble des mailles de la zone d'étude pour obtenir une cartographie complète de celle-ci.

#### ***1.4 Exemple de traitement cartographique***

L'exemple d'interface présentée sur la figure III.6 correspond à l'interface du S.I.G. Map Info auquel a été ajouté un module dédié à l'analyse de la vulnérabilité d'une zone géographique. La couche de données utilisée est la couche Corine Land Cover qui représente l'occupation du sol par la végétation et donc caractérise les cibles environnementales. Sur cette couche, une grille ou zone d'étude carrée de cinq kilomètres de côté a été tracée et le processus de calcul de la vulnérabilité évalue la vulnérabilité environnementale (couche thématique) en tenant compte de l'ensemble des effets physiques générés par les accidents majeurs.

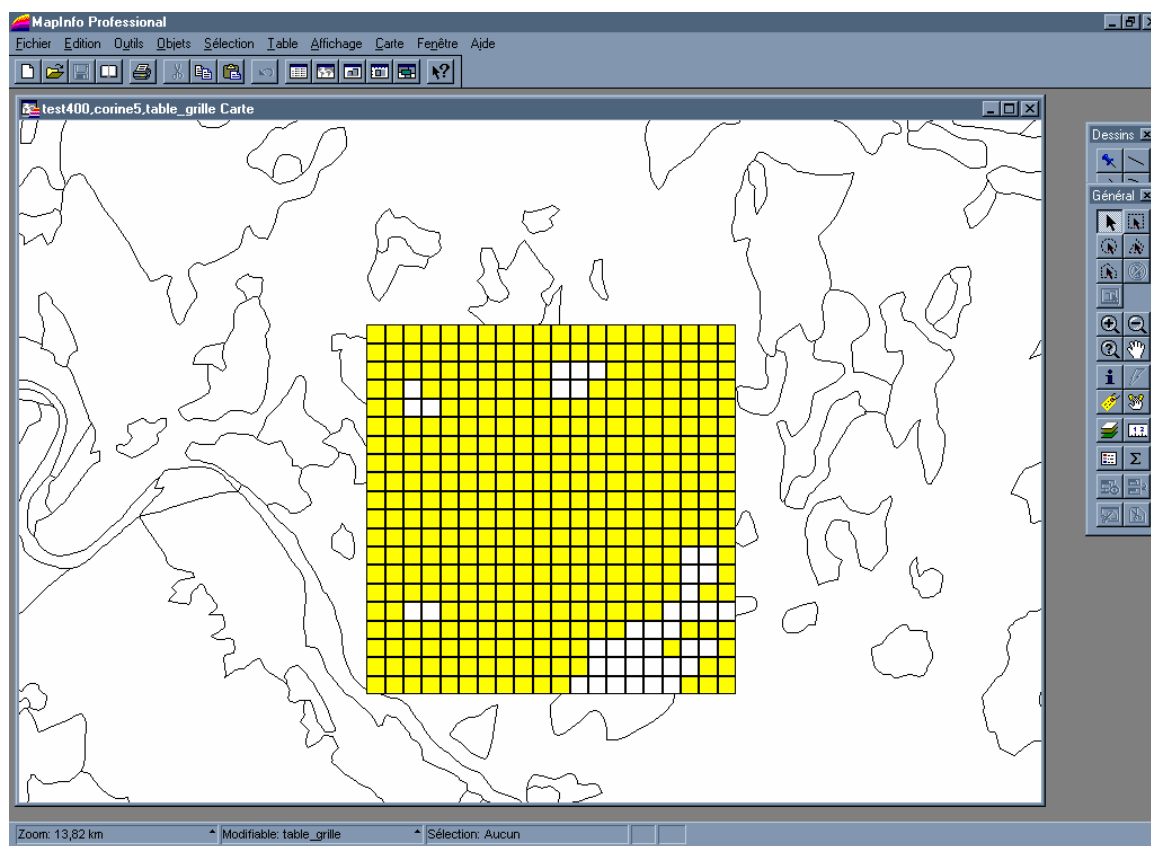


Figure III.6 : Exemple d'interface de Map Info avec le module d'analyse de la vulnérabilité ; couche d'information spécifique à la vulnérabilité environnementale.

La grille de la figure III.6 représente une analyse de vulnérabilité environnementale pour les quatre effets (surpression, flux thermique, toxicité, pollution liquide).

## II Description de la zone d'étude

Le site industriel étudié est un site soumis à la réglementation Seveso II. En effet, ses activités nécessitent la présence de substances dangereuses en quantité supérieure aux seuils définis dans la réglementation. Pour des raisons de confidentialité, la localisation et les informations réelles concernant le site industriel ne seront pas précisées

## II.1 Le site industriel

Pour ne pas mettre en évidence des différences entre les résultats de l'étude et les distances définies dans l'étude de danger, nous avons délibérément décidé de placer le site industriel sur une commune fictive. Le site pilote retenu est situé à proximité de la ville d'Alès et utilise et stocke des substances visées par la directive 96/82 CE (directive Seveso II) dans les proportions suivantes :

- Ammoniac liquide (32 tonnes en deux citernes de 20 tonnes)
- Propane (12 tonnes soit 20 m<sup>3</sup>, 1 citerne)

Ces différentes substances dangereuses sont réparties sur le site en fonction des différentes unités et sont présentées sur le plan de masse de l'usine (Figure II.7).

Les principaux risques identifiés sont les suivants :

- la dispersion d'un nuage de gaz toxique
- le scénario d'explosion

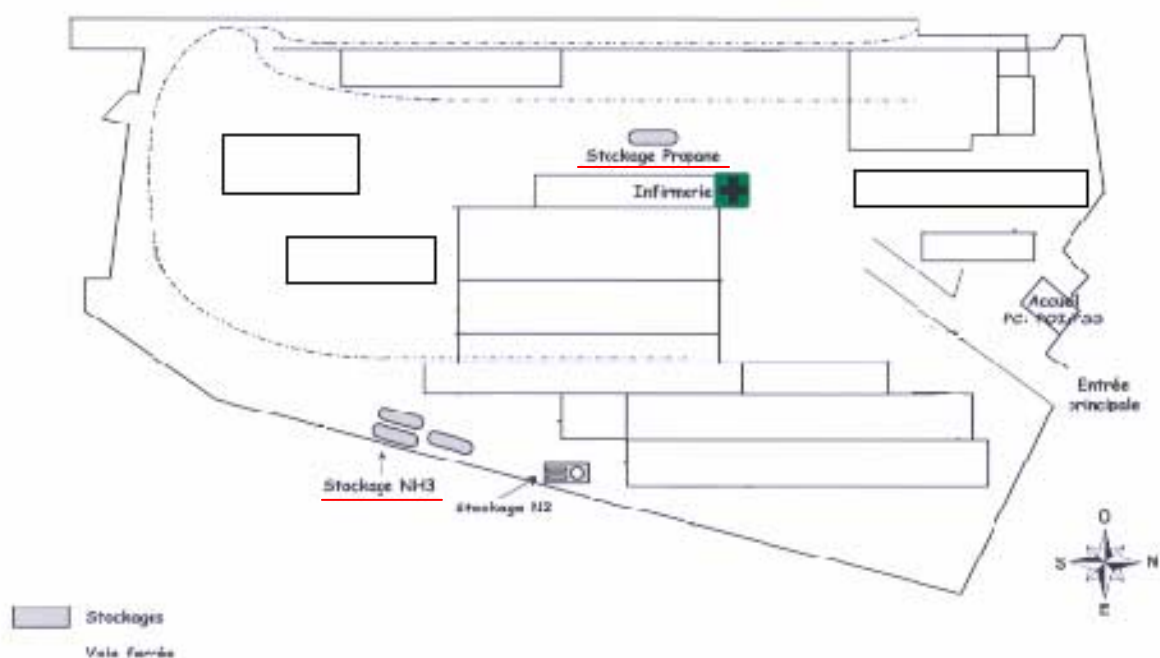


Figure III.7 : Localisation des scénarios d'accident sur le plan de masse du site industriel.

## II.2 Environnement du site industriel

Pour des raisons de confidentialité, le site industriel est localisé, de manière fictive, dans le Gard. La commune d'accueil fictive est celle de Saint Privas Les Vieux, au Sud d'Alès. La carte de la figure III.8 localise la zone d'étude.

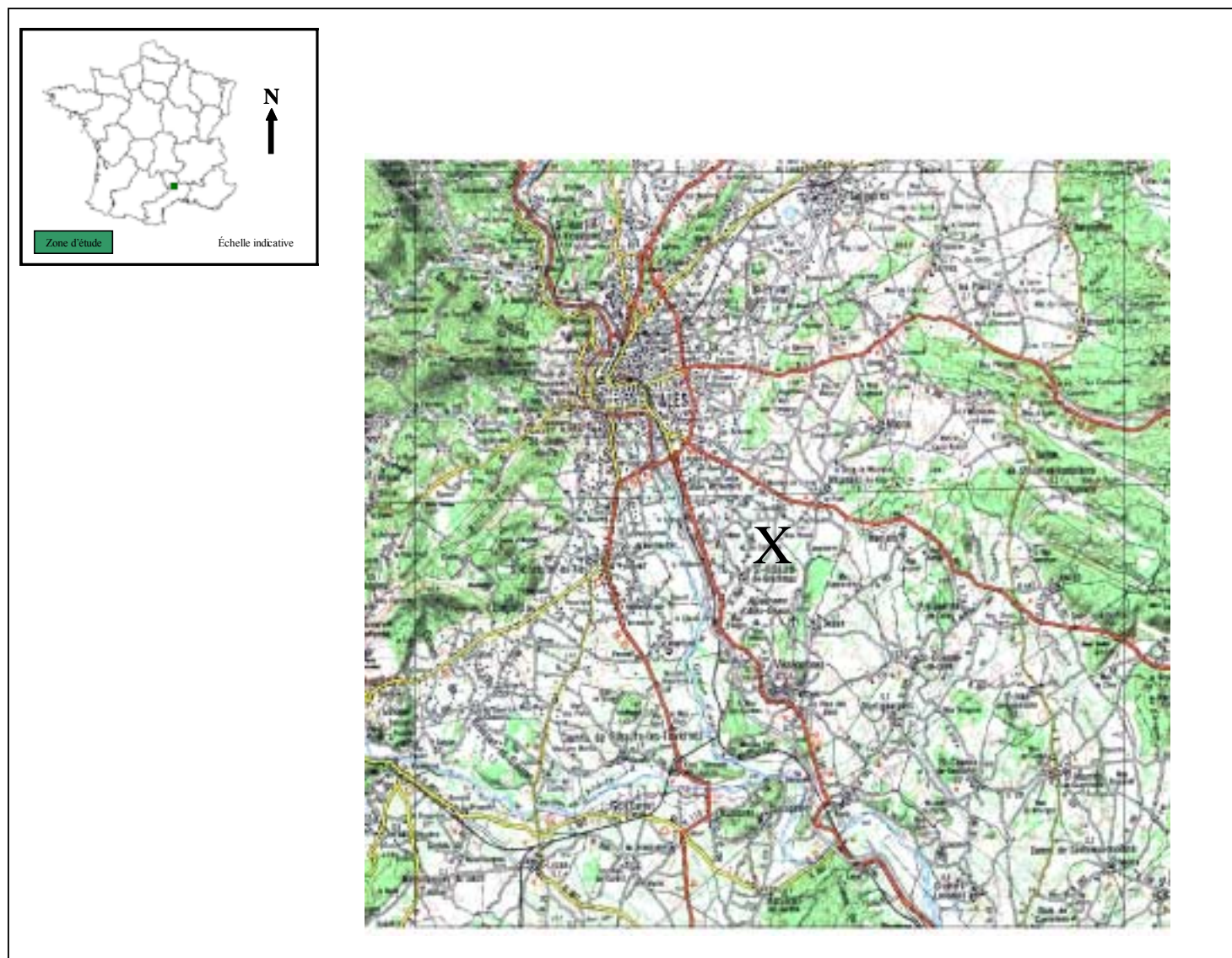


Figure III.8 : Carte de localisation du site industriel.

Des enjeux humains, environnementaux et matériels sont présents autour du site industriel.

Concernant les enjeux humains, la zone d'étude est principalement composée de communes à faible et moyenne densité de population pour le département du Gard (entre 0 et 500 habitants au km<sup>2</sup>). Seule la commune d'Alès présente une densité forte voisine de 1800 habitants au

km<sup>2</sup> (figure III.9). Les 195 personnes constituent le personnel du site, ce qui représente une population importante à proximité des sources de dangers.

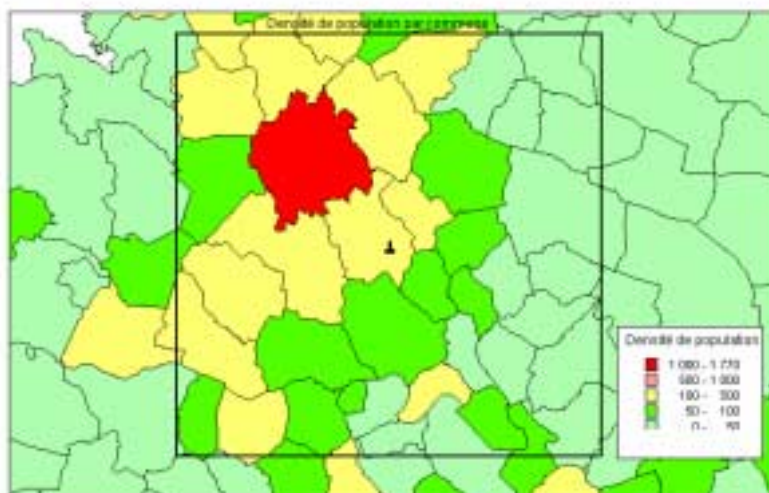


Figure III.9 : Cartographie de la densité de population

Le réseau des voies de communication est principalement composé de liaisons locales (450 Kms avec un trafic faible) et de liaisons de type régionale et à grande circulation avec respectivement 42 Kms pour le premier et 82 Kms pour le second (figure III.10).



Figure III.10 : Cartographie du réseau routier

Pour l'environnement naturel, la zone d'étude est principalement composée de systèmes cultureux et parcellaires complexes, de forêts de feuillus et de territoires agricoles (Figure III.11).

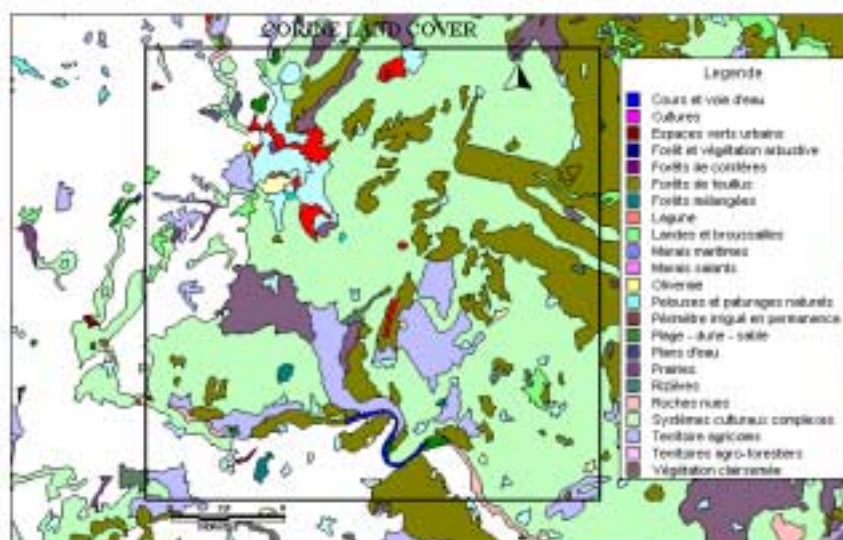


Figure III.11 : Cartographie de la couverture naturelle pour la zone d'étude

De la figure III.11 se déduit, à partir de la typologie proposée au paragraphe IV.2.2.2 du chapitre 2, la carte présentée dans la figure III.12.

L'environnement naturel est alors principalement composé de cible de type « terres agricoles » (E1) et de cibles de type « espaces naturels » (E2). Par ailleurs, il y également quelques cibles de type « milieux aquatiques » (E4) (figure III.12).

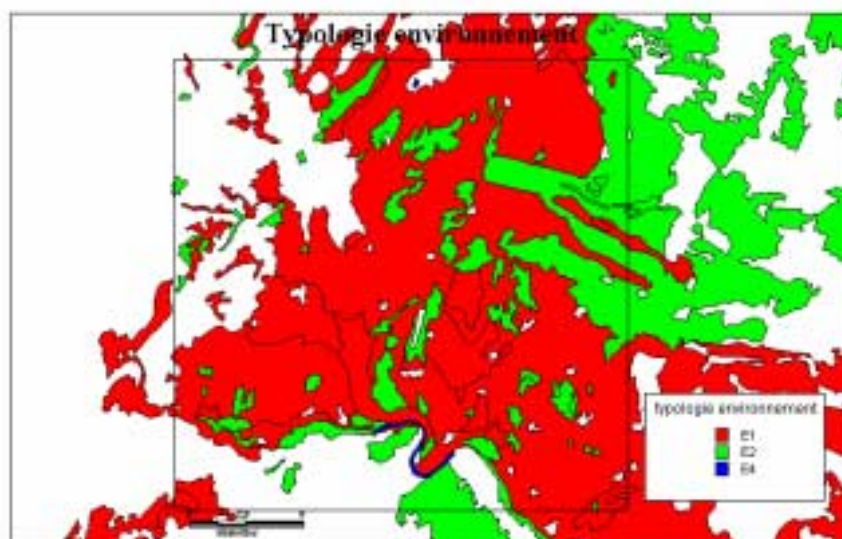


Figure III.12 : Cartographie de couverture naturelle selon la typologie proposée.

Dans un premier temps, les cibles matérielles ne sont pas prises en compte dans l'outil cartographique. Le fait de réaliser cette approximation amènera une variation de la

vulnérabilité globale mais avec une faible amplitude au vu du poids affecté à ce type de cibles (environ 5% de la vulnérabilité globale).

### III Application de la méthode

Ce paragraphe est la mise en œuvre de la méthode développée dans le chapitre II.

Les phases principales de la méthode sont :

- 1 : le calcul des différents indices,
- 2 : l'agrégation de ces derniers pour évaluer le potentiel danger et le niveau de risque par accident,
- 3 : le calcul du niveau de risque global.

La première phase de calcul des indices nécessite l'identification des scénarios retenus pour réaliser l'étude. Ensuite, pour chaque séquence accidentelle, un indice de gravité est évalué ainsi que l'indice de flux de propagation associé. Le traitement cartographique permet une évaluation de l'indice de vulnérabilité grâce à une analyse spatiale de l'occupation du sol, sur la zone d'étude.

La deuxième phase consiste en l'agrégation de ces indices pour aboutir à différents types de résultats :

- un potentiel danger par séquence accidentelle (agrégation des indices de gravité et de flux de propagation),
- des cartographies de vulnérabilité par type de cible (humaine, environnementale et matérielle),
- des cartographies par type d'effet (surpression, flux thermique, toxique et pollution liquide) pour une catégorie de cible donnée,
- un niveau de risque par séquence accidentelle,
- et finalement un niveau de risques global du système étudié.

Il est important de noter que le potentiel danger ne peut pas être comparé pour deux phénomènes accidentels qui ne sont pas de la même classe. En effet, à chaque type de phénomène accidentel est associée une échelle de gravité à 6 niveaux. Ainsi, deux phénomènes accidentels de niveau 6 pourraient être considérés comme équivalents, ce qui n'est pas exact. En effet, une pollution liquide de niveau de gravité 6, ne sera sûrement pas comparable du point de vue des conséquences à une dispersion de gaz toxique avec une gravité de niveau 6 également. La prise en compte du niveau de risque doit inclure la

dimension spatiale du phénomène accidentel et ainsi hiérarchiser ces deux séquences accidentelles. Il est donc nécessaire d'évaluer leurs niveaux de risque pour pouvoir comparer deux séquences accidentelles générant des effets différents.

L'industriel au travers du document Plan d'Opération Interne fournit la liste de scénarios d'accident suivante :

- scénario 1 : stockage d'ammoniac : perte totale de confinement (repère 1 sur la figure III.7),
- scénario 2 : fuite sur ligne de distribution d'ammoniac (repère 2 sur la figure III.7),
- scénario 3 : fuite sur le stockage de propane (repère 3 sur la figure III.7).

### **III.1 Les accidents majeurs retenus**

Les trois scénarios accidentels retenus dans le plan d'opération interne, peuvent générer les phénomènes physiques suivants :

- des effets de surpressions (UVCE d'un nuage de propane)
- et de effets de toxicité (perte totale et instantanée du confinement d'un réservoir de stockage d'ammoniac et fuite due à une rupture du piquage en pied de cuve d'un réservoir de stockage d'ammoniac)

pour le système étudié.

#### **III.1.1 Scénario n°1 : Perte totale et instantanée du confinement d'un des réservoirs d'ammoniac**

Les caractéristiques du scénario n°1 sont les suivantes :

- la substance dangereuse est l'ammoniac
- la masse mise en jeu est de 16 tonnes
- une rupture instantanée du confinement
- les conditions météorologiques retenues correspondent à une classe de stabilité D selon Pasquill pour un vent d'une intensité de 5 m/s.

Ce scénario correspond à l'effet physique toxicité, les seuils d'effet pour l'ammoniac sont [71] :

- Seuil des effets létaux : 5000 ppm
- Seuil des effets irréversibles : 300 ppm
- Seuil des effets réversibles : 25 ppm

Pour appliquer l'ensemble de la méthode proposée, il est nécessaire d'avoir notamment la distance à laquelle apparaissent les effets réversibles, donnée non disponible dans les documents fournis par l'industriel. Pour obtenir cette dernière, conformément à ce qui a été réalisé dans l'étude de danger, un code gaussien de rejet instantané est utilisé [82] pour évaluer les distances d'effet.

Les résultats de la modélisation du scénario précédent sont les suivants pour les distances des effets létaux  $d_{ZEL}$ , irréversibles  $d_{ZEI}$ , et réversibles  $d_{ZER}$  :

- $d_{ZEL} = 1200$  m
- $d_{ZEI} = 3600$  m
- $d_{ZER} = 8100$  m

#### III.1.1.1 Indice de gravité

Pour le cas de l'ammoniac, la phrase de risque associée correspond à R23 (toxique) donc un niveau de dangerosité 3 est attribué à l'indice de gravité (voir chapitre II, tableau II.6). Cela correspond à un niveau de toxicité moyen.

Le facteur d'aggravation dû à la structure (sous pression) est niveau 5 d'après le tableau II.10 du chapitre II. Ce niveau correspond à la valeur maximale du facteur d'aggravation dû à la structure.

En ce qui concerne le facteur d'aggravation dû à la quantité, les résultats (voir chapitre II, tableau II.11) sont obtenus dans le tableau III.1.

Substance	Quantité de substance mise en jeu	Classe suivant l'annexe I de la norme Seveso II	Seuil haut (tonnes)	Seuil bas (tonnes)	Facteur d'aggravation dû à la quantité
Ammoniac	16 tonnes	Toxique	20	5	4

Tableau III.1 : Données et résultats concernant le facteur d'aggravation dû la quantité mise en jeu

Le facteur d'aggravation dû à la quantité vaut 4 sur une échelle de 6.

Pour obtenir l'indice de gravité propre à la séquence accidentelle n°1, il faut réaliser le produit des trois indices précédents entre eux, soit :

$$I_{\text{gravité scénario 1}} = I_{\text{dangerosité}} \times F_{\text{structure}} \times F_{\text{quantité}},$$

$$I_{\text{gravité scénario 1}} = 60 \text{ en valeur brute}$$

Avec l'utilisation de l'échelle des niveaux de gravité (tableau III.1) :

Indice de gravité en valeur brute	Indice de gravité
$150 \leq I_{\text{gravité}} \leq 180$	6
$120 \leq I_{\text{gravité}} < 150$	5
$90 \leq I_{\text{gravité}} < 120$	4
$60 \leq I_{\text{gravité}} < 90$	3
$30 \leq I_{\text{gravité}} < 60$	2
$0 \leq I_{\text{gravité}} < 30$	1

Tableau III.2 : indice de gravité

L'indice de gravité pour le scénario 1 à un niveau de gravité de 3, qui est sur l'échelle de gravité une valeur moyenne.

### III.1.1.2 Indice de flux

L'indice de flux de propagation dépend des distances auxquelles sont obtenus les seuils d'effets létaux, irréversibles et réversibles. A partir de ces données, la zone d'étude est discrétisée en quatre zones où le flux de propagation de l'accident majeur évolue (voir paragraphe III, chapitre II).

Pour le scénario 1, l'indice de flux donne les résultats présentés sur la figure III.13.

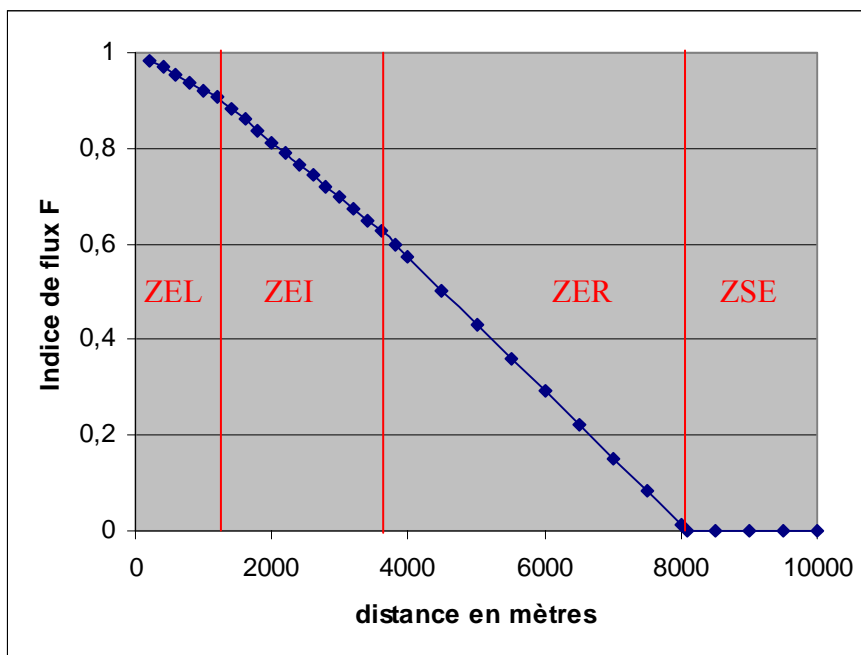


Figure III.13 : Evolution du flux de propagation en fonction de la distance source – cible pour le scénario 1.

L'indice de flux diminue de manière linéaire et spécifique pour chaque zone d'effet (ZEL, ZEI et ZER) et est nul pour une distance supérieure à la limite des effets réversibles.

D'autre part, le cas d'une dispersion de gaz toxique est considéré comme un phénomène accidentel anisotrope, donc une ou des directions préférentielles sont à définir en fonction de la rose des vents.

La rose des vents concernant le site étudié est la suivante (figure III.14) :

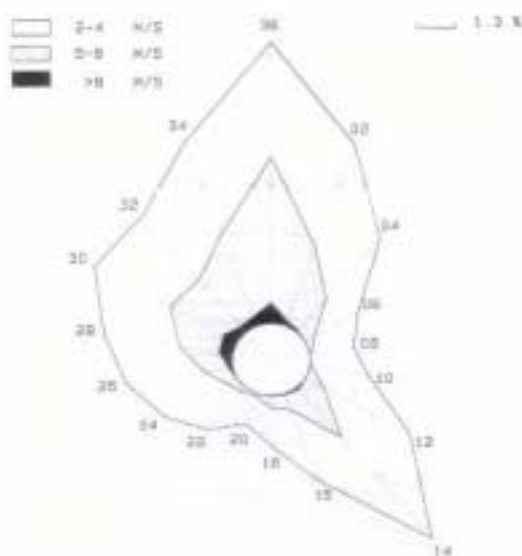


Figure III.14 : rose des vents

De cette rose des vents, quatre secteurs préférentiels (zone en pointillées) sont retenus pour évaluer le flux de propagation et donc le potentiel danger. Ces secteurs sont les suivants (figure III.15) :

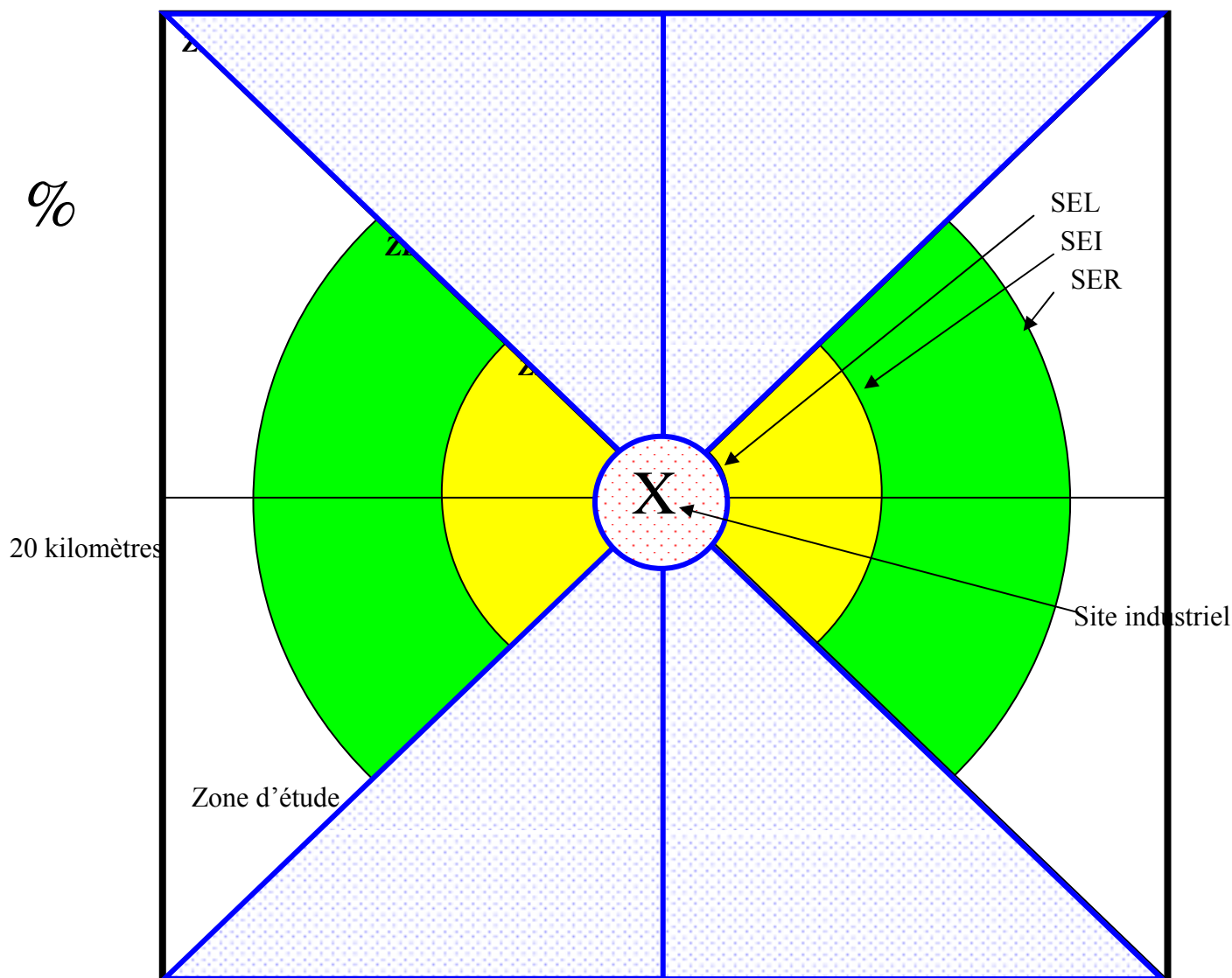


Figure III.15 : Schéma des secteurs préférentiels retenus pour l'étude de la dispersion d'un gaz toxique.

La zone en pointillés de la figure III.11 correspond à la zone d'effet de l'accident considéré. A partir de la valeur de l'indice de gravité et de l'évolution du flux de danger, le potentiel danger susceptible d'affecter les cibles est calculé.

### III.1.1.3 Potentiel danger

Le potentiel danger s'obtient en multipliant l'indice de gravité par la valeur de l'indice de flux en fonction de la distance par rapport à la source (figure III.16).

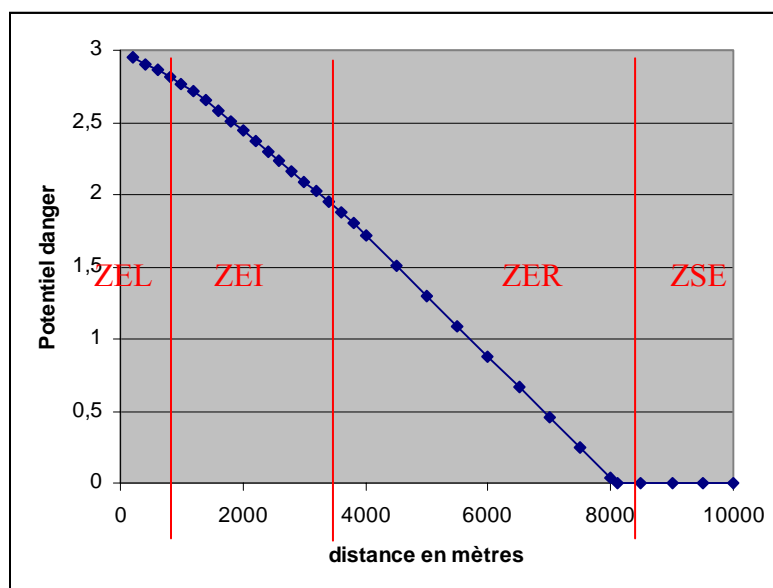


Figure III.16 : Fonction potentiel danger pour le scénario 1.

Le potentiel danger est maximum pour des valeurs proches de la source et décroît au fur et à mesure que cette distance augmente pour atteindre une valeur nulle pour une distance supérieure au seuil des effets réversibles.

Dans la suite de ce paragraphe les indices de gravité des scénarios 2 et 3 seront évalués d'une manière équivalente.

### III.1.2 Scénario n°2 : rupture du piquage en pied de cuve d'un réservoir de stockage d'ammoniac

Les caractéristiques du scénario n°2 sont les suivantes :

- la substance dangereuse est l'ammoniac
- la masse mise en jeu est de 7 tonnes
- une rupture de piquage a lieu en pied de cuve d'un réservoir de stockage d'ammoniac
- un rideau d'eau peut être mis en place
- les conditions météorologiques retenues correspondent à une classe de stabilité D selon Pasquill pour un vent d'une intensité de 5 m/s.

L'effet physique est la toxicité par inhalation avec des seuils identiques au scénario n°1 [71]. Comme pour le scénario n°1, il faut évaluer la zone des effets réversibles. Ceci est modélisé grâce à un code de dispersion gaussien avec un rejet continu panache [81].

Les résultats de la modélisation donnent :

- $d_{ZEL} = 360$  m
- $d_{ZEI} = 1800$  m

➤  $d_{ZER} = 7700 \text{ m}$

Où  $d_{ZEL}$  est la distance des effets létaux,  $d_{ZEI}$  la distance des effets irréversibles et  $d_{ZER}$  la distance des effets réversibles.

### III.1.2.1 l'indice de gravité

De façon similaire au calcul précédent, l'indice de gravité est évalué à partir de l'indice de dangerosité, et des facteurs d'aggravation dus à la quantité et au contenant.

Les résultats de ce scénario sont synthétisés dans le tableau III.2.

$I_{\text{dangerosité}}$	$F_{\text{quantité}}$	$F_{\text{contenant}}$	$I_{\text{gravité en valeur brute}}$	$I_{\text{gravité}}$
3	3	5	45	2

Tableau III.3 : Tableau de synthèse pour l'indice de gravité du scénario 2.

L'indice de gravité du scénario a pour valeur 2 soit une valeur inférieure au scénario 1 qui est du même type.

### III.1.2.2 l'indice de flux

De la même manière que pour le scénario n°1, l'évolution du flux est la suivante (Figure III.17).

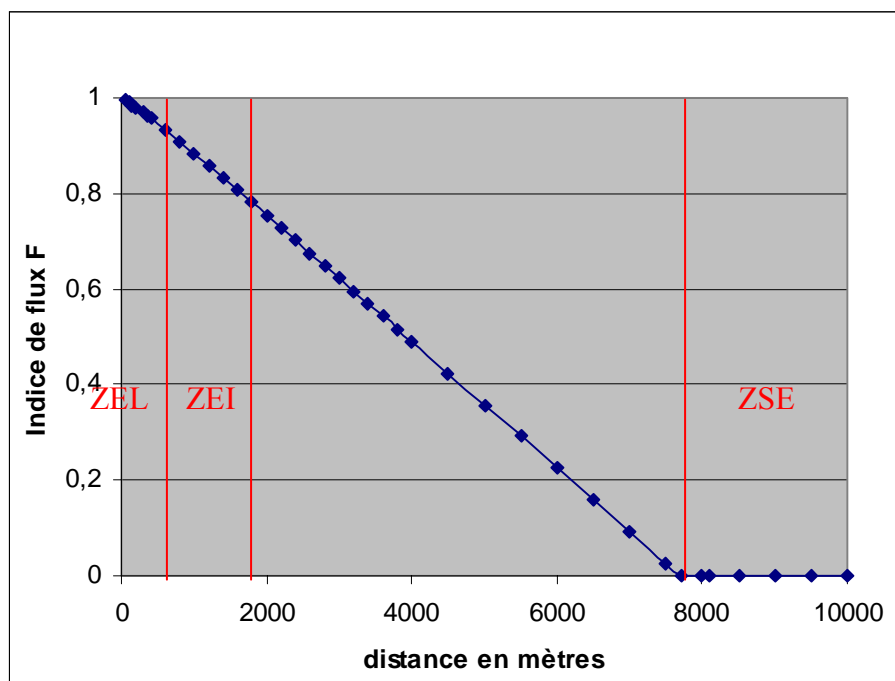


Figure III.17 : Flux de propagation pour le scénario 2.

### III.1.2.3 le potentiel danger

Le potentiel danger pour le scénario 2 est alors le suivant :

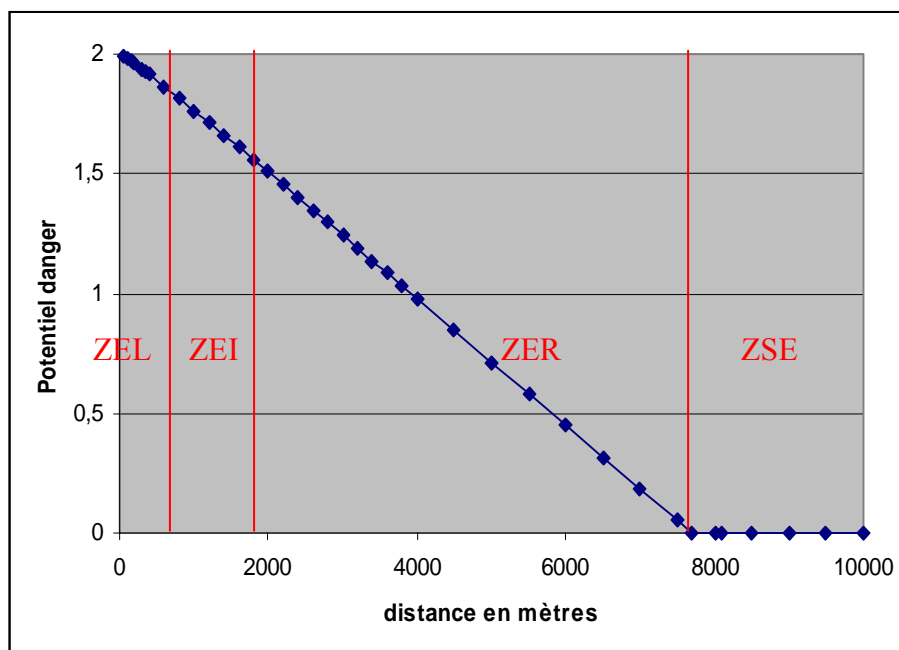


Figure III.18 : Potentiel danger pour le scénario 2.

Les potentiels dangers pour les deux scénarios de dispersion (scénario 1 et 2) ont une évolution similaire en fonction de la distance, seule l'intensité est modifiée.

### III.1.3 Scénario n°3 : rupture guillotine de la ligne de soutirage gaz du stockage de propane

Ce scénario génère une explosion de type Unconfined Vapour Cloud Explosion, dont les effets prépondérants sont les surpressions. Les seuils d'effet sont [71] :

- Seuil des effets létaux : 140 mbars,
- Seuil des effets irréversibles : 50 mbars,
- Seuil des effets réversibles : 30 mbars.

L'accident est dû à une rupture guillotine de la ligne de soutirage gaz du stockage de propane. La quantité de substance dangereuse émise à l'atmosphère est de 12500 kg. La modélisation des distances d'effet est réalisée grâce à la méthode de l'équivalent TNT et donne les résultats suivants pour un rendement d'explosion de 10% [82] :

- $d_{ZEL} = 280$  m,
- $d_{ZEI} = 600$  m,
- $d_{ZER} = 900$  m.

### III.1.3.1 l'indice de gravité

Dans le cas d'une explosion de type UVCE, l'effet physique prépondérant correspond aux surpressions. Le tableau III.3 synthétise les valeurs afférentes à l'indice de gravité (voir paragraphe II.2.1.2 du chapitre II).

I <sub>dangerosité</sub>	F <sub>quantité</sub>	F <sub>contenant</sub>	I <sub>gravité en valeur brute</sub>	I <sub>gravité</sub>
5	1	5	25	2

Tableau III.4 : Tableau de synthèse pour l'indice de gravité du scénario 3.

Pour le scénario 3, l'indice de gravité a pour valeur 2 sur une échelle de 6.

### III.1.3.2 l'indice de flux

L'indice de flux est évalué pour le scénario 3 est représenté par la figure III.19.

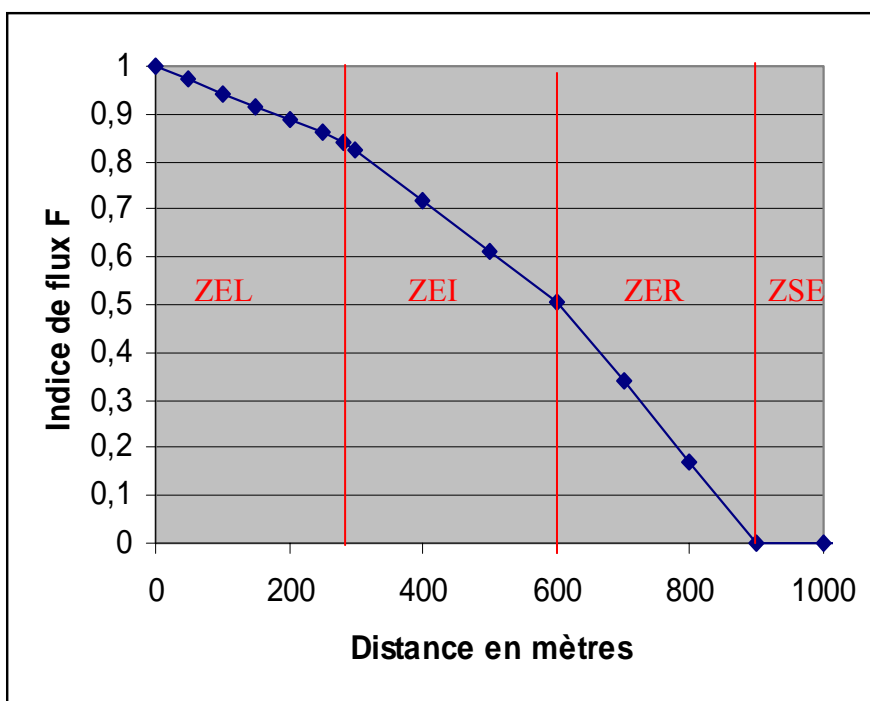


Figure III.19 : Flux de propagation pour le scénario 3.

### III.1.3.3 le potentiel danger

De la même façon, le potentiel danger suivant est obtenu (figure III.20)

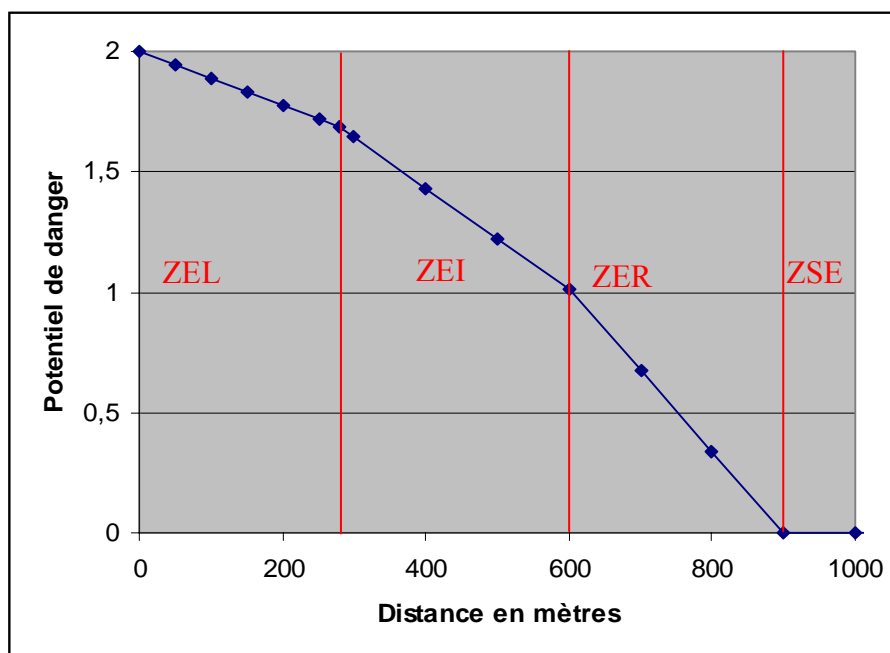


Figure III.20 : Potentiel danger pour le scénario 3.

### III.1.4 Synthèse des potentiels danger

Les trois scénarios d'accidents majeurs ont été décrits et quantifiés dans les paragraphes précédents pour aboutir aux fonctions de potentiel danger de chacun qui sont présentés dans la figure III.21.

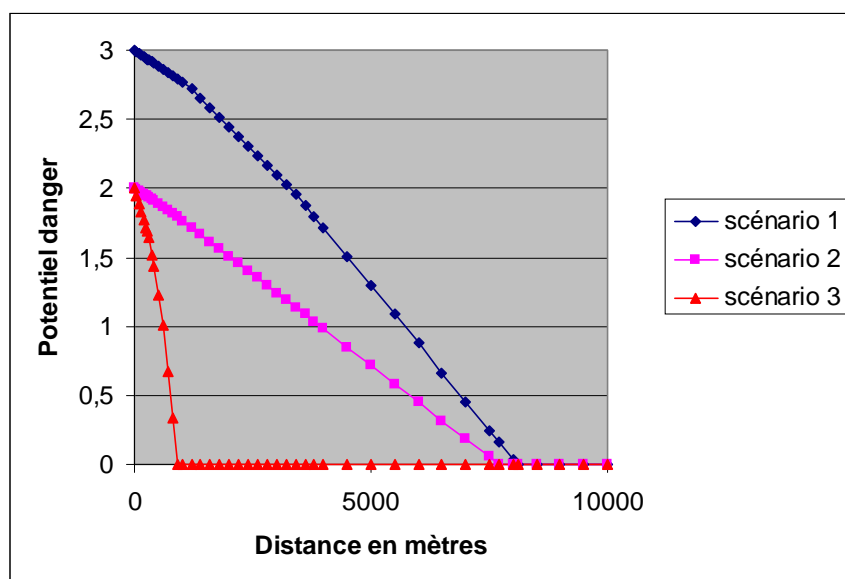


Figure III.21 : Potentiel danger pour le scénario 1,2 et 3.

Le scénario ayant la valeur d'indice de gravité la plus importante dans ce cas, correspond à la rupture totale de confinement d'un stockage d'ammoniac (indice de gravité niveau 3). D'un point de vue spatial, les scénarios 1 et 2 n'affectent pas, de manière concentrique, la zone d'étude, en effet seulement quatre secteurs sur les huit sont touchés. Le scénario 3 d'explosion de type UVCE est isotrope mais au vu des distances d'effet, il affecte uniquement une zone proche du site industriel (zone inférieure ou égale à 900 mètres).

Le potentiel danger étant évalué pour l'ensemble des scénarios, la phase suivante consiste au calcul de la vulnérabilité de la zone d'étude afin d'obtenir les cartographies de vulnérabilités globales et spécifiques.

### **III.2 L'indice de vulnérabilité**

Pour évaluer l'indice de vulnérabilité, il faut calculer l'ensemble des facteurs de pondération. La méthode a été décrite dans le chapitre II paragraphe IV.2.7. Pour résumer, la démarche, une dizaine de questionnaires a été collectée de manière indépendante. Ensuite, l'ensemble des appréciations ont été concaténées en réalisant leur moyenne géométrique. Ceci permet de compléter un questionnaire représentant l'ensemble des avis. Les facteurs de pondération sont alors évalués en calculant les vecteurs propres de chaque matrice. Les résultats de l'analyse sont donnés dans les paragraphes III.2.1, III.2.2, III.2.3, III.2.4 et III.2.5.

#### **III.2.1 La fonction de vulnérabilité globale**

La fonction de vulnérabilité globale est donnée par la formule 1 :

$$V_{\text{globale}} = 0,743.V_H + 0,197.V_E + 0,060.V_M \text{ (formule 1)}$$

Elle est fonction de trois variables qui sont :

- la vulnérabilité humaine
- la vulnérabilité environnementale
- et la vulnérabilité matérielle

Les résultats obtenus grâce au traitement des appréciations réalisées par les experts donne une très forte prépondérance, près de 75 %, au facteur de pondération associé à la vulnérabilité humaine. La vulnérabilité environnementale est affectée d'un facteur de pondération représentant 20% de la vulnérabilité globale et finalement la vulnérabilité matérielle ne représente que 6% de la fonction de vulnérabilité globale (Figure III.22).

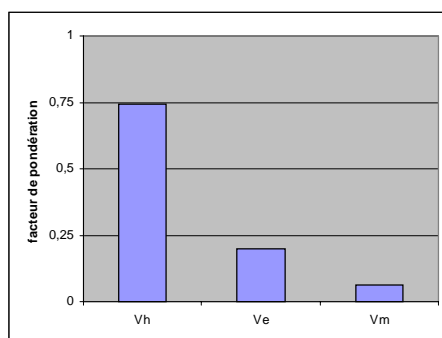


Figure III.22 : Répartition des poids de vulnérabilité pour les cibles humaines, environnementales et matérielles pour la fonction de vulnérabilité globale.

Chaque terme de vulnérabilité humaine (Vh), environnementale (Ve) et matérielle (Vm) est alors exprimé en fonction des effets physiques de surpression, de flux thermique, de toxicité et de pollution liquide (Figure III.19).

### III.2.2 Les fonctions de vulnérabilité humaine, environnementale et matérielle

La vulnérabilité humaine en fonction des effets physiques est décrite par la formule 2, celle concernant l'environnement correspond à la formule 3 et finalement la formule 4 représente la vulnérabilité matérielle.

$$V_H = 0,253.V_{H/surp} + 0,301.V_{H/ft} + 0,391.V_{H/tox} + 0,055.V_{H/poll} \text{ (formule 2)}$$

$$V_E = 0,088.V_{E/surp} + 0,198.V_{E/ft} + 0,303.V_{E/tox} + 0,411.V_{E/poll} \text{ (formule 3)}$$

$$V_M = 0,524.V_{M/surp} + 0,368.V_{M/ft} + 0,054.V_{M/tox} + 0,054.V_{M/poll} \text{ (formule 4)}$$

La répartition des facteurs de vulnérabilité sont représentés par le graphe suivant (figure III.23).

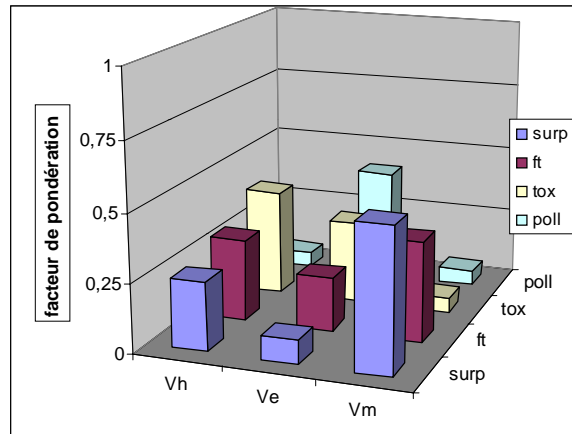


Figure III.23 : Répartition des poids de vulnérabilité par chaque classe de cibles en fonction des effets physiques.

Pour les cibles humaines (formule 2), l'effet prépondérant est l'effet toxique qui représente près de 40% de la fonction. Les flux thermiques et les surpressions ont des valeurs du même ordre de grandeur (entre 25 et 30%). L'effet de pollution liquide, en fait, n'affecte que très peu les cibles humaines contrairement aux cibles environnementales, il représente pour ces dernières plus de 40% (formule 3). En ce qui concerne les cibles matérielles (formule 4), la quasi-totalité de l'influence est due à la surpression (52,4%) et au flux thermique (36,8%).

### III.2.3 Les fonctions de vulnérabilité humaine pour chaque effet

Les fonctions de vulnérabilité humaine se définissent de la façon suivante :

$$V_{H/surp} = 0,644.V_{H/surps} + 0,085.V_{H/surpe} + 0,271.V_{H/surpp} \text{ (formule 5)}$$

$$V_{H/ft} = 0,669.V_{H/fts} + 0,088.V_{H/fte} + 0,243.V_{H/ftp} \text{ (formule 6)}$$

$$V_{H/tox} = 0,698.V_{H/toxs} + 0,064.V_{H/toxe} + 0,238.V_{H/toxp} \text{ (formule 7)}$$

$$V_{H/poll} = 0,614.V_{H/polls} + 0,117.V_{H/polle} + 0,269.V_{H/pollp} \text{ (formule 8)}$$

Quel que soit l'effet physique considéré (formules 5, 6, 7 et 8), l'impact sanitaire est prépondérant pour définir la vulnérabilité humaine (environ 65%). L'impact psychologique est important mais dans une moindre mesure (environ 25%) tandis que l'impact économique représente en général moins de 10%.

### III.2.3.1 Rappels de la typologie des cibles humaines

La signification des termes H1, H2, H3 et H4 est rappelée ci-dessous :

- H1 : personnel du site
- H2 : population locale sédentaire
- H3 : personnes présentes dans les ERP
- H4 : usagers des voies de communications

Les termes  $H_i$  sont utilisés dans les paragraphes suivants pour décrire les fonctions de vulnérabilité humaine pour chaque effet physique.

### III.2.3.2 la vulnérabilité humaine pour un effet de surpression

La vulnérabilité humaine par rapport à un effet de surpression est déduite des formules 9, 10 et 11.

$$V_{H/surps} = 0,519.H_{1/surps} + 0,150.H_{2/surps} + 0,194.H_{3/surps} + 0,137.H_{4/surps} \text{ (formule 9)}$$

$$V_{H/surpe} = 0,517.H_{1/surpe} + 0,279.H_{2/surpe} + 0,110.H_{3/surpe} + 0,094.H_{4/surpe} \text{ (formule 10)}$$

$$V_{H/surpp} = 0,246.H_{1/surpp} + 0,289.H_{2/surpp} + 0,289.H_{3/surpp} + 0,176.H_{4/surpp} \text{ (formule 11)}$$

Pour un effet de surpression, d'un point de vue sanitaire (formule 9), la cible « personnel du site » est la cible la plus vulnérable. D'un point de vue économique (formule 10), les cibles « personnel du site » et « population locale sédentaire », dans une moindre mesure représentent les cibles les plus vulnérables, respectivement 51,7% et 27,9%. Quel que soit le type de cibles humaines, pour un impact psychologique, la sensibilité est la même (formule 11)

### III.2.3.3 la vulnérabilité humaine pour un effet de flux thermique

La vulnérabilité humaine face à un flux thermique pour chaque impact est décrite par les formules 12, 13 et 14.

$$V_{H/fts} = 0,453.H_{1/fts} + 0,253.H_{2/fts} + 0,183.H_{3/fts} + 0,111.H_{4/fts} \text{ (formule 12)}$$

$$V_{H/fte} = 0,474.H_{1/fte} + 0,316.H_{2/fte} + 0,100.H_{3/fte} + 0,110.H_{4/fte} \text{ (formule 13)}$$

$$V_{H/ftp} = 0,243.H_{1/ftp} + 0,343.H_{2/ftp} + 0,243.H_{3/ftp} + 0,171.H_{4/ftp} \text{ (formule 14)}$$

Des points de vue sanitaire et économique (formules 12 et 13), la vulnérabilité de la cible « personnel du site » représente 45% et celle de la « population locale sédentaire » environ 27% de la fonction pour un flux thermique. D'un point de vue psychologique, une légère prépondérance de vulnérabilité est donnée à la cible « population locale sédentaire » (formule 14).

#### III.2.3.4 la vulnérabilité humaine pour un effet de toxicité

La vulnérabilité humaine pour un effet toxique est traduite au travers des fonctions 15, 16 et 17.

$$V_{H/toxs} = 0,340.H_{1/toxs} + 0,281.H_{2/toxs} + 0,239.H_{3/toxs} + 0,140.H_{4/toxs} \text{ (formule 15)}$$

$$V_{H/toxe} = 0,508.H_{1/toxe} + 0,245.H_{2/toxe} + 0,155.H_{3/toxe} + 0,092.H_{4/toxe} \text{ (formule 16)}$$

$$V_{H/toxp} = 0,158.H_{1/toxp} + 0,391.H_{2/toxp} + 0,305.H_{3/toxp} + 0,146.H_{4/toxp} \text{ (formule 17)}$$

Pour un impact sanitaire, les cibles « personnel du site », la « population locale sédentaire » et les « personnes présentes dans les ERP » ont à peu près la même vulnérabilité pour un effet toxique (formule 15). Les cibles « personnel du site » sont très fortement affectées, si un impact économique est considéré (formule 16). Quant à l'impact psychologique, le poids des cibles « population locale sédentaire » et « personnes présentes dans les ERP » représentent 70% de la fonction (formule 17)

#### III.2.3.5 la vulnérabilité humaine pour un effet de pollution liquide

La vulnérabilité humaine pour une pollution est retranscrite au travers des fonctions 18, 19 et 20.

$$V_{H/polls} = 0,208.H_{1/polls} + 0,569.H_{2/polls} + 0,131.H_{3/polls} + 0,092.H_{4/polls} \text{ (formule 18)}$$

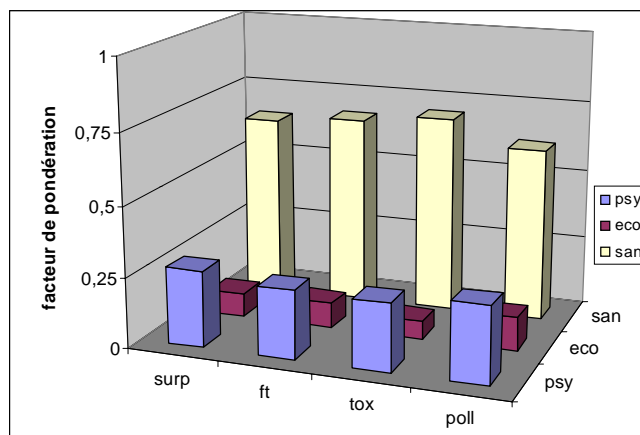
$$V_{H/polle} = 0,374.H_{1/polle} + 0,412.H_{2/polle} + 0,137.H_{3/polle} + 0,077.H_{4/polle} \text{ (formule 19)}$$

$$V_{H/pollp} = 0,189.H_{1/pollp} + 0,584.H_{2/pollp} + 0,151.H_{3/pollp} + 0,076.H_{4/pollp} \text{ (formule 20)}$$

Quel que soit l'impact (formules 18, 19 et 20) la vulnérabilité de la « cible population locale » représente plus de 50% des fonctions en moyenne. D'un point de vue économique, la vulnérabilité de la cible « personnel du site » a aussi une grande importance (40%) par rapport à une pollution liquide.

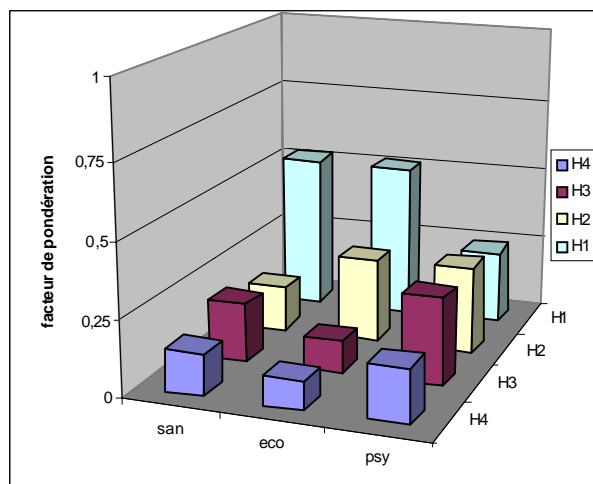
La figure III.24 résume les résultats des équations relatives à la vulnérabilité humaine.

### La vulnérabilité humaine

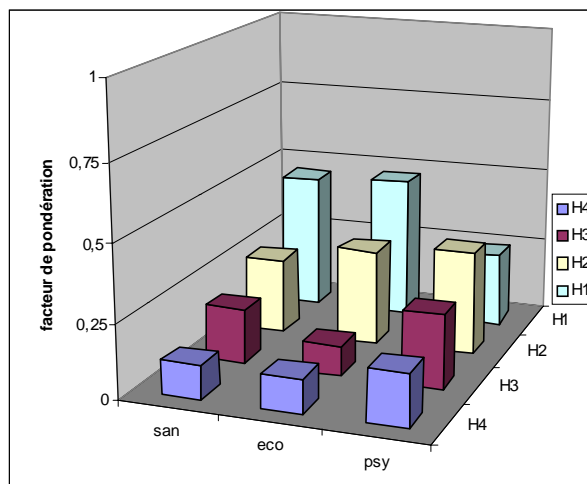


Importance des effets physiques en fonction des impacts pour une cible humaine

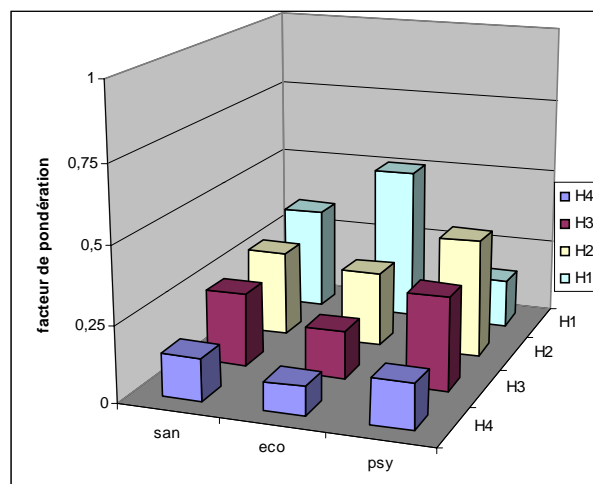
### Hierarchisation des types de cibles humaines pour un effet physique donné en fonction des impacts



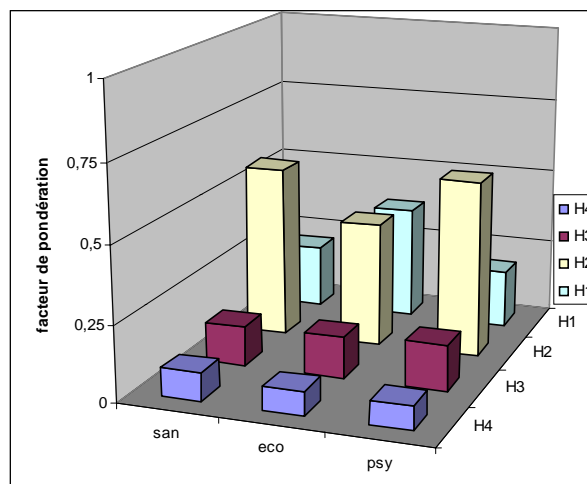
surpression



flux thermique



toxicité



pollution

Figure III.24 : Synthèse des facteurs de vulnérabilité humaine.

Quel que soit l'effet physique considéré, les cibles du type « personnel du site » et « population locale » présentent une vulnérabilité plus importante que les autres cibles humaines (H3 et H4). Du point de vue de l'impact psychologique les cibles « population locale sédentaire » sont toujours les plus affectées. Et en considérant les impacts sanitaire et économique seules les cibles « personnel du site » et « population locale sédentaire » ont toujours une vulnérabilité importante.

### III.2.4 Les fonctions de vulnérabilité environnementale pour chaque effet

La fonction de vulnérabilité environnementale est définie de la manière suivante :

$$V_{E/surp} = 0,550.V_{E/surps} + 0,210.V_{E/surpe} + 0,240.V_{E/surpp} \text{ (formule 21)}$$

$$V_{E/ft} = 0,625.V_{E/fts} + 0,137.V_{E/fte} + 0,238.V_{E/ftp} \text{ (formule 22)}$$

$$V_{E/tox} = 0,732.V_{E/toxs} + 0,138.V_{E/toxe} + 0,130.V_{E/toxp} \text{ (formule 23)}$$

$$V_{E/poll} = 0,634.V_{E/polls} + 0,192.V_{E/polle} + 0,174.V_{E/pollp} \text{ (formule 24)}$$

Quel que soit l'effet physique considéré (formules 21, 22, 23 et 24), l'impact sanitaire est prépondérant pour définir la vulnérabilité environnementale (environ 65%). Les impacts psychologique et économique sont considérés comme étant à peu près équivalents.

#### III.2.4.1 Rappels de la typologie des cibles environnementales

La signification des termes E1, E2, E3 et E4 est rappelée ci-dessous :

- E1 : terres agricoles
- E2 : espaces naturels
- E3 : espaces naturels protégés
- E4 : milieux aquatiques

Les termes E<sub>i</sub> sont utilisés dans les paragraphes suivants pour décrire les fonctions de vulnérabilité environnementale pour chaque effet physique.

#### III.2.4.2 la vulnérabilité environnementale pour un effet de surpression

La vulnérabilité environnementale face à une surpression est décrite au travers des formules :

$$V_{E/surps} = 0,144.E_{1/surps} + 0,171.E_{2/surps} + 0,459.E_{3/surps} + 0,226.E_{4/surps} \text{ (formule 25)}$$

$$V_{E/surpe} = 0,317.E_{1/surpe} + 0,172.E_{2/surpe} + 0,389.E_{3/surpe} + 0,122.E_{4/surpe} \text{ (formule 26)}$$

$$V_{E/surpp} = 0,220.E_{1/surpp} + 0,162.E_{2/surpp} + 0,475.E_{3/surpp} + 0,143.E_{4/surpp} \text{ (formule 27)}$$

Pour les impacts sanitaire, économique et psychologique, les cibles de type E3 (espace naturel protégé) possèdent la plus grande vulnérabilité face à un effet de surpression (formules 25, 26,

27). En effet, le facteur de vulnérabilité associé est de l'ordre de 40%. Seule la cible E1 (terre agricole) présente une vulnérabilité importante de 30% environ pour un impact économique.

#### III.2.4.3 la vulnérabilité environnementale pour un effet de flux thermique

La vulnérabilité environnementale subissant un flux thermique est traduite par les formules suivantes :

$$V_{E/fts} = 0,174.E_{1/fts} + 0,270.E_{2/fts} + 0,477.E_{3/fts} + 0,079.E_{4/fts} \text{ (formule 28)}$$

$$V_{E/fte} = 0,332.E_{1/fte} + 0,182.E_{2/fte} + 0,398.E_{3/fte} + 0,088.E_{4/fte} \text{ (formule 29)}$$

$$V_{E/ftp} = 0,180.E_{1/ftp} + 0,219.E_{2/ftp} + 0,488.E_{3/ftp} + 0,113.E_{4/ftp} \text{ (formule 30)}$$

Les mêmes remarques que pour un effet de surpression (cf III.2.4.1) peuvent être faites pour une cible environnementale subissant un flux thermique (formules 28, 29 et 30).

#### III.2.4.4 la vulnérabilité environnementale pour un effet de toxicité

La vulnérabilité environnementale pour un effet de toxicité est représentée au travers des fonctions 31, 32 et 33.

$$V_{E/toxs} = 0,234.E_{1/toxs} + 0,153.E_{2/toxs} + 0,372.E_{3/toxs} + 0,241.E_{4/toxs} \text{ (formule 31)}$$

$$V_{E/toxe} = 0,419.E_{1/toxe} + 0,128.E_{2/toxe} + 0,295.E_{3/toxe} + 0,158.E_{4/toxe} \text{ (formule 32)}$$

$$V_{E/toxp} = 0,285.E_{1/toxp} + 0,157.E_{2/toxp} + 0,360.E_{3/toxp} + 0,198.E_{4/toxp} \text{ (formule 33)}$$

Des remarques similaires à celles faites pour une surpression (cf III.2.4.1) peuvent être faites pour une cible environnementale subissant un effet de toxicité (formule 31, 32 et 33).

#### III.2.4.5 la vulnérabilité environnementale pour un effet de pollution liquide

La vulnérabilité environnementale pour une pollution liquide est traduite de la manière suivante :

$$V_{E/polls} = 0,159.E_{1/polls} + 0,104.E_{2/polls} + 0,226.E_{3/polls} + 0,511.E_{4/polls} \text{ (formule 34)}$$

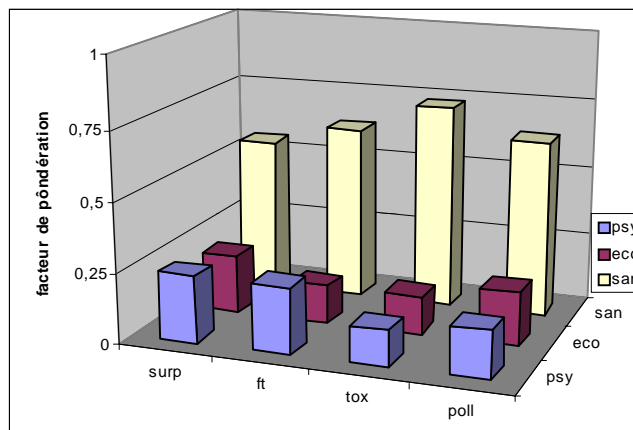
$$V_{E/polle} = 0,267.E_{1/polle} + 0,103.E_{2/polle} + 0,273.E_{3/polle} + 0,357.E_{4/polle} \text{ (formule 35)}$$

$$V_{E/pollp} = 0,210.E_{1/pollp} + 0,123.E_{2/pollp} + 0,298.E_{3/pollp} + 0,369.E_{4/pollp} \text{ (formule 36)}$$

Quel que soit l'impact considéré, les cibles milieux aquatiques présentent une vulnérabilité importante (plus de 40% en moyenne) ainsi que les cibles « espaces naturels protégés » qui représentent environ 25% du poids des fonctions de vulnérabilité environnementale face à une pollution liquide. Comme pour les effets précédents (surpression, flux thermique et toxicité), les « terres agricoles » possèdent une vulnérabilité importante (27%) pour un impact économique.

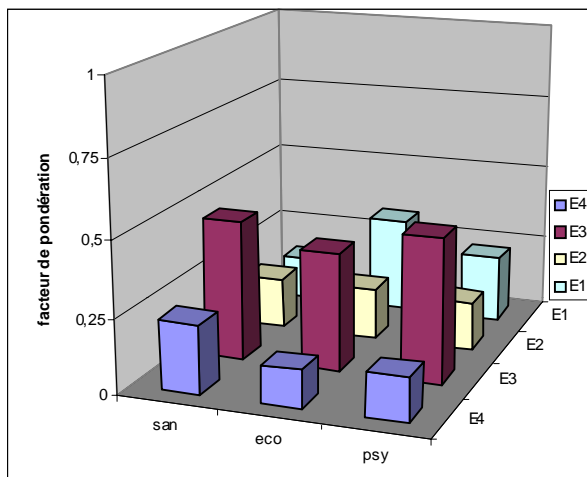
La figure III.25 résume les résultats des équations relatives à la vulnérabilité environnementale.

### La vulnérabilité environnementale

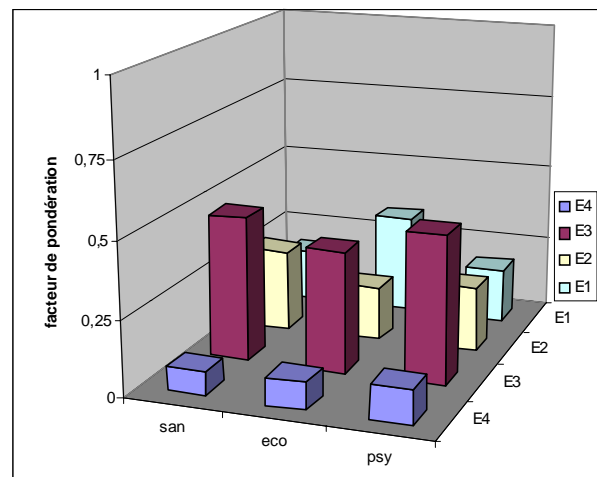


Importance des effets physiques en fonction des impacts pour une cible environnementale

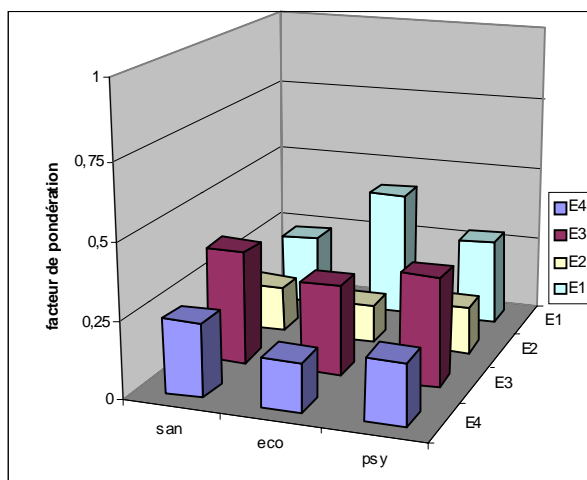
### Hierarchisation des cibles environnementales pour un effet physique donné en fonction des impacts



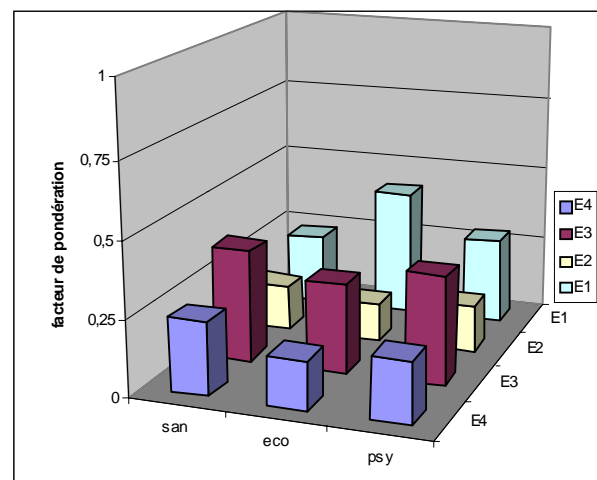
surpression



flux thermique



toxicité



pollution

Figure III.25 : Synthèse des facteurs de vulnérabilité environnementale.

Dans la plupart des cas, pour l'ensemble des effets physiques, l'impact sanitaire a un poids prépondérant par rapport aux autres. Pour les cibles environnementales, un poids important est attribué aux cibles de type « espaces naturels protégés » ainsi qu'aux cibles « terres agricoles ».

### III.2.5 Les fonctions de vulnérabilité matérielle pour chaque effet

La vulnérabilité matérielle en fonction des effets physiques est explicitée au travers des formules 37, 38, 39 et 40.

$$V_{M/surp} = 0,687.V_{M/surps} + 0,187.V_{M/surpe} + 0,126.V_{M/surpp} \text{ (formule 37)}$$

$$V_{M/ft} = 0,600.V_{M/fts} + 0,200.V_{M/fte} + 0,200.V_{M/ftp} \text{ (formule 38)}$$

$$V_{M/tox} = 0,260.V_{M/toxs} + 0,327.V_{M/toxe} + 0,413.V_{M/toxp} \text{ (formule 39)}$$

$$V_{M/poll} = 0,200.V_{M/polls} + 0,400.V_{M/polle} + 0,400.V_{M/pollp} \text{ (formule 40)}$$

Pour un impact sanitaire, une cible matérielle est vulnérable face à une surpression et un flux thermique alors que pour les impacts économique et psychologique, celle-ci sera plus vulnérable pour un effet de toxicité et de pollution liquide (formules 37, 38, 39 et 40).

#### III.2.5.1 Rappels de la typologie des cibles matérielles

La signification des termes M1, M2, M3 et M4 est rappelée ci-dessous :

- M1 : site industriel
- M2 : utilités publiques et infrastructures
- M3 : structures bâtementaires privées
- M4 : structures bâtementaires publiques

Les termes  $M_i$  sont utilisés dans les paragraphes suivants pour décrire les fonctions de vulnérabilité matérielle pour chaque effet physique.

#### III.2.5.2 la vulnérabilité matérielle pour un effet de surpression

La vulnérabilité matérielle pour une surpression est exprimée par les formules 44, 45 et 46.

$$V_{M/surps} = 0,299.M_{1/surps} + 0,253.M_{2/surps} + 0,239.M_{3/surps} + 0,209.M_{4/surps} \text{ (formule 41)}$$

$$V_{M/surpe} = 0,347.M_{1/surpe} + 0,204.M_{2/surpe} + 0,204.M_{3/surpe} + 0,245.M_{4/surpe} \text{ (formule 42)}$$

$$V_{M/surpp} = 0,169.M_{1/surpp} + 0,205.M_{2/surpp} + 0,338.M_{3/surpp} + 0,288.M_{4/surpp} \text{ (formule 43)}$$

Quels que soient les impacts, pour un effet de surpression, les vulnérabilités des différentes cibles matérielles avoisinent 25% (formules 41, 42 et 43).

### III.2.5.3 la vulnérabilité matérielle pour un effet de flux thermique

La vulnérabilité matérielle pour un flux thermique est représentée par les formules 44, 45 et 46.

$$V_{M/fts} = 0,293.M_{1/fts} + 0,293.M_{2/fts} + 0,207.M_{3/fts} + 0,207.M_{4/fts} \text{ (formule 44)}$$

$$V_{M/fte} = 0,548.M_{1/fte} + 0,147.M_{2/fte} + 0,147.M_{3/fte} + 0,158.M_{4/fte} \text{ (formule 45)}$$

$$V_{M/ftp} = 0,250.M_{1/ftp} + 0,250.M_{2/ftp} + 0,250.M_{3/ftp} + 0,250.M_{4/ftp} \text{ (formule 46)}$$

Une remarque équivalente à celle faite pour les effets de surpression peut être retenue pour un flux thermique. Seul le facteur de vulnérabilité associé à la cible « site industriel » a une importance majeure pour un impact économique (formule 44, 45 et 46).

### III.2.5.4 la vulnérabilité matérielle pour un effet de toxicité

La vulnérabilité matérielle pour un effet de toxicité est exprimée par les fonctions suivantes.

$$V_{M/toxs} = 0,176.M_{1/toxs} + 0,246.M_{2/toxs} + 0,289.M_{3/toxs} + 0,289.M_{4/toxs} \text{ (formule 47)}$$

$$V_{M/toxe} = 0,289.M_{1/toxe} + 0,246.M_{2/toxe} + 0,176.M_{3/toxe} + 0,289.M_{4/toxe} \text{ (formule 48)}$$

$$V_{M/toxp} = 0,110.M_{1/toxp} + 0,230.M_{2/toxp} + 0,358.M_{3/toxp} + 0,302.M_{4/toxp} \text{ (formule 49)}$$

La vulnérabilité des cibles structures bâtementaires publiques et privées est légèrement plus importante que celles des cibles « site industriel » et « utilités publiques et infrastructures ».

### III.2.5.5 la vulnérabilité matérielle pour un effet de pollution liquide

La vulnérabilité matérielle face une pollution est retranscrite par les fonctions suivantes :

$$V_{M/polls} = 0,142.M_{1/polls} + 0,286.M_{2/polls} + 0,286.M_{3/polls} + 0,286.M_{4/polls} \text{ (formule 50)}$$

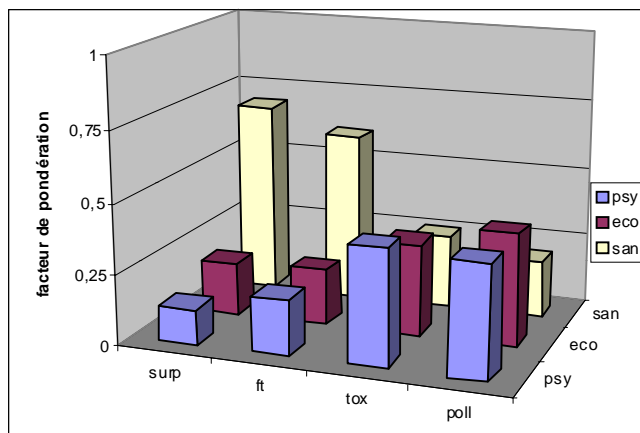
$$V_{M/polle} = 0,281.M_{1/polle} + 0,340.M_{2/polle} + 0,140.M_{3/polle} + 0,239.M_{4/polle} \text{ (formule 51)}$$

$$V_{M/pollp} = 0,098.M_{1/pollp} + 0,251.M_{2/pollp} + 0,356.M_{3/pollp} + 0,295.M_{4/pollp} \text{ (formule 52)}$$

Des point de vue intégrité et psychologique, le site industriel présente une très faible vulnérabilité en ce qui concerne une pollution liquide. Pour les autres cibles, les facteurs de pondération sont équivalents sauf pour les cibles « structure bâtementaire privée » qui ont un poids assez faible du point de vue économique (formules 50, 51 et 52).

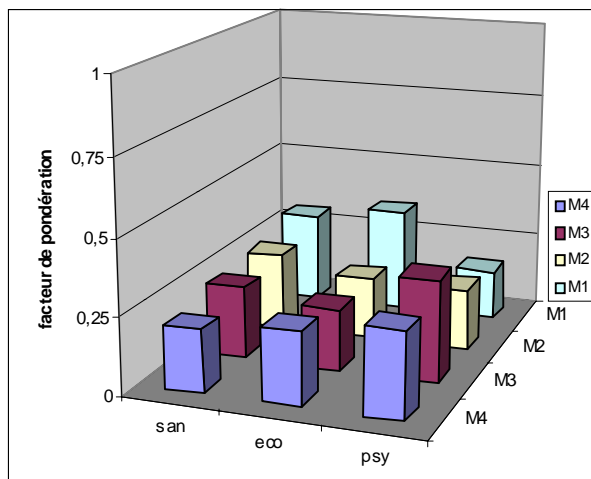
La figure III.26 résume les résultats des équations relatives à la vulnérabilité matérielle.

### La vulnérabilité matérielle

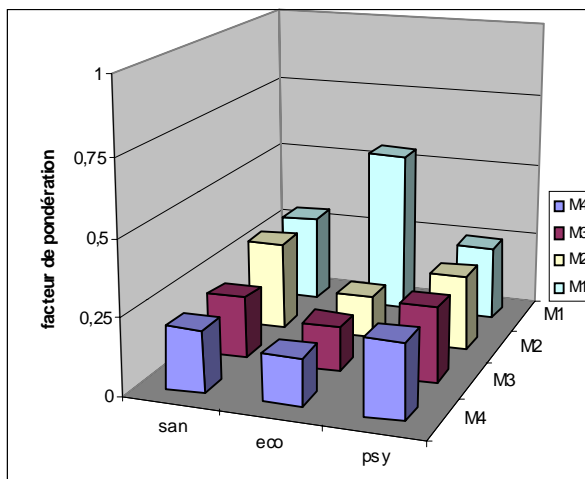


Importance des effets physiques en fonction des impacts pour une cible matérielle

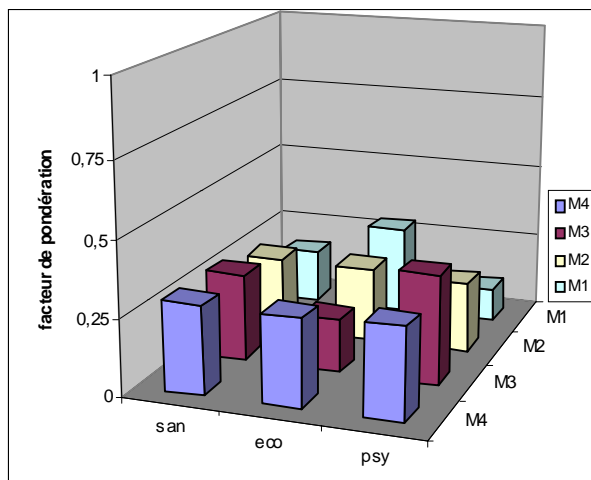
### Hierarchisation des types de cibles matérielles pour un effet physique donné en fonction des impacts



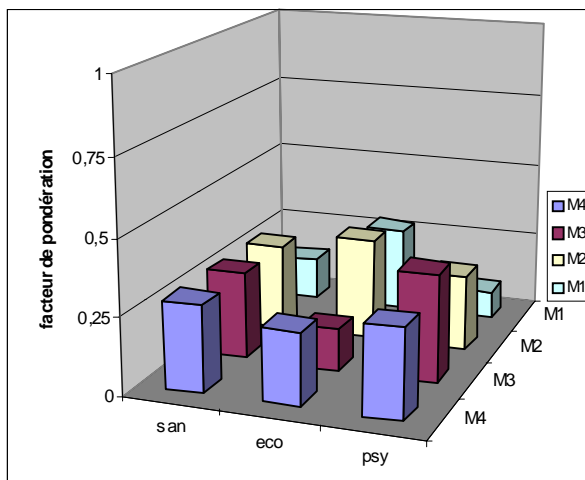
surpression



flux thermique



toxicité



pollution

Figure III.26 : Synthèse des facteurs de vulnérabilité matérielle.

Pour la majorité des cibles matérielles, les poids sont équivalents sauf en ce qui concerne la cible « site industriel » à laquelle une vulnérabilité plus importante a été attribuée (excepté pour la pollution). Pour les effets de surpression et de flux thermique, qui peuvent être considérés comme destructeurs, le site industriel du point de vue économique présente des poids importants. Au contraire, pour un impact psychologique, le site industriel a un poids très faible.

Les facteurs de vulnérabilité étant évalués, l'ensemble de la méthode peut être déroulé en vue d'obtenir le niveau de risque de l'installation. En effet, ce dernier est obtenu en couplant le potentiel danger qui a été évalué précédemment avec l'évaluation spatiale de la vulnérabilité.

Dans un premier temps, le prototype ne prendra pas en compte :

- les cibles matérielles, mais elles ne représentent que 6 % de la vulnérabilité globale
- les cibles environnementales de type « espaces naturels protégés » et les cibles humaines de type « personnes présentes dans les ERP » ne sont pas prises en compte pour le développement du prototype. En effet, ces informations ne sont pas directement disponibles dans les bases de données commerciales.

Les poids de vulnérabilité affectés à ces cibles non retenues pour le développement du prototype ne doivent donc pas être prises en compte. Pour cela, les facteurs de vulnérabilité ont été recalculés en conservant les appréciations relatives aux types de cibles disponibles.

### **III.2.6 Les cartes de vulnérabilité spatiale de la zone d'étude**

Trois types de cartes sont obtenus grâce à l'outil cartographique :

- les cartes correspondant à la vulnérabilité d'un type de cibles face à un effet physique donné,
- les cartes de vulnérabilité par classe de cibles,
- la carte de la vulnérabilité globale de la zone d'étude.

#### III.2.6.1 Les cartes de vulnérabilités humaines

Les cartes de vulnérabilité des cibles humaines face à un effet physique donné sont présentées ci-dessous. Elles sont au nombre de quatre :

- la carte de vulnérabilité des cibles humaines face à une surpression (figure III.27)
- la carte de vulnérabilité des cibles humaines face à un flux thermique (figure III.28)
- la carte de vulnérabilité des cibles humaines face à une toxicité (figure III.29)
- la carte de vulnérabilité des cibles humaines face à une pollution. (figure III.30)

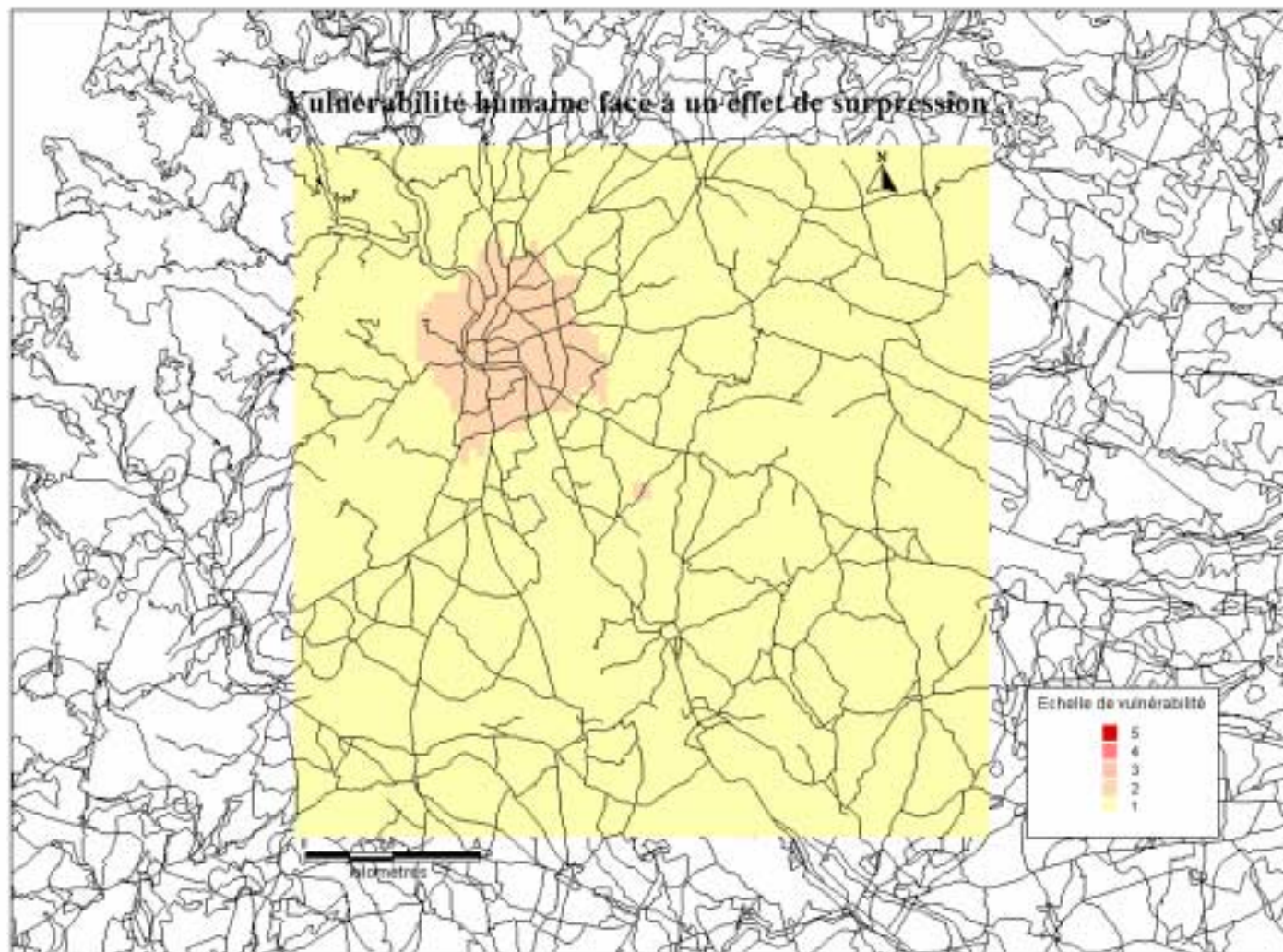


Figure III.27 : Carte de la vulnérabilité humaine face à un effet de surpression

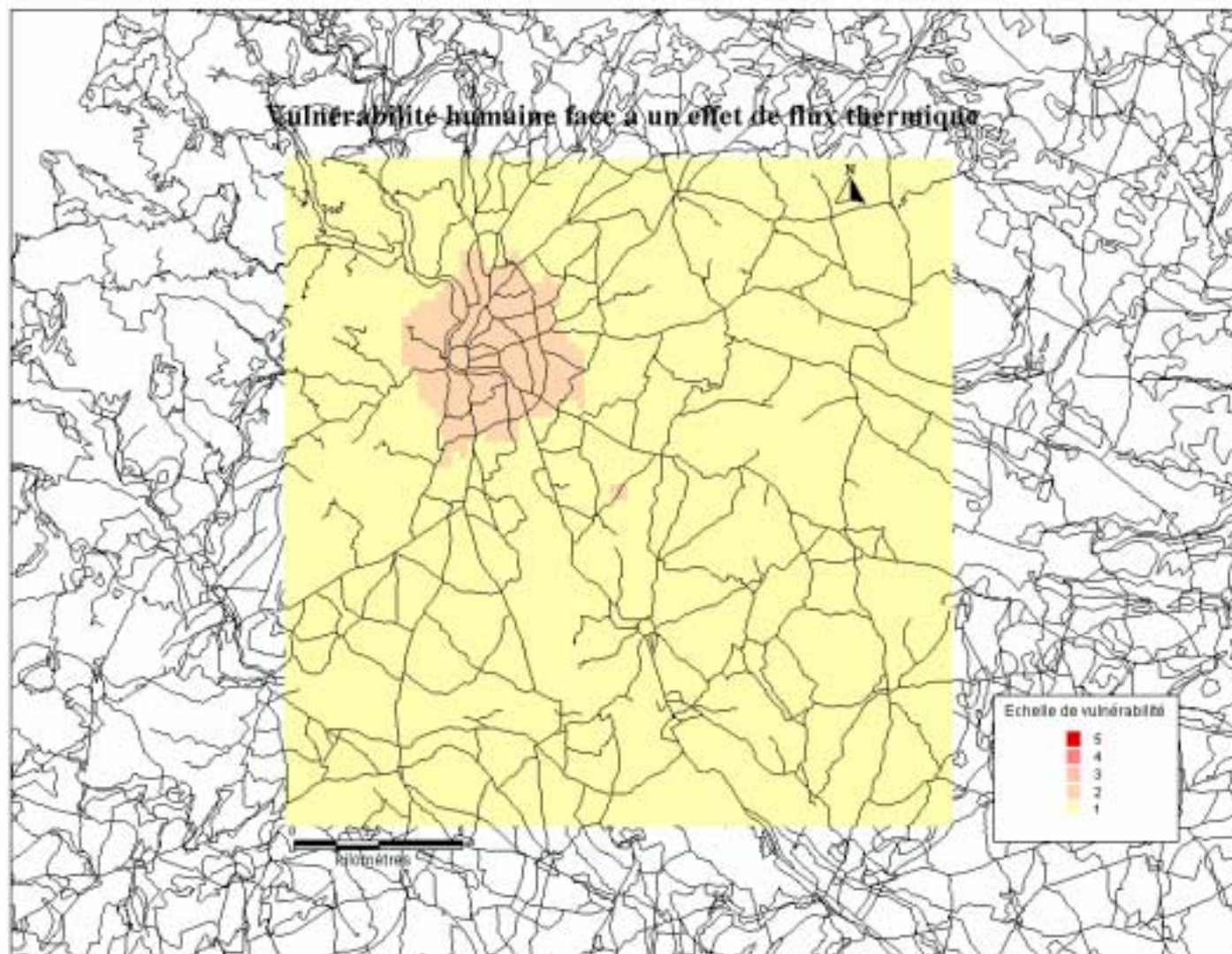


Figure III.28 : Carte de la vulnérabilité humaine face à un effet de flux thermique

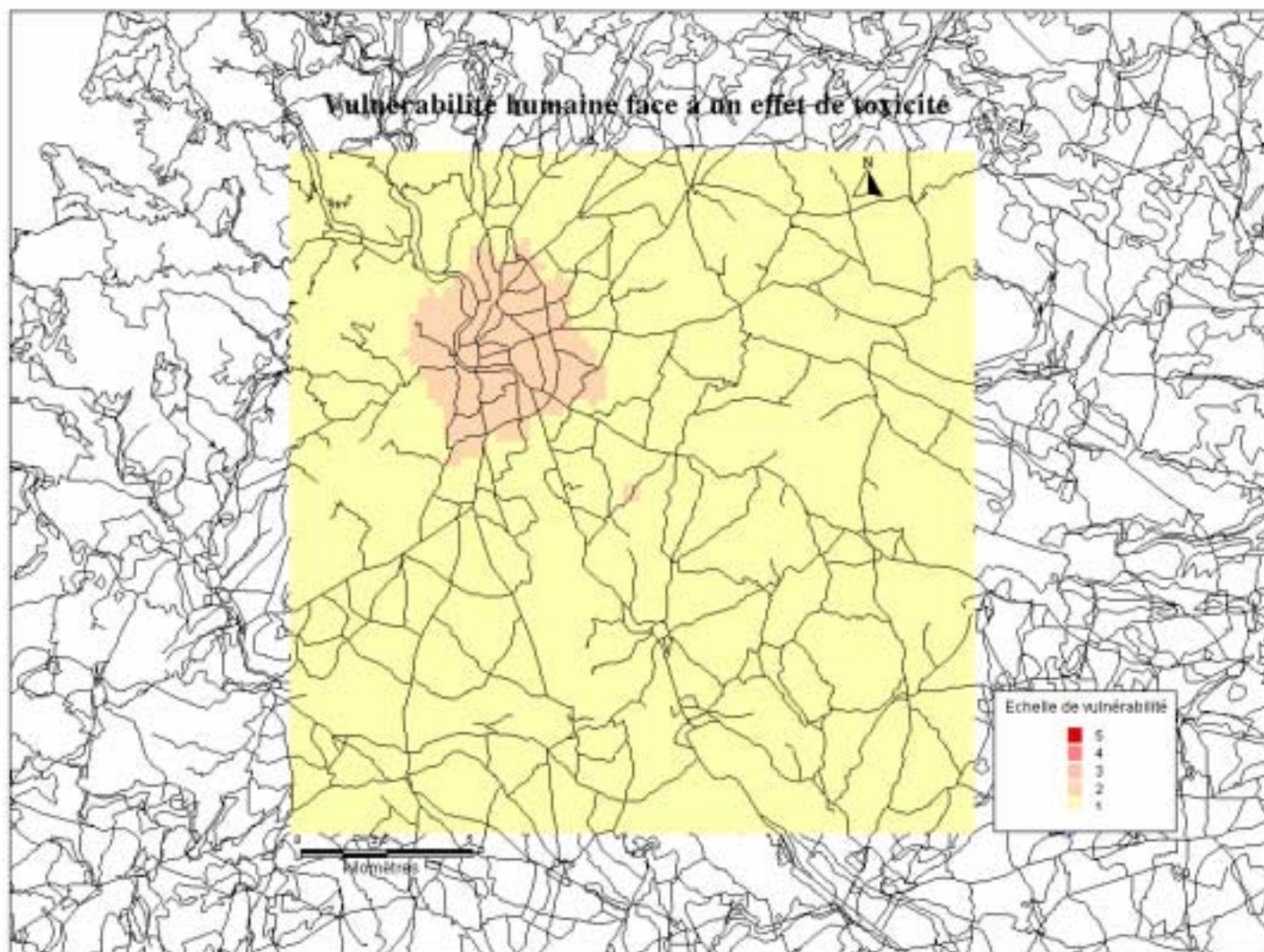


Figure III.29 : Carte de la vulnérabilité humaine face à un effet de toxicité

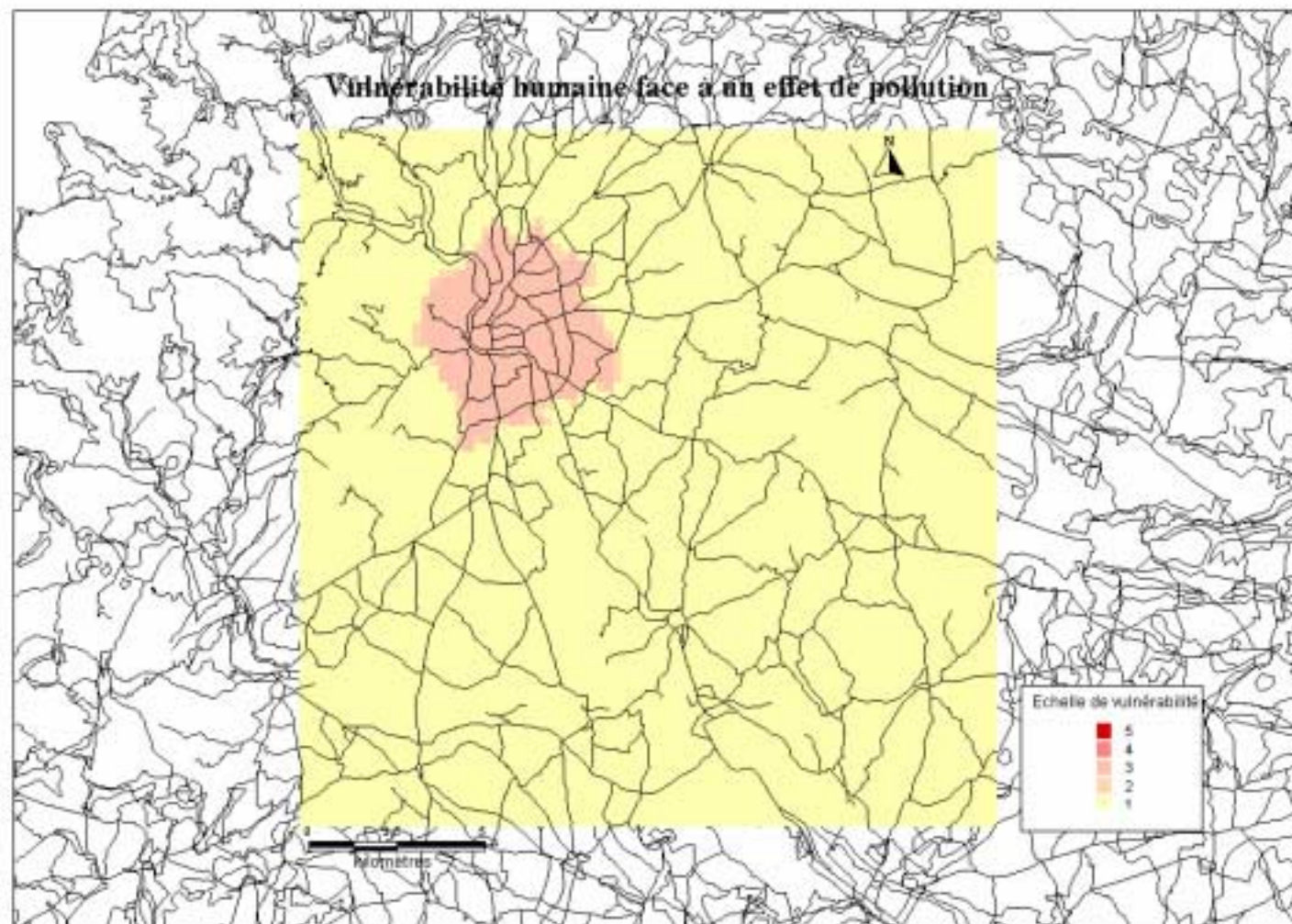


Figure III.30 : Carte de la vulnérabilité humaine face à un effet de pollution

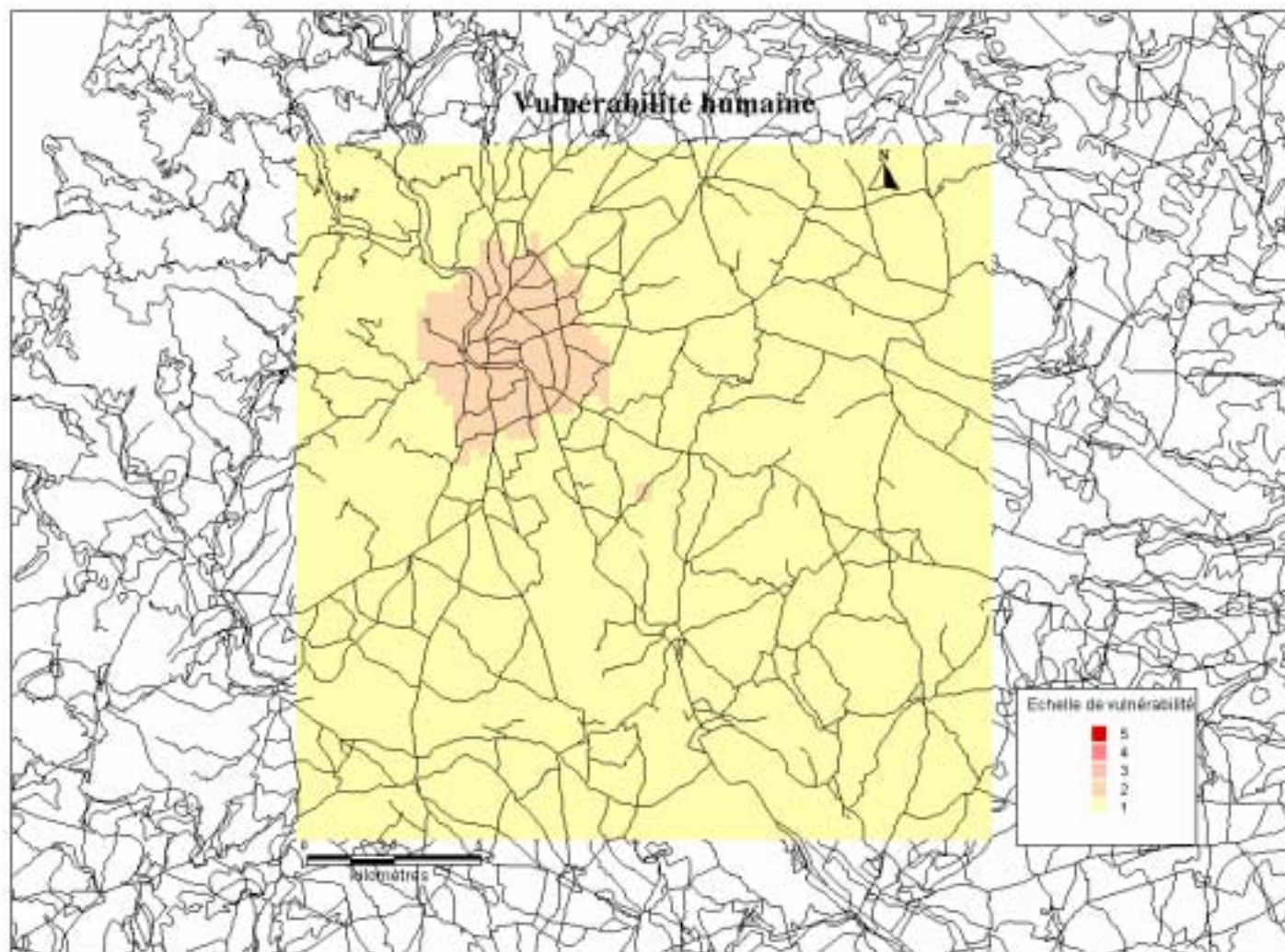


Figure III.31 : Carte de la vulnérabilité humaine

Les cartes de vulnérabilité humaine face à un effet physique sont très proches pour trois d'entre elles (surpression, flux thermique et toxicité) (figure III.27, figure III.28 et figure III.29). Deux zones de vulnérabilité existent :

- une première où l'indice de vulnérabilité est très faible (en jaune sur les cartes), il a pour valeur 1. Cela s'explique par le fait que le nombre de cibles en présence est relativement peu élevé comme cela a été vu par rapport à la carte de densité de population. L'apport en terme de dénombrement des réseaux routiers ne permet pas d'obtenir une augmentation significative du nombre de cibles humaines pour cette zone.
- une deuxième où la vulnérabilité humaine est soit de niveau 2 (orange pâle sur les cartes). Cette zone de vulnérabilité 3 est composée de deux zones géographiques, la première correspond à la commune d'Alès et la seconde est celle du site industriel lui-même.

Pour la carte de vulnérabilité humaine face à une pollution (figure III.30), les zones de vulnérabilité existent mais par contre celle correspondant à une vulnérabilité moyenne (indice de vulnérabilité 2 en orange pâle sur la carte) est uniquement composée de la commune d'Alès (population locale sédentaire). En effet la zone de vulnérabilité du site industriel est passée à un niveau de vulnérabilité très faible (valeur de 1), cela est dû au fait que les facteurs de vulnérabilité des cibles humaines « personnel du site » sont moins importants dans le cas d'une pollution.

L'agrégation de ce jeu de cartes permet d'aboutir à la représentation spatiale de la vulnérabilité humaine (figure III.31). Cette agrégation se réalise au moyen de la formule 2 qui évalue la vulnérabilité humaine en fonction de chaque vulnérabilité humaine par rapport à un effet physique. Deux zones de vulnérabilité sont identifiées, une première avec une valeur de vulnérabilité très faible (jaune clair) et une seconde avec une zone de vulnérabilité faible (zone géographique de la commune d'Alès et celle du site industriel).

#### III.2.6.2 Les cartes de vulnérabilité environnementale

De la même manière, des cartes de vulnérabilité de cibles environnementales pour chaque effet physique sont réalisées. Elles sont également au nombre de quatre

- la carte de vulnérabilité des cibles environnementales face à une surpression
- la carte de vulnérabilité des cibles environnementales face à un flux thermique
- la carte de vulnérabilité des cibles environnementales face à une toxicité
- la carte de vulnérabilité des cibles environnementales face à une pollution.

La carte de vulnérabilité environnementale est déduite des précédentes. Ces cartes sont présentées ci-après.

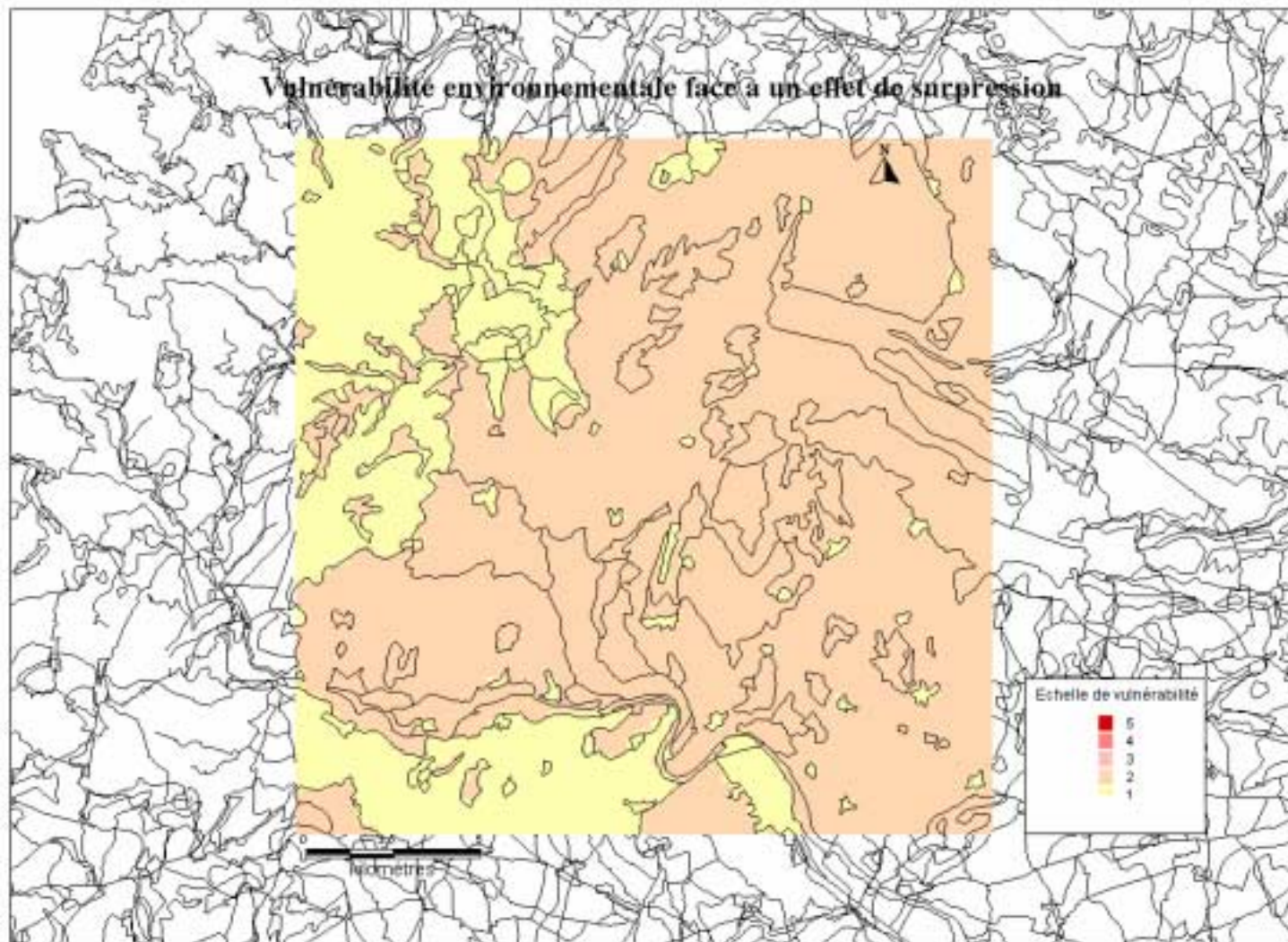


Figure III.32 : Carte de la vulnérabilité environnementale face à un effet de surpression

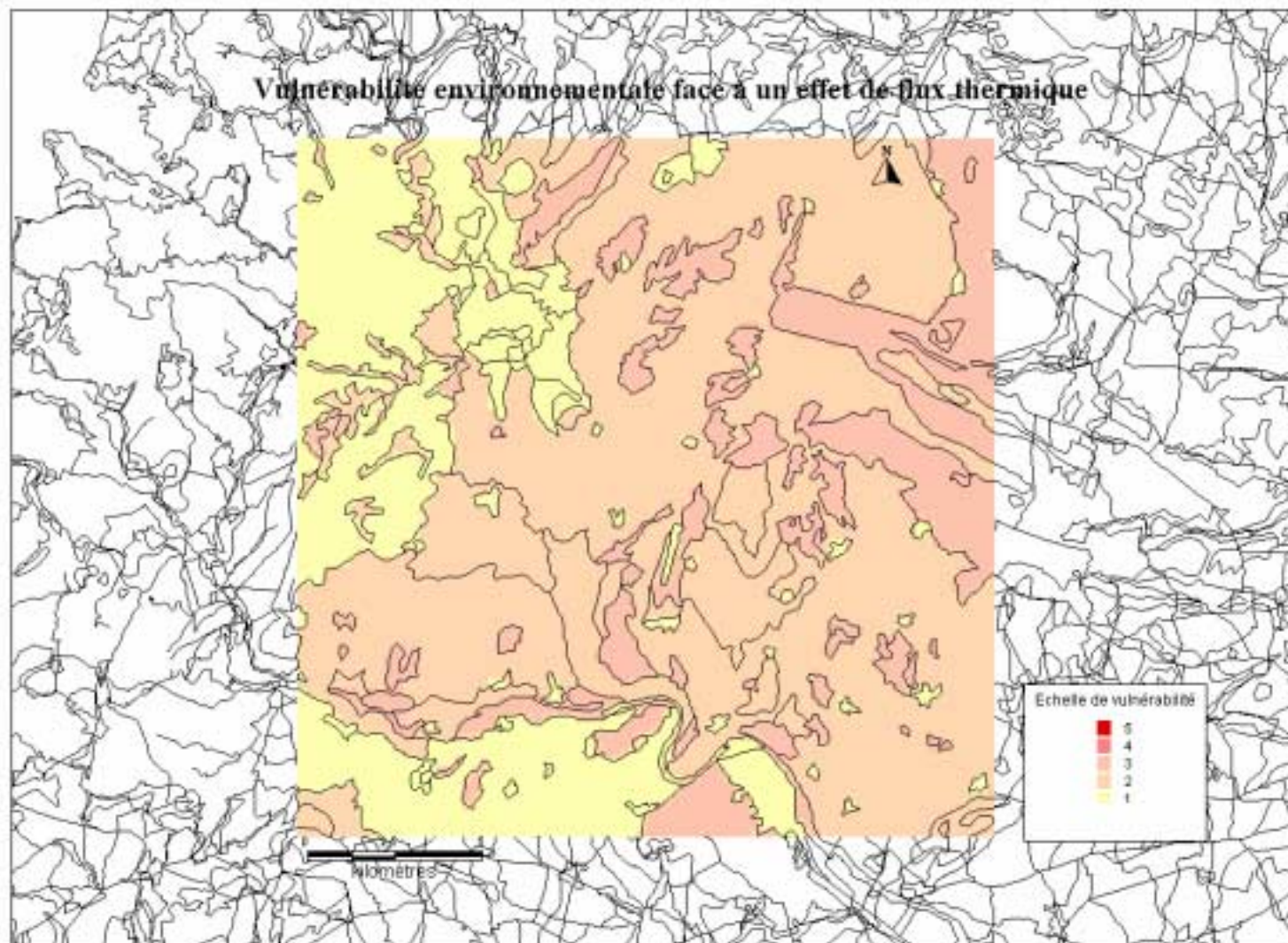


Figure III.33 : Carte de la vulnérabilité environnementale face à un effet de flux thermique

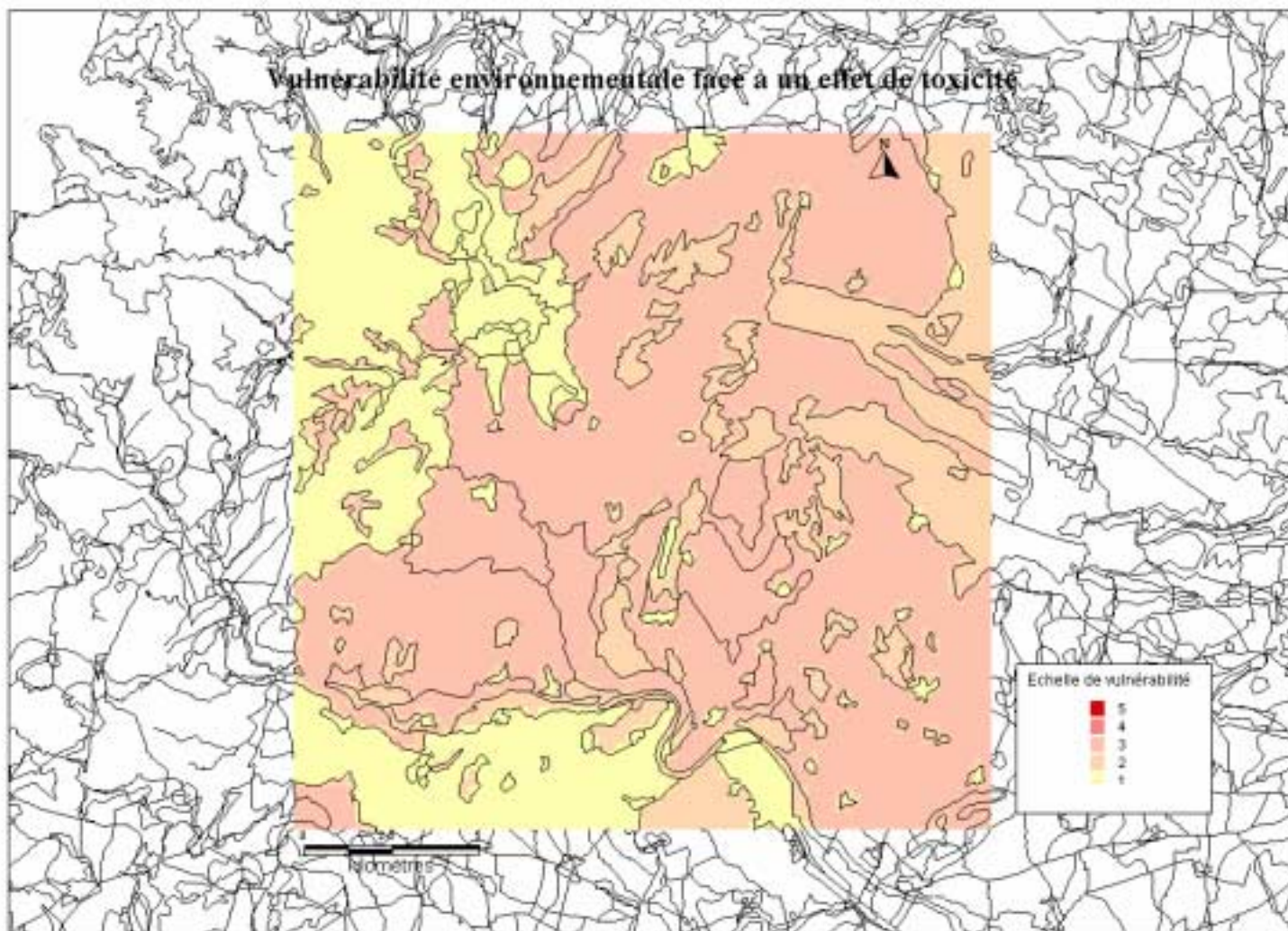


Figure III.34 : Carte de la vulnérabilité environnementale face à un effet de toxicité

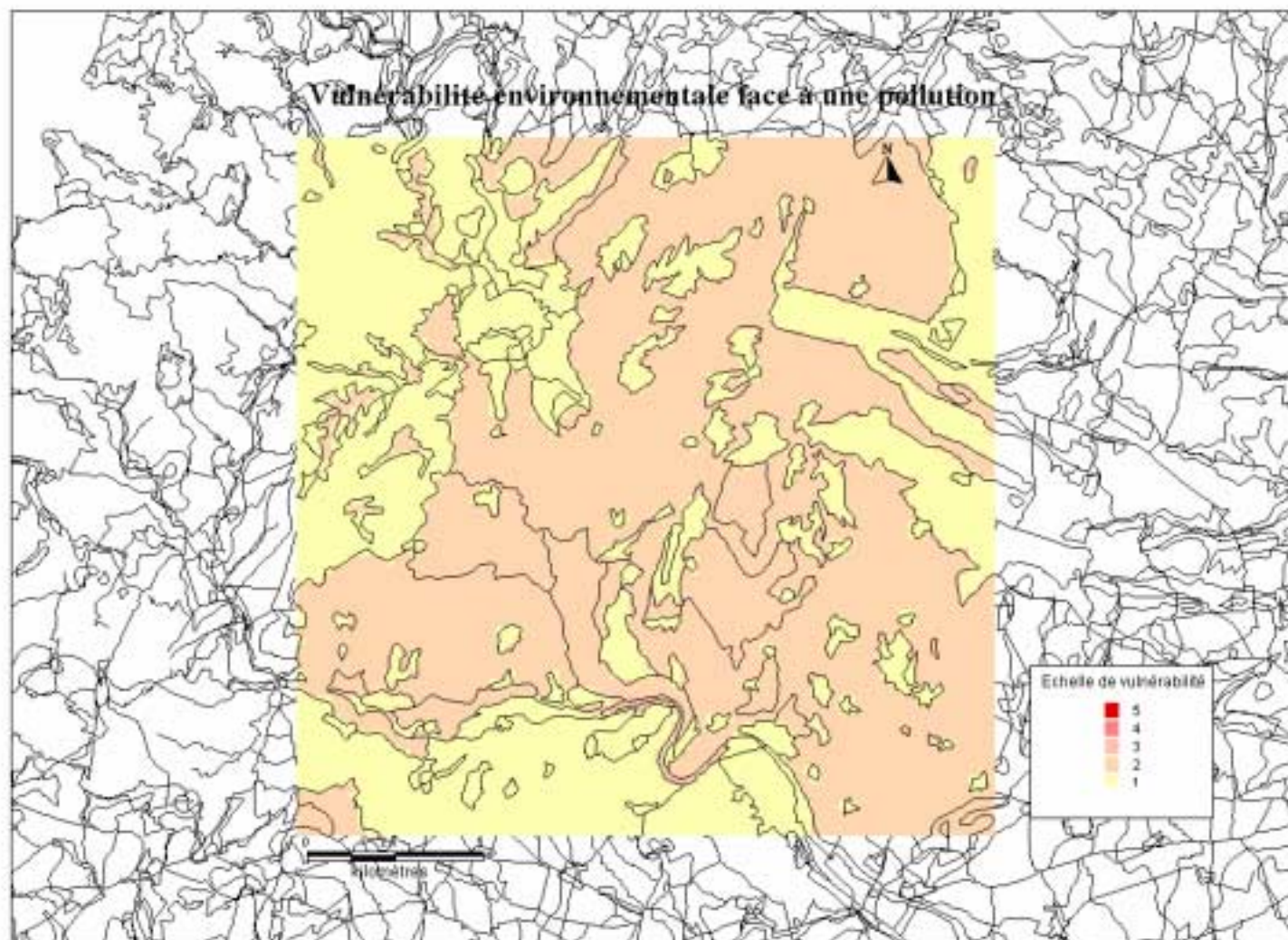


Figure III.35 : Carte de la vulnérabilité environnementale face à un effet de pollution

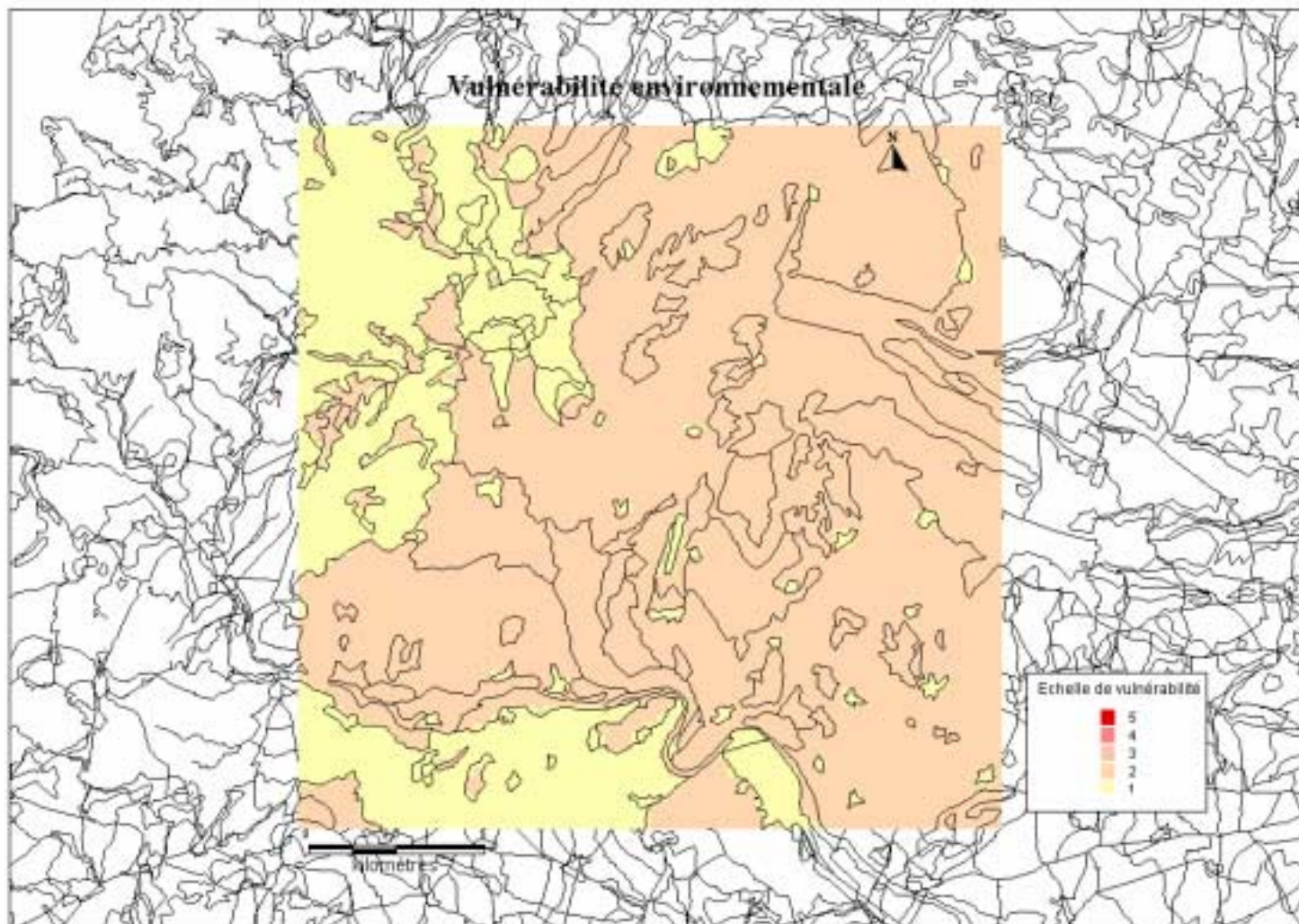


Figure III.36 : Carte de la vulnérabilité environnementale

Contrairement aux cartes de vulnérabilité humaine par rapport aux types d'effet, les cartes de vulnérabilité environnementale présentent des différences notables en fonction des effets physiques mis en jeu.

Pour mieux appréhender ces cartes, il faut se reporter aux résultats de la carte présentée sur la figure III.12 concernant la couverture environnementale. De ce support, il est possible de faire les commentaires suivants :

La vulnérabilité environnementale pour un effet de surpression (Figure III.32) présente un indice faible entre 1 et 2 que cela soit pour les terres agricoles ou pour les espaces naturels. En ce qui concerne celle pour un effet de flux thermique (figure III.33), une troisième zone de vulnérabilité émerge avec une vulnérabilité moyenne (indice de niveau 3). Cette augmentation du niveau de vulnérabilité correspond au type de cible « espaces naturels ». Pour les effets de toxicité et de pollution (figure III.33 et figure III.34), les terres agricoles présentent respectivement un niveau de vulnérabilité moyen et faible.

De manière générale, la vulnérabilité environnementale (figure III.36), qui est déduite des valeurs de vulnérabilités par effet physique, est faible pour la zone d'étude (indice de vulnérabilité 2 pour la majeure partie de la zone). La zone d'étude est en grande partie moyennement vulnérable (environ 70%) et le reste est faiblement vulnérable pour la vulnérabilité environnementale.

La vulnérabilité environnementale comparée à la vulnérabilité humaine, a une surface présentant une vulnérabilité plus importante mais celle-ci n'aura pas une influence très grande pour la vulnérabilité globale puisque qu'elle représente un poids de 20% pour cette dernière (formule n°1).

#### III.2.6.3 La carte de vulnérabilité globale

La carte de vulnérabilité globale est composée de deux zones. La zone majoritaire présente une vulnérabilité très faible. La seconde zone, composée de la commune d'Alès et du site industriel présentant un niveau de vulnérabilité faible.

La carte de vulnérabilité globale (figure III.37) est très proche de celle de la vulnérabilité humaine. En effet, le poids affecté aux cibles humaines est largement prédominant par rapport aux autres cibles (formule n°1).

La zone d'étude présente une vulnérabilité moyenne à faible ce qui peut être considéré comme normale à la vue du faible nombre de cibles en présence.

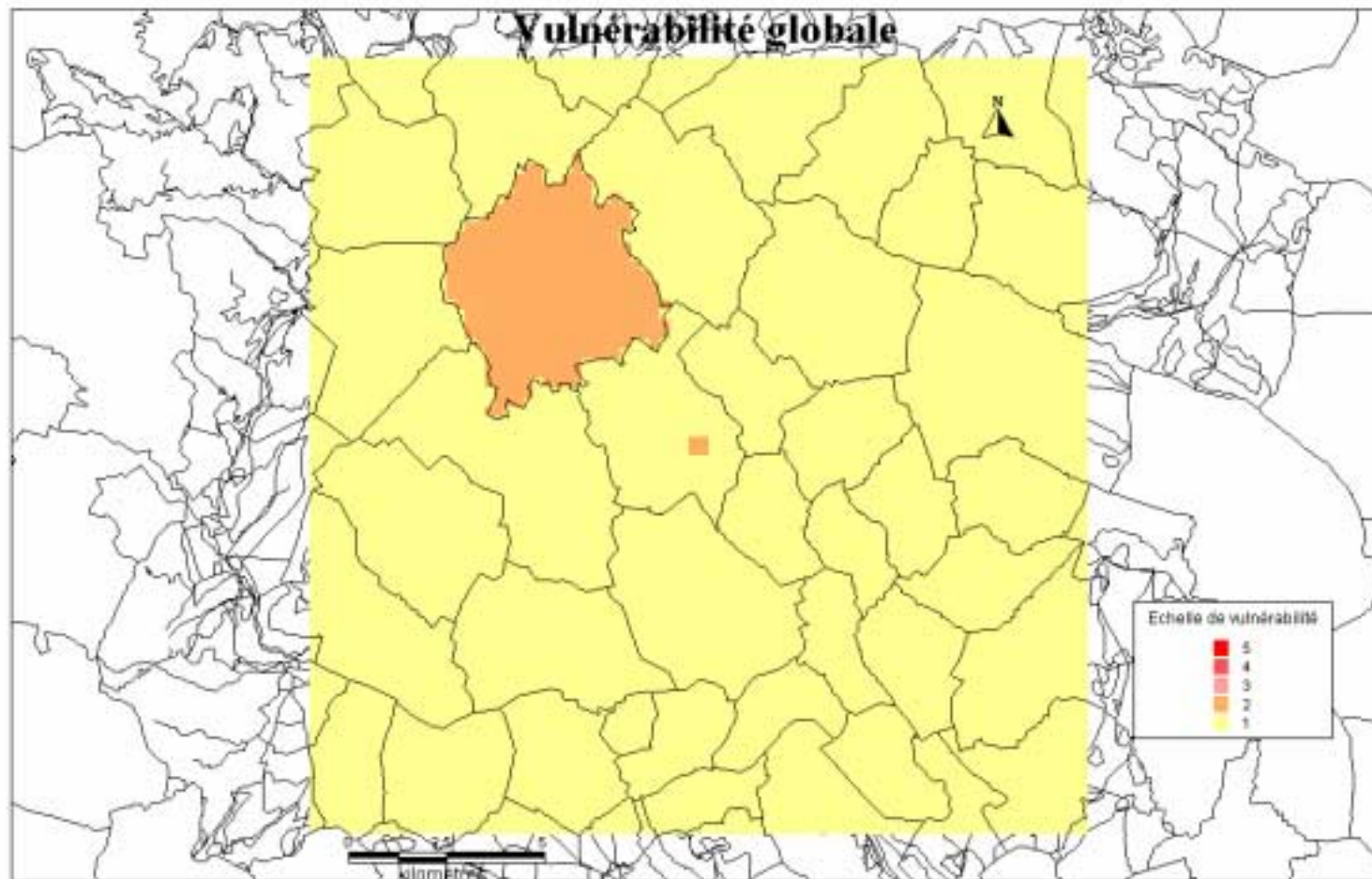


Figure III.37 : carte de vulnérabilité globale

### III.2.7 Les cartes de potentiel danger

A partir du potentiel danger et de la vulnérabilité, il suffit d'agréger de manière spatiale ces deux dernières variables pour aboutir aux différents niveaux de risques de l'installation.

Mais tout d'abord, il est intéressant de représenter le potentiel danger de manière spatiale pour chaque scénario d'accident majeur.

Pour le scénario n°1 (ruine totale d'un stockage d'ammoniac, figure III.38), le potentiel danger a une valeur moyenne (indice 3) pour l'ensemble de la zone des effets létaux et pour les secteurs retenus pour la zone des effets irréversibles. En ce qui concerne la zone des effets réversibles, celui-ci est d'un niveau faible à très faible (indice 2 et 1) sur l'échelle de potentiel danger.

Pour le scénario 2 (rupture d'un piquage d'un réservoir d'ammoniac, figure III.39), le potentiel danger est faible pour la zone des effets létaux et des effets irréversibles. Un niveau de potentiel danger faible et très faible est observé pour la zone des effets irréversibles.

Enfin pour le scénario 3 (UVCE propane, figure III.40), les zones d'effets létaux et irréversibles présentent un potentiel de danger faible et la zone des effets réversibles un potentiel de danger très faible.

De manière globale, les intensités de potentiel de danger sont moyennes ou faibles puisque la gravité des accidents majeurs étudiés est moyenne ou faible (échelle de risque à 6 niveaux). En comparant le scénario 1 et 2, les intensités de potentiel de danger sont plus importantes pour le premier. Ceci est dû aux caractéristiques de l'accident. En effet, dans le premier cas c'est une ruine totale d'un réservoir d'ammoniac et dans le second une rupture d'un piquage d'un réservoir d'ammoniac (quantités impliquées différentes, ...).

Sur ces cartes, les potentiels danger sont isotropes sur l'ensemble des zones d'effets.

Pour compléter l'approche, il est nécessaire de prendre en compte les cibles susceptibles d'être affectées pour évaluer le niveau de risque et pour démontrer l'intérêt de prendre en compte la notion de vulnérabilité pour la construction d'un indice de risque.

Donc à partir des cartes de potentiel de danger et des cartes de vulnérabilité, le niveau de risque de chaque scénario d'accident et également une carte de niveau de risque global de l'installation qui dépend à la fois des caractéristiques du site, de l'accident et de l'environnement soumis à ce dernier peut être évalué.

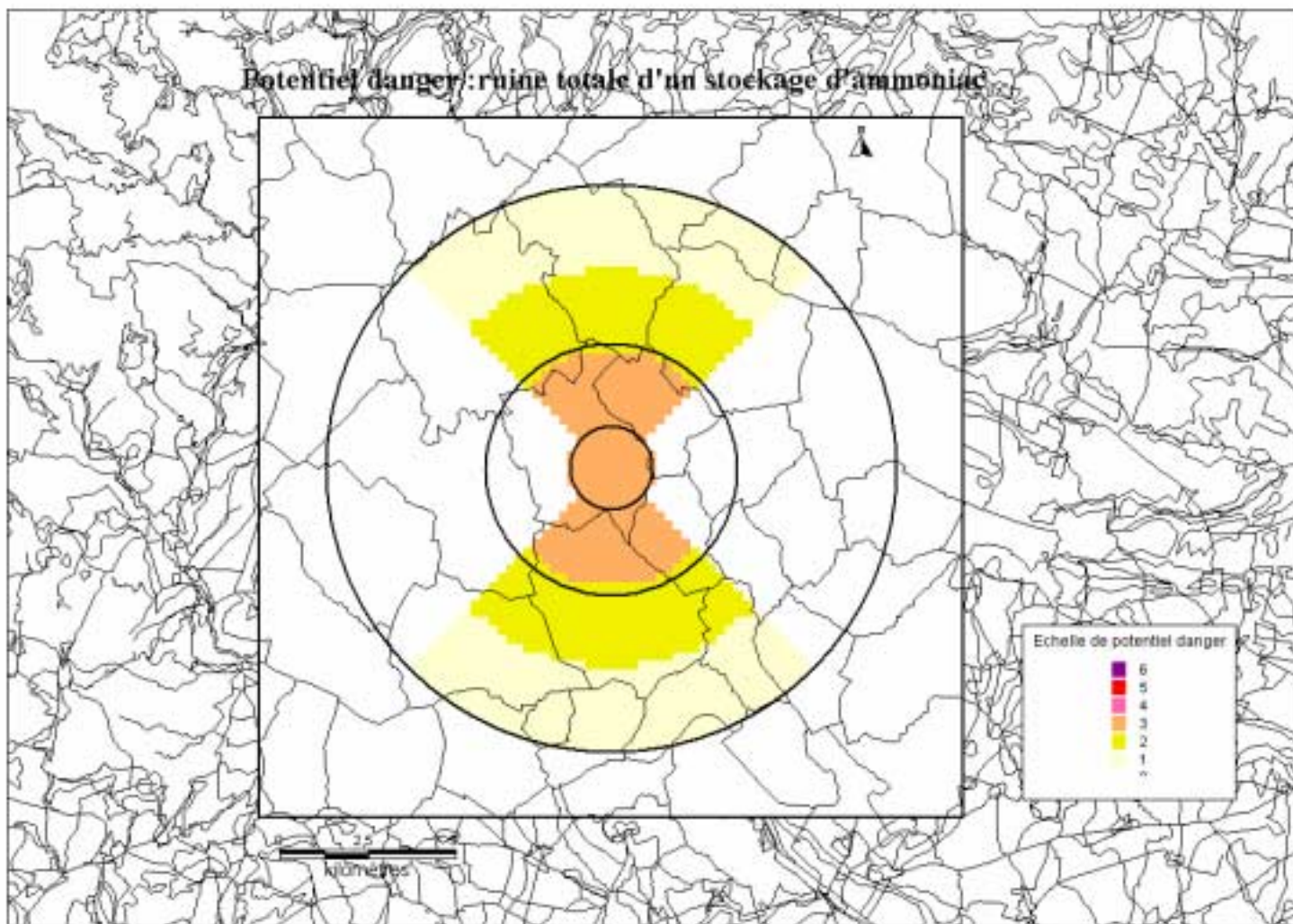


Figure III.38 : Potentiel danger du scénario n°1

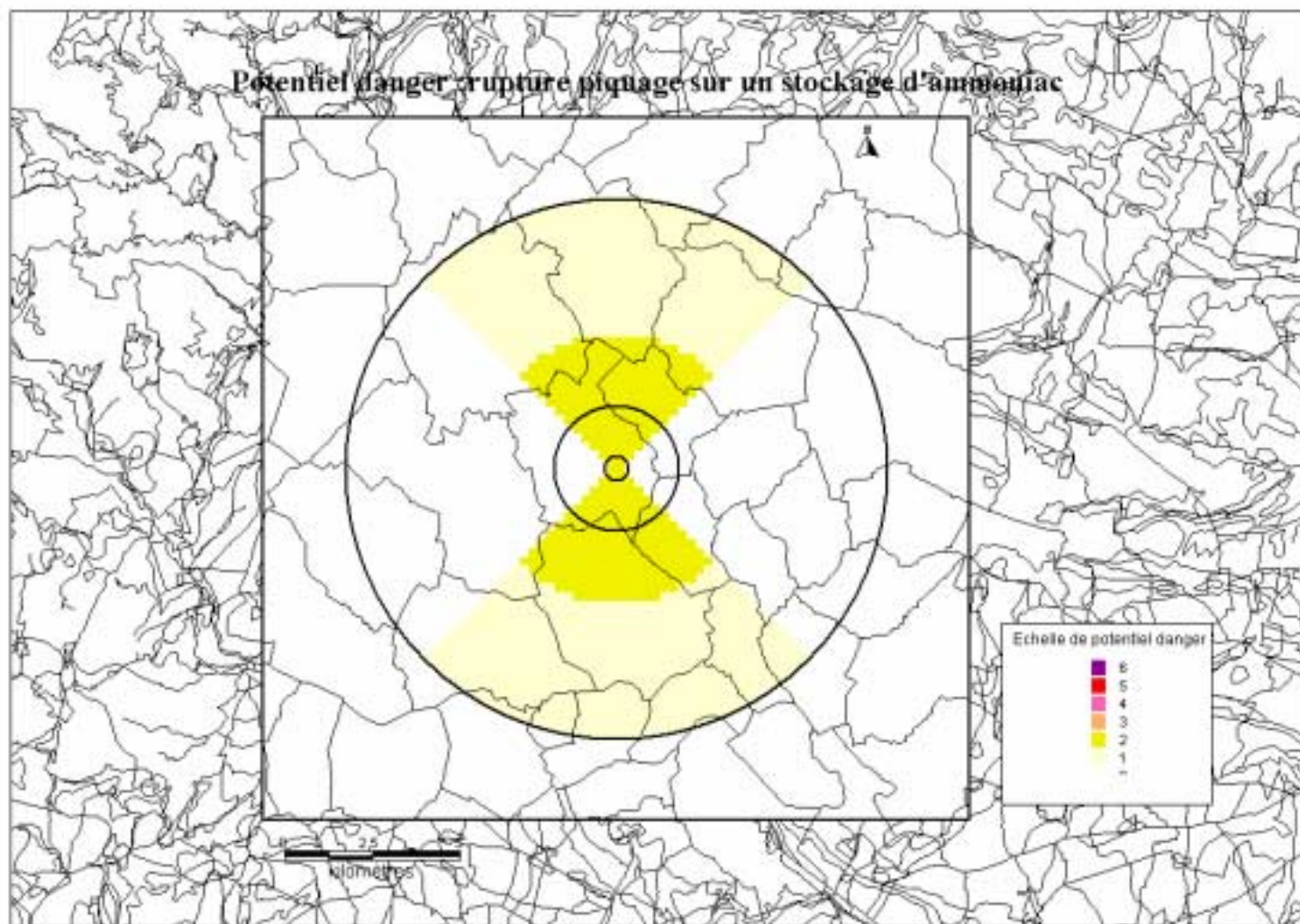


Figure III.39 : Potentiel danger du scénario n°2

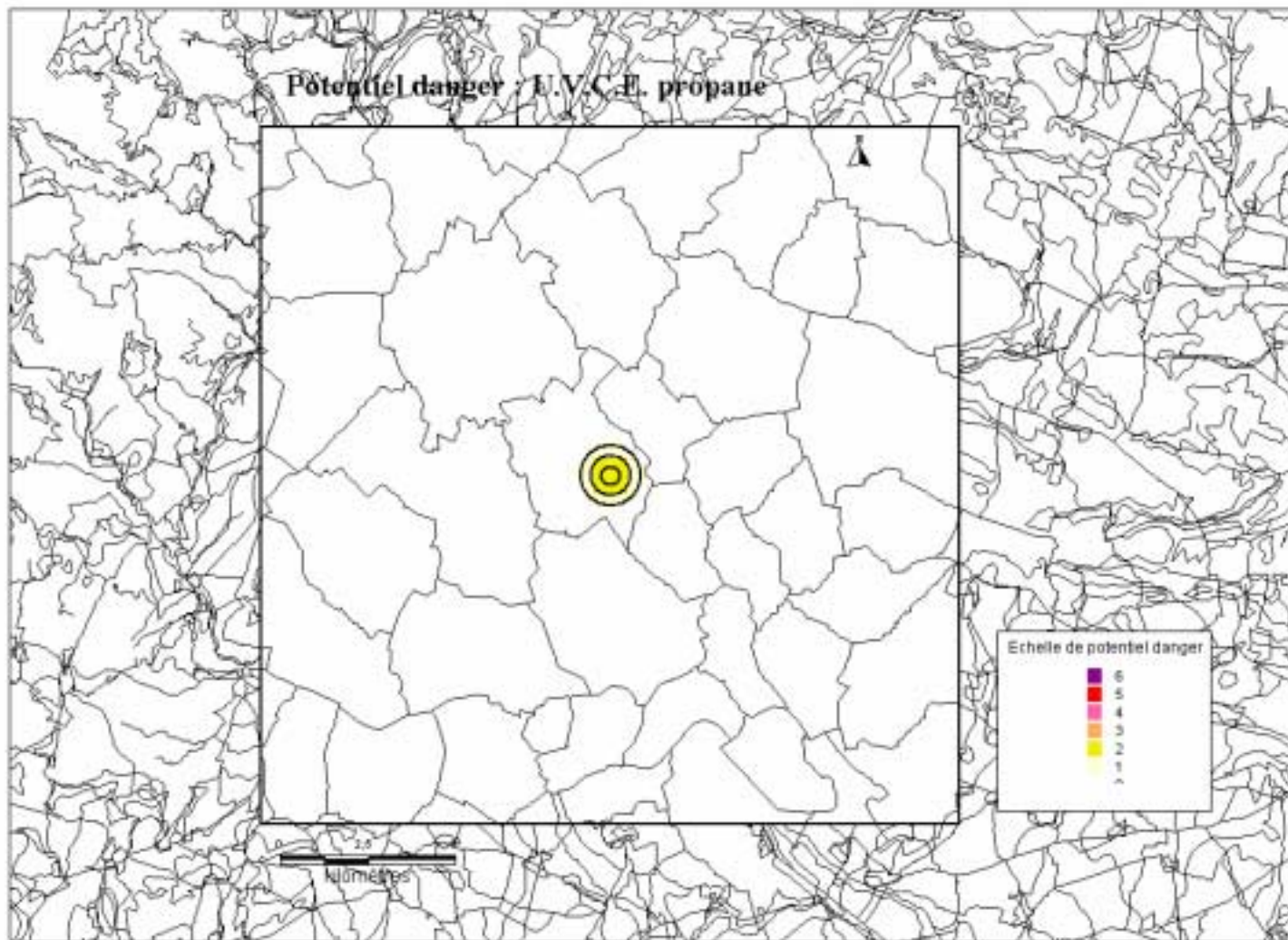


Figure III.40 : Potentiel danger du scénario n°3

### **III.3 Les niveaux de risque**

Les cartes de niveau de risques sont donc au nombre de quatre :

- Niveau de risque pour la ruine d'un réservoir d'ammoniac
- Niveau de risque pour une rupture sur un piquage d'un réservoir d'ammoniac
- Niveau de risque d'Unconfined Vapor Cloud Explosion de propane
- Niveau de risque global

Les premiers résultats obtenus correspondent aux cartographies de niveaux de risques par accident majeur. L'application permet donc d'obtenir trois cartes (figure III.41, figure III.42 et figure III.43).

#### **III.3.1 Le niveau de risque du scénario n°1**

Les cercles représentent les distances auxquelles sont obtenus les seuils des effets létaux, des effets irréversibles et des effets réversibles. Une analyse classique se base généralement sur les distances Z1 et Z2 pour la gestion et la négociation des risques entre les industriels et les autorités compétentes et ne prend pas en compte la zone correspondant aux effets réversibles. Par conséquent, elle ne permet pas de prendre réellement en compte la zone vulnérable présente au Nord Ouest du site industriel.

En effet, l'analyse d'un jeu de cartes complet pour un accident majeur constitué d'une carte de potentiel danger, d'une carte de vulnérabilité globale et d'une carte de niveau de risque, montre l'intérêt de ne pas se limiter uniquement aux zones d'effet d'un accident mais également de considérer la vulnérabilité des cibles en présence.

L'étude des cartes relatives au scénario d'accident n°1 (figure III.37, figure III.38 et figure III.41) montre qu'une partie de la zone d'effet léthal présente un niveau de risque faible même avec un potentiel danger moyen. Cela est dû au fait que la vulnérabilité de la zone considérée est très faible. Elle démontre également qu'une partie de la zone des effets irréversibles et réversibles peuvent présenter des zones de niveaux de risques fort et moyen et cela même pour des zones étant relativement éloignées de la source de danger.

Au travers de cette première carte, il ressort l'intérêt de tenir compte de la vulnérabilité pour aboutir à un niveau de risque. Une proposition de réflexion pourrait sur la base de ce type de résultats pour définir des zones où le risque est réellement conséquent en prenant en compte les spécificités de l'environnement au travers de la vulnérabilité.

### **III.3.2 Le niveau de risque du scénario n°2**

Pour la deuxième carte (figure III.42), la substance dangereuse mise en jeu est la même que pour le scénario n°1, mais les quantités changent. L'indice de gravité et donc le potentiel danger sont inférieurs à ceux de l'accident majeur 1. Ceci se retrouve au niveau des intensités du niveau de risques mais par contre les zones situées au nord ouest du site industriel présentent également un niveau de risques plus élevé que l'ensemble de la zone d'étude.

### **III.3.3 Le niveau de risque du scénario n°3**

Enfin pour la dernière séquence accidentelle (figure III.43), le niveau de risque est moyen ou faible mais sur une zone d'effet excessivement petite. En effet, la limite des effets se situe à moins d'un kilomètre du site industriel. Seules les cibles présentes au niveau du site industriel génèrent un niveau de risque moyen.

### **III.3.4 Le niveau de risque global**

La carte de niveau de risque global est une synthèse des cartes de niveau de risques par accident majeur, les différents points abordés ci-dessus sont valables pour la carte de niveau de risque globale. Pour résumer, l'avantage de construire un niveau de risque couplant le potentiel danger et la vulnérabilité d'une zone permet d'affiner l'analyse des risques d'une zone soumise aux effets d'accidents majeurs. Cette méthodologie pourrait permettre une gestion de l'occupation du sol en tenant compte des cibles exposées de manière plus précise, en tenant compte que dans certains cas le niveau de risque peut être faible pour des zones très proches de la source de danger alors que réciproquement des zones éloignées peuvent présenter un niveau de risque élevé. La démarche proposée découpe la zone d'étude en huit secteurs, et donc pour avoir une approche plus majorante, il est envisageable d'évaluer le niveau de risque sur la totalité des secteurs.

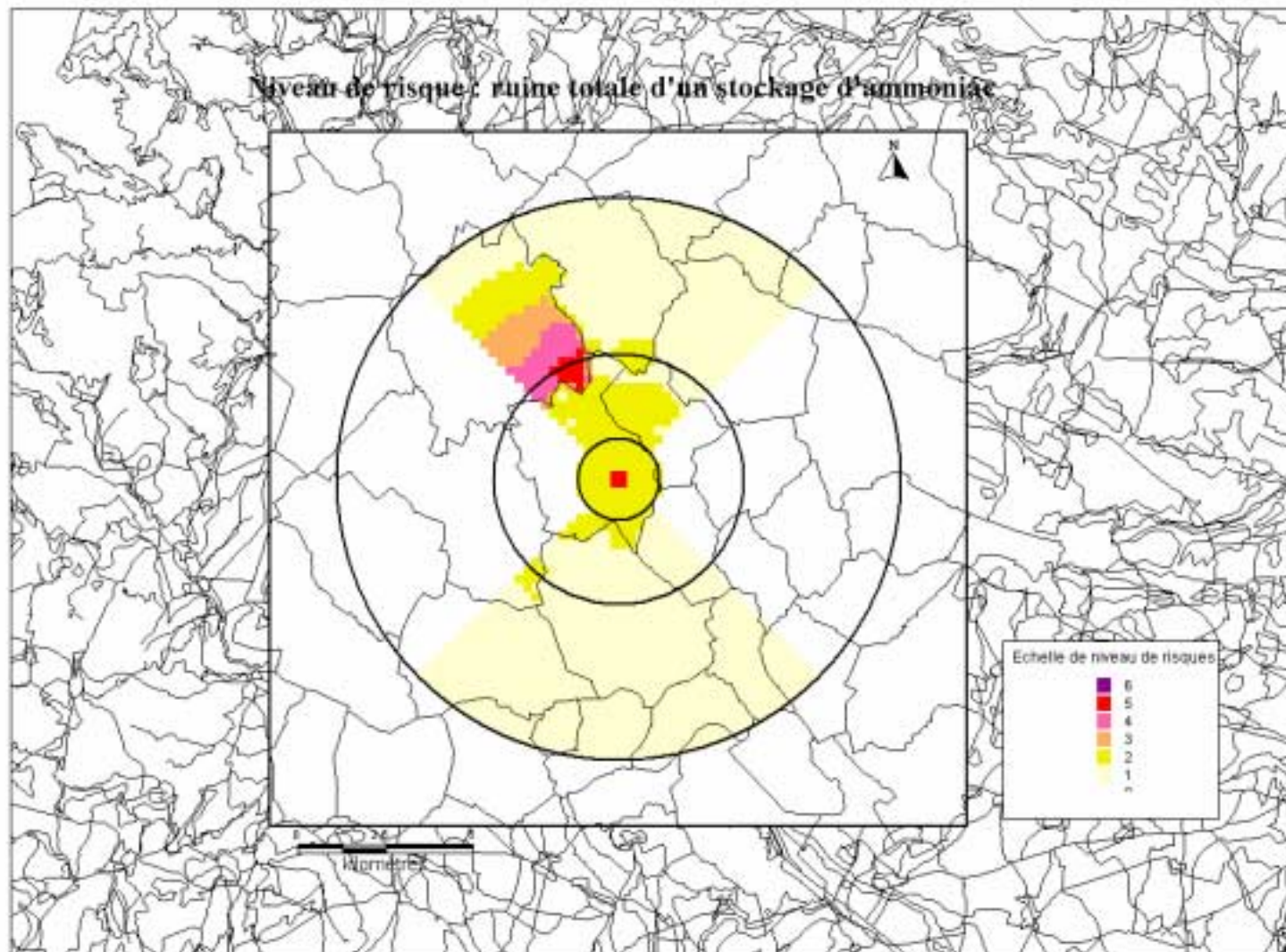


Figure III.41 : carte de niveau de risque du scénario n°1

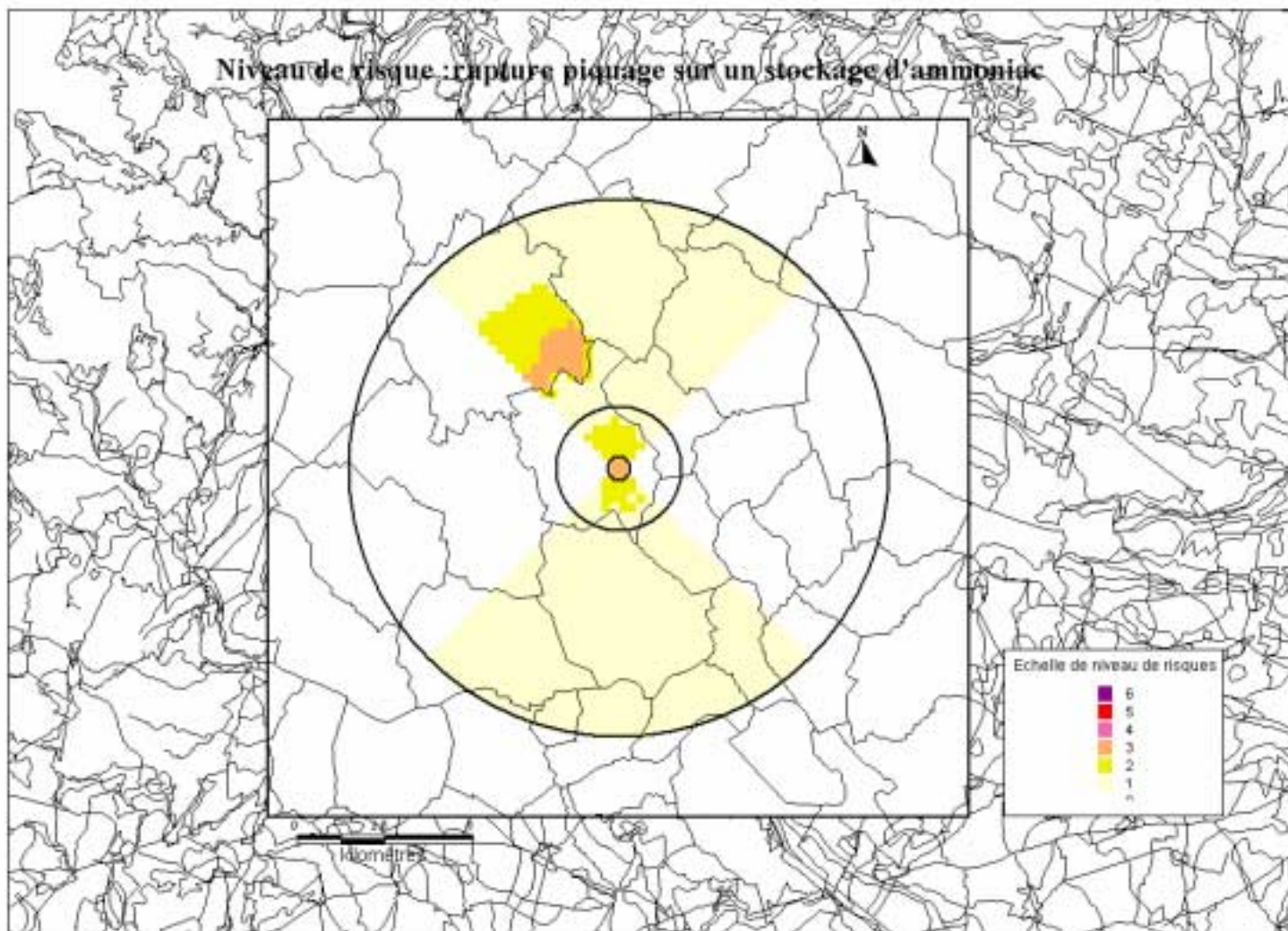


Figure III.42 : carte de niveau de risque du scénario n°2

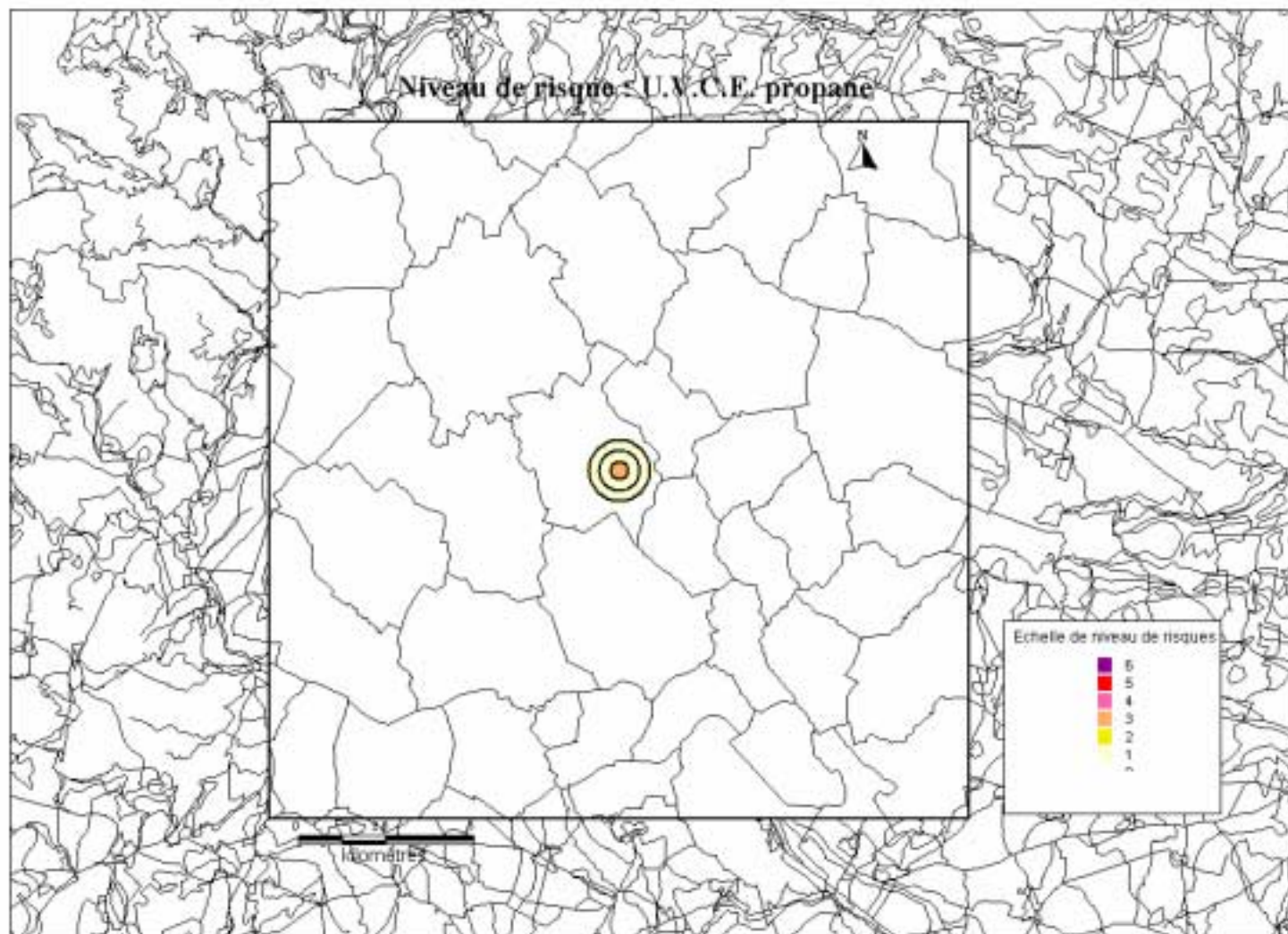


Figure III.43 : carte de niveau de risque du scénario n°3

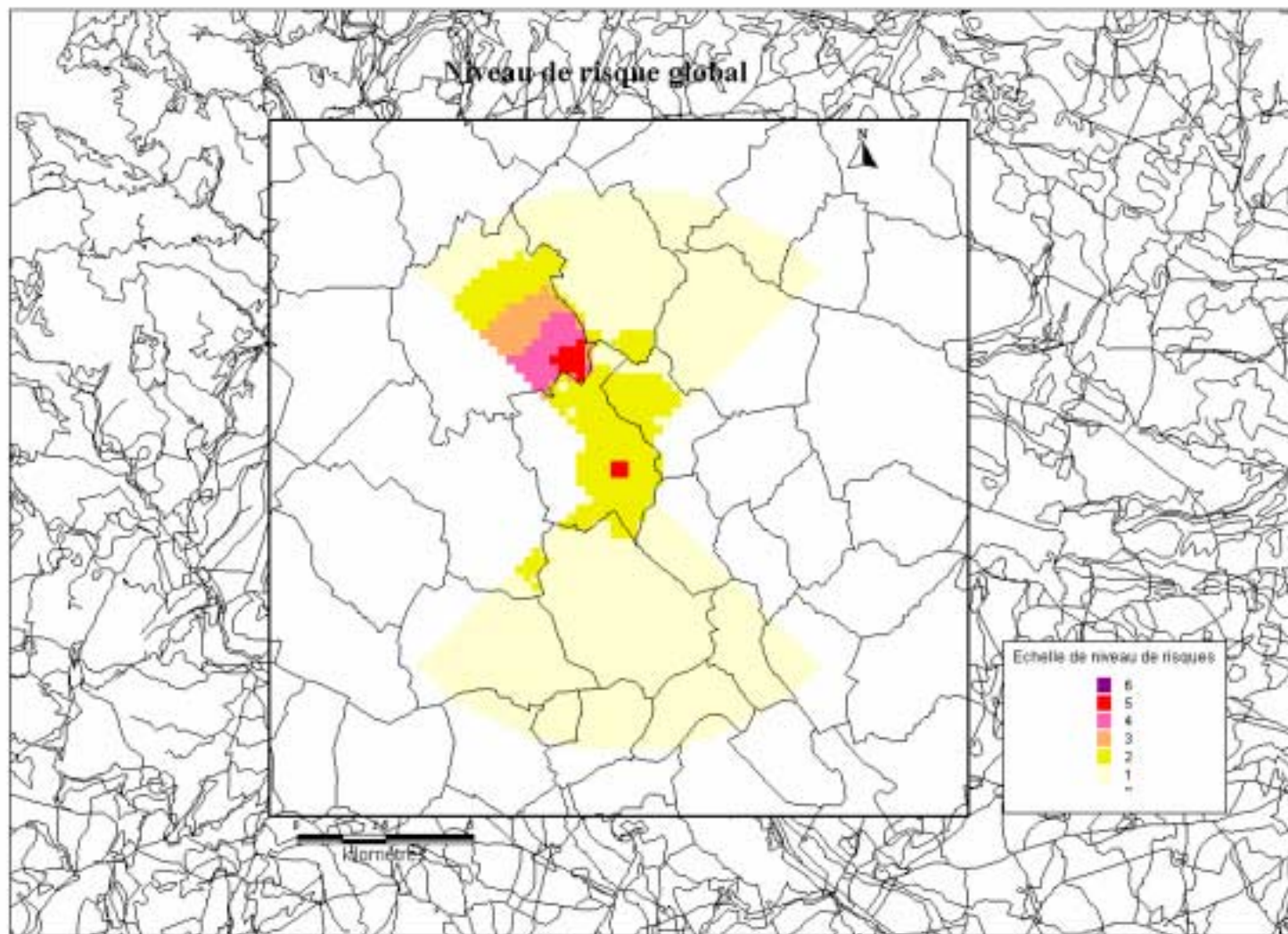


Figure III.44 : carte de niveau de risque global

Cette démarche permet de mettre en avant l'intérêt de retenir le paramètre représentant la vulnérabilité des cibles présentes autour des sites industriels en couplant celle-ci à un potentiel danger pour aboutir à un niveau de risque spatial. Ce nouveau paramètre met en évidence la possibilité d'avoir des zones sensibles à un effet physiques même au delà de la distance des effets irréversibles (ZEI). Ceci est du à la fois à la vulnérabilité et à la concentration de cibles sur une zone donnée.

### ***III.4 Les limitations et les améliorations***

La principale limitation repose sur le fait que le point de départ est un document fourni par l'industriel aux autorités compétentes (étude de danger, plan d'opération interne) qui sert de base à la méthodologie développée ci-dessus et donc il n'y a pas de démarche harmonisée d'un point de vue national pour le dimensionnement des effets des accidents majeurs. Il serait donc intéressant, même si cette approche est partiellement présente dans le guide de maîtrise de l'urbanisation, de compléter cette méthodologie avec une phase préliminaire permettant d'établir des scénarios d'accident majeurs en fonction des caractéristiques propres aux différents types de sites industriels.

Une autre limitation de cette étude est due à l'utilisation d'une méthode de hiérarchisation multicritères qui est une méthode basée sur le jugement d'expert (au travers du questionnaire) et donc subjective. Et également par le fait que les séquences accidentelles sont considérées indépendantes (pas de gestion de l'effet domino). D'un point de vue technique, le problème de la mise jour des données est aussi un facteur de limitation de cette méthode.

Deux améliorations sont à envisager :

- la prise en compte du management de la sécurité au sein d'un site et une approche qualitative et quantitative des barrières de prévention et de protection (celle-ci peut être prise en compte de manière implicite au travers de la modélisation des phénomènes accidentels).
- La prise en compte des effets dominos intra et inter site. Ce point soulève notamment le problème de succession rapide d'effets physiques de même nature ou différents et ceux-ci peuvent être considéré cumulatif dans une approche majorante ou bien non totalement cumulatif.

Ces deux points pourraient être notamment abordés de manière quantitative grâce à une approche probabiliste.

D'un point de vue technique, des améliorations envisageables, pour arriver à une analyse spatiale plus fine pourraient consister :

- à réduire la taille de la maille au niveau des zones présentant un niveau de risques élevé.
- Et d'autre part d'utiliser des bases de données concernant la répartition de la population non plus à l'échelle de la commune mais en redécoupant celle-ci en trois zones distinctes qui correspondent à un zone urbaine, péri-urbaine et rurale.

Ceci permettrait d'obtenir une analyse spatiale pour la gestion du plan d'occupation des sols plus précise (concertation entre les industriels et les autorités compétentes) et également pour la répartition des moyens de secours à mettre en place lors de la gestion de crise d'un accident majeur.

## Conclusion

---

Les démarches d'analyse et d'évaluation des risques sont un des processus de la gestion des risques industriels. Au travers de cette approche, une identification, une évaluation qualitative et / ou quantitative des risques et une hiérarchisation de ceux-ci peuvent être effectuées.

L'objectif de ce travail était de mettre en place une méthode d'évaluation du niveau de risque d'une installation industrielle en tenant compte à la fois des spécificités du site et de son environnement et également de la vulnérabilité des cibles humaines, environnementales et matérielles présentes autour de l'établissement.

Pour atteindre ce but, la première phase de l'étude a porté sur un état de l'art des méthodes d'analyse et d'évaluation des risques. Environ soixante dix méthodes ont pu être identifiées et analysées. L'étude a :

- recensé les différentes phases d'une analyse de risques (identification, évaluation et hiérarchisation) et leurs modes de couplages. Par ailleurs, les données d'entrée, les types de résultats et les moteurs de traitement ont pu être identifiés.
- montré que peu de méthodes sont transférables à divers types d'activités industrielles et un faible nombre d'entre elles permettent une analyse globale du système (établissement et environnement).

A partir de ces constatations, la méthode a été développée au travers de plusieurs indices :

- le premier indice est l'indice de gravité  $I_G$ . Il porte sur la source de danger et a pour but de quantifier le niveau de gravité d'un accident majeur au travers des paramètres tels que les propriétés dangereuses de la substance, les conditions d'utilisation ou de stockage, et la masse de substance impliquée. Les propriétés dangereuses sont retranscrites par l'indice de dangerosité qui est corrigé par un facteur dit de quantité et un facteur dit de structure afin d'obtenir l'indice de gravité.
- le second indice est le flux de propagation  $F$ .  $F$  est dédié à la propagation des effets des accidents majeurs dans l'environnement. Il est construit sur la base des distances d'effets correspondant aux seuils d'effet létaux, irréversibles et réversibles. Le

principe retenu consiste à considérer que la propagation d'un phénomène est linéaire pour une zone d'effet (zone d'effet léthal, zone d'effet irréversible ou d'effet réversible) mais non linéaire pour la totalité de la zone d'effet (zone d'effet réversible).

- Le dernier indice est l'indice de vulnérabilité V. Il caractérise la vulnérabilité des cibles susceptibles d'être affectées par les effets des accidents majeurs. Pour cela, la méthode de hiérarchisation multicritères de SAATY a été mise en œuvre. Elle permet de construire la fonction de vulnérabilité et d'évaluer l'importance des facteurs de pondération représentant la vulnérabilité de chaque cible (humaine environnementale et matérielle), au travers d'un questionnaire soumis à un panel d'experts.

Après avoir évalué chaque indice de manière indépendante, ces derniers sont agrégés afin d'obtenir deux nouvelles catégories d'indices.

- Ainsi, le potentiel danger est le produit de l'indice de gravité par l'indice de flux à une distance source – cible donnée (approche cartographique).
- Le niveau de risque peut être, quant à lui défini par le produit du potentiel danger par la valeur de l'indice de vulnérabilité à une distance source – cible donnée (approche cartographique).

La dernière partie portait sur les résultats de cette méthode qui sont de trois types :

- La quantification des facteurs de pondération de la fonction de vulnérabilité basée sur le recueil des avis d'experts
- L'application de la méthode à un site pilote.
- L'obtention des cartes de potentiel danger, de vulnérabilité, et de niveau de risque du site pilote.

De manière synthétique, la vulnérabilité globale d'une zone est très fortement liée à celle de la vulnérabilité humaine (environ 70% de la vulnérabilité globale) et dans une moindre mesure à celle de la vulnérabilité environnementale (environ 20% de la vulnérabilité globale). La vulnérabilité matérielle n'a en fait que très peu d'influence sur cette dernière. Ces résultats de coefficients de vulnérabilité représentent la perception d'un groupe d'experts, et il est important de noter que cette approche permet d'avoir une démarche quantitative mais subjective. En effet, les valeurs de ces coefficients peuvent être modifiées en fonction de la culture de risques des experts consultés.

Les analyses relatives au potentiel danger permettent d'établir des zones d'effets qui sont au nombre de trois (létaux, irréversible et réversibles) et le couplage de celui-ci à la vulnérabilité spatiale fait apparaître pour des zones éloignées de la source de danger un niveau de risque élevé. Au contraire certaines zones proches présentent un niveau de risque faible, ceci est du au fait que peu de cibles sont présentes dans celles-ci.

Cette méthode apporte une vision innovante de l'évaluation des risques et fournit un outil d'évaluation des documents fournis par les industriels aux autorités compétentes. A partir des résultats obtenus grâce à cette méthode, une réflexion pourrait être réalisée pour la gestion de l'occupation des sols autour des sites à hauts risques entre les autorités compétentes et les industriels.

## Références bibliographiques

---

[1] Ayral P.A., Griot C., « document préparatoire au colloque international : DIRE LE RISQUE : le risque en examen » sous l'égide du Conseil de l'Europe, Mèze, 18-20 mai 2002, 83p.

[2] United Nations, Department of humanitarian affairs, « Internationally agreed glossary of basic terms related to disaster management », <http://www.unisdr.org/unisdr/glossaire.htm>.

[3] Conseil régional des accidents industriels majeurs du Montréal métropolitain, « Guide de gestion des risques d'accidents industriels majeurs à l'intention des municipalités et de l'industrie », <http://www.cum.qc.ca/cum%2Dfr/bmu/pdf/craimint.pdf>, 1999.

[4] Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, « Dossier d'information, la prévention des risques industriels », Département de la communication, service de presse, 2001

[5] « La directive Seveso II », Edition législative, bul 230, 1997, pp. 6933-6947.

[6] « Third working draft of risk management terminology », ISO/TMB on Risk management Terminology, Berlin meeting, 25-27 october 1999.

[7] P. Perilhon, « Eléments méthodiques », Phoebus, la revue de la sûreté de fonctionnement, L'analyse de risques, n°12, 2000, pp. 31-49.

[8] Groupe de recherche management des risques majeurs, « le management intégré des risques de catastrophes : une approche par acteur », actes du 5<sup>ème</sup> colloque transfrontalier CLUSE, Université de Genève, 21-22 sept 2000, <http://www.unige.ch/mrm/>

[9] R. L. Rogers, The RASE Project « risk assessment of unit operations and equipment », <http://www.safetynet.de/EC-Projects/>, 2000, pp. 1-50.

[10] F. I. Khan, S. A. Abbasi, « Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries », *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol 11, n°4, 1998, pp. 261-277.

[11] B. Rasmussen, C. Whetton, « Hazard identification on plant functional modelling », *Reliability Engineering and System Safety*, vol 55, n°2, 1997, pp. 77-84.

[12] M. Nicolet-Monnier, « Integrated regional risk assessment: the situation in Switzerland », *Int. J. Environment and Pollution*, Vol 6, n°4-6, 1996, pp. 440-461.

[13] H. M. Tweeddale, R. F. Cameron, S. S. Sylvester, « Some experiences in hazard identification and risk short listing », *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol 5, n°5, 1992, pp. 279-288.

[14] R. Kennedy, B. Kirwan, « Development of a hazard and operability-based method for identifying safety management vulnerabilities in high risk systems », *Safety Sciences*, vol 30, n°3, 1998, pp. 249-274.

[15] P. D. Sankey, « An insurer's involvement in the risk reduction process », In proceeding from 9<sup>th</sup> International Symposium Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, 1998, pp. 441-450.

[16] R. M. Pitblado, J. C. Williams, D. H. Slater, « Quantitative assessment of process safety programs », *Plant/Operations Progress*, vol 9, n°3, 1990, pp. 169-175.

[17] F. I. Khan, S. A. Abbasi, « OptHazop- an effective and optimum approach for Hazop study », *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol 10, n°3, 1997, pp. 191-204.

[18] A. Toola, « Plant level safety analysis », *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol 5, n°2, 1992, pp. 119-124.

[19] C. Delvosalle, C. Fievez, F. Benjelloun, « Development of a methodology for the identification of potential domino effects in « Seveso » industries », In proceeding from 9<sup>th</sup> International Symposium Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, 1998, pp. 1252-1261.

[20] N. W. Hurst, S. Young, I. Donald, H. Gibson, A. Muyselaar, « Measures of safety management performance and attitudes to safety at major hazard sites », Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol 9, n°2, 1996, pp. 161-172.

[21] E. Korjusiommi, R. Salo, R. Taylor, « Hazard analysis for batch processes and for special operations », In proceeding from 9<sup>th</sup> International Symposium Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, 1998, pp. 422-431.

[22] P. W. H. Chung, E. Broomfield, S. H. Yang, « Safety related questions for computer-controlled plants : derivation, organisation and application », Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol 11, n°6, 1998, pp. 397-406.

[23] Y. Shuanghua, P. W. H. Chung, « Hazard analysis and support tool for computer controlled processes », Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol 11, n°5, 1998, pp. 333-345.

[24] F. I. Khan, S. A. Abbasi, « Multivariate hazard identification and ranking system », Process Safety Progress, vol 17, n°3, 1998, pp. 157-170.

[25] F. I. Khan, S. A. Abbasi, « Accident hazard index : a multi-attribute method for process industry hazard rating », Trans IChemE, vol 75, Part B, 1997, pp. 217-224.

[26] C. S. Kao, Y. S. Duh, « Chemical runaway reaction hazard index and risk assessment », In proceeding from 9<sup>th</sup> International Symposium Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, 1998, pp. 965-975.

[27] American Institute of Chemical Engineers, « Dow's chemical exposure index guide », first edition, AIChE technical manual, NY, 1994.

[28] American Institute of Chemical Engineers, « Dow's fire and explosion index guide », 6eme edition AIChE technical manual, NY, 1987.

[29] O. Dolladille, « Proposition d'une méthode d'analyse d'effet domino », Préventique-sécurité, n°44, 1999, pp. 62-70.

[30] P. Jäger, K. Kühnreich, « Approach to a systematic determination and evaluation of risk potential », In proceeding from 9<sup>th</sup> International Symposium Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, 1998, pp. 393-403.

[31] M. D. Troutt., H. H. Elsaid, « The potential value of SAATY's eigenvector scaling method for short-term forecasting of currency exchanges rates », Siam Review, Vol 38, 1996, pp. 650-654.

[32] J. Holmberg, « Risk follow up by probabilistic safety assessment-experience from a finish pilot study », Reliability Engineering and System Safety, vol 53, n°1, 1996, pp. 3-15.

[33] W. Jezler, « Earthquake safety of structures and installations in chemical industry in the context of risk analysis », In proceeding from 9<sup>th</sup> International Symposium Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, 1998, pp. 414-421.

[34] G. Tiemessen, J. P. van Zweeden, « risk assessment of the transport of hazardous materials », In proceeding from 9<sup>th</sup> International Symposium Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, 1998, pp. 299-307.

[35] S. A. Gadd, D. G. Leeming, T. N. K. Riley, « Transport Riskat : the HSE quantified risk assessment tool for toxic and flammable dangerous goods transport by road and rail in Great Britain », In proceeding from 9<sup>th</sup> International Symposium Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, 1998, pp. 308-317.

[36] K. Davoudian, J. S. Wu, G. Apostolakis, « The work process analysis model (WPAM) », Reliability Engineering and System Safety, vol 45, 1994, pp. 107-125.

- [37] K. J. M. Ham, H. J. C. M. van Kessel, T. Wiersma, « Experiences with a safety report according to Seveso II : a pilot project in the Netherlands », In proceeding from 9<sup>th</sup> International Symposium Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, 1998, pp. 1326-1340.
- [38] W. P. G. Schlechter, « Facility risk review as a mean to addressing existing risk during the life cycle of a process unit, operation or facility », International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol 66, n°1-3, 1996, pp. 387-402.
- [39] A. Kusiak, A. Zakarian, « Risk assessment of process models », Computers & Industrial Engineering, vol 30, n°4, 1996, pp. 599-610.
- [40] N. Larson, A. Kusiak, « Managing design processes: a risk assessment approach », IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics- part A: systems and humans, vol 26, n°6, 1996, pp. 749-759.
- [41] I. A. Papazoglou, Z. Nivolianitou, O. Aneziris, M. Christou, « Probabilistic safety analysis in chemical installation », Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol 5, n°3, 1992, pp. 181-191.
- [42] K. Oien, S. Sklet, L. Nielsen, « Development of risk level indicators for petroleum production platform », In proceeding from 9<sup>th</sup> International Symposium Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, 1998, pp. 382-393.
- [43] I. Puertas, J. C. Sanz C. Vaquero, M. Marono, R. Sola, « Procedure for the review of quantitative risk assessment of the process industries », In proceeding from 9<sup>th</sup> International Symposium Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, 1998, pp. 283-288.
- [44] C. Alonso, J. Gavalda, « a method to determine environmental risk in chemical process industries », In proceeding from 9<sup>th</sup> International Symposium Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, 1998, pp. 1219-1227.

[45] D. G. Leeming, F.F. Saccomanno, « Use of quantified risk assessment in evaluating the risks of transporting chlorine by road and rail », *Transportation Research Record*, n°1430, 1994, pp. 27-35.

[46] F. I. Khan, S. A. Abbasi, « Inherently safer design based on rapid risk analysis », *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol 11, N°6, 1998, pp. 361-372.

[47] S. Descourriere, E. Bernuchon, O. Salvi, P. Bonnet, “improvement of the hazard identification and assessment in application of Seveso II directive”, in *Proceedings of ESREL conference*, Lyon, vol 2, 18-21 march 2002, pp 800-805.

[48] G. Koller, U. Fischer, K. Hungerbühler, « Assessing safety, Health, and environmental impact early during process development », *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol 39, n°4, 2000, pp 960-972.

[49] M. B. Swanson, G.A. Davis, L. E. Kincaid, T. W Schultz, J. E. Bartmess, S. L. Jones and E. L. George, « A screening method for ranking and scoring chemicals by potential human health and environmental impacts », *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol 16, n°2, 1997, pp 372-383.

[50] J. V. Tarazona, A. Fresno, S. Aycard, C. Ramos, M. M. Vega, G. Carbonell, « Assessing the potential hazard of chemical substances for the terrestrial environment. Development of hazard classification criteria and quantitative environmental indicators », *The Science of the Total Environment*, vol 247, n°2-3, 2000, pp 151-164.

[51] C. G. Vassiliadis, E. N. Pistikopoulos, « Maintenance based strategies for environment risk minimization in the process industries », *Journal of Hazardous Materials*, vol 71, n°1-3, 2000, pp 481-501.

[52] C. Kirchsteiger, « Absolute and relative ranking approaches for comparing and communicating industrial accidents », *Journal of Hazardous Materials*, vol 59, n°1, 1998, pp 31-54.

[53] Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, service SEI BARPI, « L'échelle de gravité des accidents », 1999.

[54] V. C. Marshall, S. Ruhemann, « An anatomy of hazard systems and its application to acute process hazards », Trans IChemE, vol 75, part B, 1997, pp 65-72.

[55] D. Blockley, W. Dester, « Hazard and energy in risky decisions », Civil. Eng. and Env. Syst., vol 16, 1999, pp 315-337.

[56] K. Van Breugel, « Storage system criteria for hazardous products », Structural Engineering International, vol 1, 1997, pp 53-55.

[57] S. Glatron, « Industries dangereuses et planification : cartographier les risques technologiques majeurs », Mappemonde, vol 2, 1995, pp 32-35.

[58] J. Szegö, « Influence calculations of risk assessment in spatiotemporal terms. A new method for mapping risks for a dynamic human population », Journal of Hazardous Materials, vol 61, n°1-3, 1998, pp 125-131.

[59] D. Slater, H. Jones, « Environmental risk assessment and the environment agency », Journal of Hazardous Materials, vol 65, n°1-2, 1999, pp 77-91.

[60] J. C. Suh, B. Lee, I.K. Kang and E.S. Yoon, « An expert system for automated hazard analysis based on multimodel approach », Computers & chemical Engineering, vol 21, Supplement 1, 1997, pp S917-S922.

[61] C. Preyssl, « Safety risk assessment and management, the ESA approach », Reliability Engineering and system safety, vol 49, n°3, 1995, pp 303-309.

[62] J. Steinberg, « cartographie synthétique des risques naturels et technologiques en milieu urbain », Bull. Association Géographique française, Paris, vol 5, 1992, pp 456-464.

[63] S.R. Cave, D.W. Edwards, « Chemical process route selection based on assessment of inherent environmental hazard », *Computer & Chemical Engineering*, vol 21, 1997, pp S965-S970.

[64] Arrêté du 20 avril 1994 relatif à la déclaration, la classification, l'emballage et l'étiquetage des substances, <http://aida.ineris.fr>

[65] P.J. Bowen, L.C. Shirvill, « Combustion hazards posed by the pressurised atomization of high flash point liquids », *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol 7, n°3, 1994, pp 233-241.

[66] J.L. Burgess, G.P. Pappas, W.O. Robertson, « Hazardous materials incidents: The Washington Poison center experience and approach to exposure assessment », *Journal of Occupational and environmental Medicine*, vol 39, part 8, 1997, pp 760-766.

[67] D.R. Shonnard, T. Laurvick, A. Mayer, « Critical Evaluation of pollutant fate and risk model for pollution prevention », AICHE Summer Meeting, Boston, Mass./August 1, 1995.

[68] G.E. Odisharia, V.S. Safonov, A.S. Yedigarov, A.A. Shvyryaev, « Risk methodology in safety analysis of typical gas industry facilities », *Proceedings of international gas research conference*, 1995, pp 45-53.

[69] P.Aurousseau, H. Squividant, M.C. Baqué, F. Simon, « Analyse des facteurs de risque de transfert de pesticides dans les paysages. Etablissement d'une hiérarchie de ces risques : application au calcul d'un indice de risque par bassin versant et par parcelle », *Rapport final de la convention 95.00.023 avec l'agence de l'Eau Loire Bretagne*, 1995.

[70] U. Hauptmanns, « Computer aid valuation of safety management », *Trans IchemE*, vol 76, part B, 1998, pp 286-290.

[71] Fiche de Données de Sécurité, <http://www.france-chimie.com/fds.htm>.

[72] Secrétariat d'Etat auprès du ministère chargé de l'environnement et de la prévention des risques technologiques et naturels majeurs – DPPR – Service de l'Environnement Industriel, « Maîtrise de l'urbanisation autour des sites à haut risque », collection Préventique, 1990.

[73] SAATY T. L., « Décider face à la complexité : une approche analytique multicritère d'aide à la décision », collection université – entreprise, entreprise moderne d'édition, Paris, 1984.

[74] M.R. Mahmoud, L. A. Garcia, « Comparison of different multicriteria evaluation methods for the Red Bluff diversion dam », Environmental Modelling & Software, vol 15, 2000, pp 471-478.

[75] P. Vincke, « L'aide multicritère à la décision », Statistique et mathématiques appliquées, Ed Université de Bruxelles, 1989.

[76] Dusserre G., « Contribution à la gestion des interventions lors d'accidents de transport de matières dangereuses », thèse de l'Université d'Aix-Marseille – Chimie de l'environnement et santé – L.G.E.I., Ecole des Mines d'Alès, 1997, 168p.

[77] S. Sauvagnargues-Lesage, « Contribution à la mise en œuvre d'un Système d'Information Géographique appliqué à la Sécurité Civile pour la prévention et la lutte contre les feux de forêts ». Thèse d'Université, Aix-Marseille I, 1998.

[78] CDROM « Populations légales recensement de la population de 1999 », <http://www.insee.fr>

[79] Base de données « Bdcarto », <http://www.ign.fr>

[80] Base de données « Corine Land Cover », <http://www.ifen.fr>

[81] Code de la construction et de l'habitation règlement de sécurité du 25 Juin 1980 modifié par Arrêté du 22juin 1980 (établissements du 5ème catégorie) R123-1 à R123- 55, Journal Officiel.

[82] Tixier J., Dusserre G., Rault-Doumax S., Ollivier J., Bourely C., « OSIRIS: software for the consequence evaluation of transportation of dangerous goods accidents”, Environmental modelling & software, vol 17, n°7, 2002, p 627-637.

**ANNEXES**

# Liste des annexes

<b>Annexe I : Le questionnaire</b>	<b>p 204</b>
<b>Annexe II : Les matrices de Saaty</b>	<b>p 248</b>
<b>Annexe III : Les structures hiérarchiques</b>	<b>p 253</b>

## *Annexe I : Questionnaire*

L'annexe I présente un exemplaire de questionnaire qui a été soumis aux experts pour l'évaluation des coefficients de vulnérabilité.

# QUESTIONNAIRE

Nom :		Prénom :	
Fonction :			
Spécialité :			
Structure d'accueil :			
Pouvoir public :		Industriel :	
- préfet	<input type="checkbox"/>	- Site classé A ou AS	<input type="checkbox"/>
- DRIRE	<input type="checkbox"/>	- Site non classé A ou AS	<input type="checkbox"/>
- SEI	<input type="checkbox"/>	Service d'intervention :	
Elus locaux :		- CIRCOSC	<input type="checkbox"/>
- maire	<input type="checkbox"/>	- SDIS	<input type="checkbox"/>
- conseiller municipaux	<input type="checkbox"/>	- CSP	<input type="checkbox"/>
Conseil/Tiers experts		Autres	
<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	

L'ensemble de ces renseignements permettront lors de la phase d'analyse des résultats de bien discerner les choix effectués en fonction de catégories de personnes.

## Vulnérabilité globale

### Objectif :

Détermination de l'importance des effets physiques (surpression, flux thermique, toxicité et pollution liquide) générés sur chaque catégorie de cibles (Humaine, Environnementale, Matérielle) pour la détermination de la Vulnérabilité globale ( $V_{\text{globale}}$ ).

### Matrice 1 : Classer l'importance des différentes cibles.

Q1) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'une cible *humaine* par rapport à une cible *environnementale*, diriez vous qu'une cible *humaine* :

	N'est pas prioritaire par rapport à une	A moins d'importance qu'une	A la même importance qu'une	A plus d'importance qu'une	Est prioritaire par rapport à une
--	---	-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	-----------------------------------

cible *environnementale* ?

Q2) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'une cible *humaine* par rapport à une cible *matérielle*, diriez vous qu'une cible *humaine* :

	N'est pas prioritaire par rapport à une	A moins d'importance qu'une	A la même importance qu'une	A plus d'importance qu'une	Est prioritaire par rapport à une
--	---	-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	-----------------------------------

cible *matérielle* ?

Q3) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'une cible *environnementale* par rapport à une cible *matérielle*, diriez vous qu'une cible *environnementale* :

	N'est pas prioritaire par rapport à une	A moins d'importance qu'une	A la même importance qu'une	A plus d'importance qu'une	Est prioritaire par rapport à une
--	---	-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	-----------------------------------

cible *matérielle* ?

### Matrice 2, 3, 4 : Classer l'importance des effets en fonction des différents types de cibles.

Q4) Pour une cible *humaine*, un effet de **surpression** :

	N'a pas d'influence par rapport à un	A moins d'influence qu'un	A la même influence qu'un	A plus d'influence qu'un	A une influence prépondérante par rapport à un
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

effet **thermique** subi par cette même cible.

Q5) Pour une cible *humaine*, un effet de **surpression** :

	N'a pas d'influence par rapport à un	A moins d'influence qu'un	A la même influence qu'un	A plus d'influence qu'un	A une influence prépondérante par rapport à un
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

effet **toxique** subi par cette même cible.

Q6) Pour une cible *humaine*, un effet de **surpression** :

N'a pas d'influence par rapport à un	A moins d'influence qu'un	A la même influence qu'un	A plus d'influence qu'un	A une influence prépondérante par rapport à un
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

effet **pollution liquide** subi par cette même cible.

Q7) Pour une cible *humaine*, un effet **thermique** :

N'a pas d'influence par rapport à un	A moins d'influence qu'un	A la même influence qu'un	A plus d'influence qu'un	A une influence prépondérante par rapport à un
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

effet **toxique** subi par cette même cible.

Q8) Pour une cible *humaine*, un effet **thermique** :

N'a pas d'influence par rapport à un	A moins d'influence qu'un	A la même influence qu'un	A plus d'influence qu'un	A une influence prépondérante par rapport à un
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

effet de **pollution liquide** subi par cette même cible.

Q9) Pour une cible *humaine*, un effet **toxique** :

N'a pas d'influence par rapport à un	A moins d'influence qu'un	A la même influence qu'un	A plus d'influence qu'un	A une influence prépondérante par rapport à un
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

effet **pollution liquide** subi par cette même cible.

Q10) Pour une cible *environnementale*, un effet de **surpression** :

N'a pas d'influence par rapport à un	A moins d'influence qu'un	A la même influence qu'un	A plus d'influence qu'un	A une influence prépondérante par rapport à un
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

effet **thermique** subi par cette même cible.

Q11) Pour une cible *environnementale*, un effet de **surpression** :

N'a pas d'influence par rapport à un	A moins d'influence qu'un	A la même influence qu'un	A plus d'influence qu'un	A une influence prépondérante par rapport à un
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

effet **toxique** subi par cette même cible.

Q12) Pour une cible *environnementale*, un effet de **surpression** :

N'a pas d'influence par rapport à un	A moins d'influence qu'un	A la même influence qu'un	A plus d'influence qu'un	A une influence prépondérante par rapport à un
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

effet **pollution liquide** subi par cette même cible.

Q13) Pour une cible *environnementale*, un effet **thermique** :

N'a pas d'influence par rapport à un	A moins d'influence qu'un	A la même influence qu'un	A plus d'influence qu'un	A une influence prépondérante par rapport à un
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

effet **toxique** subi par cette même cible.

Q14) Pour une cible *environnementale*, un effet **thermique** :

N'a pas d'influence par rapport à un	A moins d'influence qu'un	A la même influence qu'un	A plus d'influence qu'un	A une influence prépondérante par rapport à un
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

effet de **pollution liquide** subi par cette même cible.

Q15) Pour une cible *environnementale*, un effet **toxique** :

N'a pas d'influence par rapport à un	A moins d'influence qu'un	A la même influence qu'un	A plus d'influence qu'un	A une influence prépondérante par rapport à un
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

effet **pollution liquide** subi par cette même cible.

Q16) Pour une cible *matérielle*, un effet de **surpression** :

N'a pas d'influence par rapport à un	A moins d'influence qu'un	A la même influence qu'un	A plus d'influence qu'un	A une influence prépondérante par rapport à un
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

effet **thermique** subi par cette même cible.

Q17) Pour une cible *matérielle*, un effet de **surpression** :

N'a pas d'influence par rapport à un	A moins d'influence qu'un	A la même influence qu'un	A plus d'influence qu'un	A une influence prépondérante par rapport à un
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

effet **toxique** subi par cette même cible.

Q18) Pour une cible *matérielle*, un effet de **surpression** :

N'a pas d'influence par rapport à un	A moins d'influence qu'un	A la même influence qu'un	A plus d'influence qu'un	A une influence prépondérante par rapport à un
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

effet **pollution liquide** subi par cette même cible.

Q19) Pour une cible *matérielle*, un effet **thermique** :

N'a pas d'influence par rapport à un	A moins d'influence qu'un	A la même influence qu'un	A plus d'influence qu'un	A une influence prépondérante par rapport à un
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

effet **toxique** subi par cette même cible.

Q20) Pour une cible *matérielle*, un effet **thermique** :

	N'a pas d'influence par rapport à un	A moins d'influence qu'un	A la même influence qu'un	A plus d'influence qu'un	A une influence prépondérante par rapport à un
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

effet de **pollution liquide** subi par cette même cible.

Q21) Pour une cible *matérielle*, un effet **toxique** :

	N'a pas d'influence par rapport à un	A moins d'influence qu'un	A la même influence qu'un	A plus d'influence qu'un	A une influence prépondérante par rapport à un
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

effet **pollution liquide** subi par cette même cible.

## Cibles humaines

### Objectif :

Détermination de la sensibilité des cibles humaines (personnel du site, population locale sédentaire, population fréquentant les Etablissement Recevant du Public, usagers des voies de communication) face à un effet physique donné par aux impacts sanitaire, économique et psychologique.

Matrice 5 : Classer l'importance des différents impacts pour un effet de surpression.

Q22) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *sanitaire* dû à une surpression sur une cible humaine par rapport à un impact *économique*, diriez vous qu'un impact *sanitaire* :

<input type="checkbox"/>	N'est pas prioritaire par rapport à un	<input type="checkbox"/>	A moins d'importance qu'un	<input type="checkbox"/>	A la même importance qu'un	<input type="checkbox"/>	A plus d'importance qu'un	<input type="checkbox"/>	Est prioritaire par rapport à un
--------------------------	--	--------------------------	----------------------------	--------------------------	----------------------------	--------------------------	---------------------------	--------------------------	----------------------------------

impact *économique* ?

Q23) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *sanitaire* dû à une surpression sur une cible humaine par rapport à un impact *psychologique*, diriez vous qu'un impact *sanitaire* :

<input type="checkbox"/>	N'est pas prioritaire par rapport à un	<input type="checkbox"/>	A moins d'importance qu'un	<input type="checkbox"/>	A la même importance qu'un	<input type="checkbox"/>	A plus d'importance qu'un	<input type="checkbox"/>	Est prioritaire par rapport à un
--------------------------	--	--------------------------	----------------------------	--------------------------	----------------------------	--------------------------	---------------------------	--------------------------	----------------------------------

impact *psychologique* ?

Q24) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *économique* dû à une surpression sur une cible humaine par rapport à un impact *psychologique*, diriez vous qu'un impact *économique* :

<input type="checkbox"/>	N'est pas prioritaire par rapport à un	<input type="checkbox"/>	A moins d'importance qu'un	<input type="checkbox"/>	A la même importance qu'un	<input type="checkbox"/>	A plus d'importance qu'un	<input type="checkbox"/>	Est prioritaire par rapport à un
--------------------------	--	--------------------------	----------------------------	--------------------------	----------------------------	--------------------------	---------------------------	--------------------------	----------------------------------

impact *psychologique* ?

Matrice 6, 7, 8 : Classer l'importance des différentes cibles humaines pour un effet de surpression en fonction des différents impacts.

Q25) En considérant un impact sanitaire induit par une surpression, une cible *personnel du site* :

<input type="checkbox"/>	N'est pas sensible par rapport à une	<input type="checkbox"/>	est moins sensible qu'une	<input type="checkbox"/>	Est aussi sensible qu'une	<input type="checkbox"/>	Est plus sensible qu'une	<input type="checkbox"/>	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------	--------------------------------------	--------------------------	---------------------------	--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--

cible *population locale sédentaire*.

Q26) En considérant un impact sanitaire induit par une surpression, une cible *personnel du site* :

<input type="checkbox"/>	N'est pas sensible par rapport à une	<input type="checkbox"/>	est moins sensible qu'une	<input type="checkbox"/>	Est aussi sensible qu'une	<input type="checkbox"/>	Est plus sensible qu'une	<input type="checkbox"/>	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------	--------------------------------------	--------------------------	---------------------------	--------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--

cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public*.

Q27) En considérant un impact sanitaire induit par une suppression, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q28) En considérant un impact sanitaire induit par une suppression, une cible *population locale sédentaire* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public*.

Q29) En considérant un impact sanitaire induit par une suppression, une cible *population locale sédentaire* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q30) En considérant un impact sanitaire induit par une suppression, une cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q31) En considérant un impact économique induit par une suppression, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population locale sédentaire*.

Q32) En considérant un impact économique induit par une suppression, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public*.

Q33) En considérant un impact économique induit par une suppression, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q34) En considérant un impact économique induit par une suppression, une cible *population locale sédentaire* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public*.

Q35) En considérant un impact économique induit par une suppression, une cible *population locale* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q36) En considérant un impact économique induit par une suppression, une cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q37) En considérant un impact psychologique induit par une suppression, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population locale sédentaire*.

Q38) En considérant un impact psychologique induit par une suppression, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public*.

Q39) En considérant un impact psychologique induit par une suppression, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q40) En considérant un impact psychologique induit par une suppression, une cible *population locale sédentaire* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public*.

Q41) En considérant un impact psychologique induit par une surpression, une cible *population locale sédentaire* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q42) En considérant un impact psychologique induit par une surpression, une cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

### Matrice 9 : Classer l'importance des différents impacts pour un effet flux thermique.

Q43) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *sanitaire* dû à un flux thermique sur une cible humaine par rapport à un impact *économique*, diriez vous qu'un impact *sanitaire* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *économique* ?

Q44) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *sanitaire* dû à un flux thermique sur une cible humaine par rapport à un impact *psychologique*, diriez vous qu'un impact *sanitaire* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *psychologique* ?

Q45) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *économique* dû à un flux thermique sur une cible humaine par rapport à un impact *psychologique*, diriez vous qu'un impact *économique* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *psychologique* ?

### Matrice 10, 11, 12: Classer l'importance des différentes cibles humaines pour un effet de flux thermique en fonction des différents impacts.

Q46) En considérant un impact sanitaire induit par un flux thermique, une cible *personnel du site* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population locale sédentaire*.

Q47) En considérant un impact sanitaire induit par un flux thermique, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public*.

Q48) En considérant un impact sanitaire induit par un flux thermique, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q49) En considérant un impact sanitaire induit par un flux thermique, une cible *population locale sédentaire* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public*.

Q50) En considérant un impact sanitaire induit par un flux thermique, une cible *population locale sédentaire* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q51) En considérant un impact sanitaire induit par un flux thermique, une cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q52) En considérant un impact économique induit par un flux thermique, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population locale sédentaire*.

Q53) En considérant un impact économique induit par un flux thermique, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public*.

Q54) En considérant un impact économique induit par un flux thermique, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q55) En considérant un impact économique induit par un flux thermique, une cible *population locale sédentaire* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public*.

Q56) En considérant un impact économique induit par un flux thermique, une cible *population locale sédentaire* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q57) En considérant un impact économique induit par un flux thermique, une cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q58) En considérant un impact psychologique induit par un flux thermique, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population locale sédentaire*.

Q59) En considérant un impact psychologique induit par un flux thermique, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public*.

Q60) En considérant un impact psychologique induit par un flux thermique, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q61) En considérant un impact psychologique induit par un flux thermique, une cible *population locale sédentaire* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public*.

Q62) En considérant un impact psychologique induit par un flux thermique, une cible *population locale sédentaire* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q63) En considérant un impact psychologique induit par un flux thermique, une cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

### Matrice 13 : Classer l'importance des différents impacts pour un effet toxicité.

Q64) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *sanitaire* dû à une toxicité sur une cible humaine par rapport à un impact *économique*, diriez vous qu'un impact *sanitaire* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *économique* ?

Q65) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *sanitaire* dû à une toxicité sur une cible humaine par rapport à un impact *psychologique*, diriez vous qu'un impact *sanitaire* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *psychologique* ?

Q66) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *économique* dû à une toxicité sur une cible humaine par rapport à un impact *psychologique*, diriez vous qu'un impact *économique* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *psychologique* ?

### Matrice 14, 15, 16: Classer l'importance des différentes cibles humaines pour un effet toxicité en fonction des différents impacts.

Q67) En considérant un impact sanitaire induit par une toxicité, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population locale sédentaire*.

Q68) En considérant un impact sanitaire induit par une toxicité, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public*.

Q69) En considérant un impact sanitaire induit par une toxicité, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q70) En considérant un impact sanitaire induit par une toxicité, une cible *population locale sédentaire* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public*.

Q71) En considérant un impact sanitaire induit par une toxicité, une cible *population locale sédentaire* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q72) En considérant un impact sanitaire induit par une toxicité, une cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q73) En considérant un impact économique induit par une toxicité, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population locale sédentaire*.

Q74) En considérant un impact économique induit par une toxicité, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public*.

Q75) En considérant un impact économique induit par une toxicité, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q76) En considérant un impact économique induit par une toxicité, une cible *population locale sédentaire* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public*.

Q77) En considérant un impact économique induit par une toxicité, une cible *population locale sédentaire* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q78) En considérant un impact économique induit par une toxicité, une cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q79) En considérant un impact psychologique induit par une toxicité, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population locale sédentaire*.

Q80) En considérant un impact psychologique induit par une toxicité, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public*.

Q81) En considérant un impact psychologique induit par une toxicité, une cible *personnel du site* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q82) En considérant un impact psychologique induit par une toxicité, une cible *population locale sédentaire* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public*.

Q83) En considérant un impact psychologique induit par une toxicité, une cible *population locale sédentaire* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q84) En considérant un impact psychologique induit par une toxicité, une cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

### Matrice 17 : Classer l'importance des différents impacts pour un effet de pollution liquide.

Q85) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *sanitaire* dû à une pollution liquide sur une cible humaine par rapport à un impact *économique*, diriez vous qu'un impact *sanitaire* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *économique* ?

Q86) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *sanitaire* dû à une pollution liquide sur une cible humaine par rapport à un impact *psychologique*, diriez vous qu'un impact *sanitaire* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *psychologique* ?

Q87) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *économique* dû à une pollution liquide sur une cible humaine par rapport à un impact *psychologique*, diriez vous qu'un impact *économique* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *psychologique* ?

Matrice 18, 19, 20: Classer l'importance des différentes cibles humaines pour un effet de pollution liquide en fonction des différents impacts.

Q88) En considérant un impact sanitaire induit par une pollution liquide, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population locale sédentaire*.

Q89) En considérant un impact sanitaire induit par une pollution liquide, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public*.

Q90) En considérant un impact sanitaire induit par une pollution liquide, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q91) En considérant un impact sanitaire induit par une pollution liquide, une cible *population locale sédentaire* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public*.

Q92) En considérant un impact sanitaire induit par une pollution liquide, une cible *population locale sédentaire* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q93) En considérant un impact sanitaire induit par une pollution liquide, une cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q94) En considérant un impact économique induit par une pollution liquide, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population locale sédentaire*.

Q95) En considérant un impact économique induit par une pollution liquide, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public*.

Q96) En considérant un impact économique induit par une pollution liquide, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q97) En considérant un impact économique induit par une pollution liquide, une cible *population locale sédentaire* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public*.

Q98) En considérant un impact économique induit par une pollution liquide, une cible *population locale sédentaire* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q99) En considérant un impact économique induit par une pollution liquide, une cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q100) En considérant un impact psychologique induit par une pollution liquide, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population locale sédentaire*.

Q101) En considérant un impact psychologique induit par une pollution liquide, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public*.

Q102) En considérant un impact psychologique induit par une pollution liquide, une cible *personnel du site* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q103) En considérant un impact psychologique induit par une pollution liquide, une cible *population locale sédentaire* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public*.

Q104) En considérant un impact psychologique induit par une pollution liquide, une cible *population locale sédentaire* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

Q105) En considérant un impact psychologique induit par une pollution liquide, une cible *population fréquentant un Etablissement Recevant du Public* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *usagers des voies de communication*.

## Cibles environnementales

### Objectif :

Détermination de la sensibilité des cibles environnementales (terres agricoles, espaces naturels, espaces naturels protégés, milieu aquatique) face à un effet physique donné par aux impacts sanitaire, économique et psychologique.

### Matrice 21 : Classer l'importance des différents impacts pour un effet de surpression.

Q106) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *sanitaire* dû à une surpression sur une cible environnementale par rapport à un impact *économique*, diriez vous qu'un impact *sanitaire* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *économique* ?

Q107) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *sanitaire* dû à une surpression sur une cible environnementale par rapport à un impact *psychologique*, diriez vous qu'un impact *sanitaire* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *psychologique* ?

Q108) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *économique* dû à une surpression sur une cible environnementale par rapport à un impact *psychologique*, diriez vous qu'un impact *économique* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *psychologique* ?

### Matrice 22, 23, 24 : Classer l'importance des différentes cibles environnementales pour un effet de surpression en fonction des différents impacts.

Q109) En considérant un impact sanitaire induit par une surpression, une cible *terres agricoles* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels*.

Q110) En considérant un impact sanitaire induit par une surpression, une cible *terres agricoles* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels protégés*.

Q111) En considérant un impact sanitaire induit par une surpression, une cible *terres agricoles* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q112) En considérant un impact sanitaire induit par une surpression, une cible *espaces naturels*:

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espace naturels protégés*.

Q113) En considérant un impact sanitaire induit par une surpression, une cible *espaces naturels*:

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q114) En considérant un impact sanitaire induit par une surpression, une cible *espaces naturels protégés* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q115) En considérant un impact économique induit par une surpression, une cible *terres agricoles* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels*.

Q116) En considérant un impact économique induit par une surpression, une cible *terres agricoles* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels protégés*.

Q117) En considérant un impact économique induit par une surpression, une cible *terres agricoles* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q118) En considérant un impact économique induit par une surpression, une cible *espaces naturels*:

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels protégés*.

Q119) En considérant un impact économique induit par une suppression, une cible *espaces naturels* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q120) En considérant un impact économique induit par une suppression, une cible *espaces naturels protégés* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q121) En considérant un impact psychologique induit par une suppression, une cible *terres agricoles* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels*.

Q122) En considérant un impact psychologique induit par une suppression, une cible *terres agricoles* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels protégés*.

Q123) En considérant un impact psychologique induit par une suppression, une cible *terres agricoles* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q124) En considérant un impact psychologique induit par une suppression, une cible *espaces naturels*:

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels protégés*.

Q125) En considérant un impact psychologique induit par une suppression, une cible *espaces naturels* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q126) En considérant un impact psychologique induit par une suppression, une cible *espaces naturels protégés* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Matrice 25 : Classer l'importance des différents impacts pour un effet de flux thermique.

Q127) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *sanitaire* dû à un flux thermique sur une cible environnementale par rapport à un impact *économique*, diriez vous qu'un impact *sanitaire* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *économique* ?

Q128) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *sanitaire* dû à un flux thermique sur une cible environnementale par rapport à un impact *psychologique*, diriez vous qu'un impact *sanitaire* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *psychologique* ?

Q129) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact économique dû à un flux thermique sur une cible environnementale par rapport à un impact psychologique, diriez vous qu'un impact économique :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *psychologique* ?

Matrice 26, 27, 28 : Classer l'importance des différentes cibles environnementales pour un effet de surpression en fonction des différents impacts.

Q130) En considérant un impact sanitaire induit par un flux thermique, une cible *terres agricoles* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels*.

Q131) En considérant un impact sanitaire induit par un flux thermique, une cible *terres agricoles* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels protégés*.

Q132) En considérant un impact sanitaire induit par un flux thermique, une cible *terres agricoles* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q133) En considérant un impact sanitaire induit par un flux thermique, une cible *espaces naturels*:

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espace naturels protégés*.

Q134) En considérant un impact sanitaire induit par un flux thermique, une cible *espaces naturels*:

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q135) En considérant un impact sanitaire induit par un flux thermique, une cible *espaces naturels protégés* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q136) En considérant un impact économique induit par un flux thermique, une cible *terres agricoles* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels*.

Q137) En considérant un impact économique induit par un flux thermique, une cible *terres agricoles* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels protégés*.

Q138) En considérant un impact économique induit par un flux thermique, une cible *terres agricoles* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q139) En considérant un impact économique induit par un flux thermique, une cible *espaces naturels*:

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels protégés*.

Q140) En considérant un impact économique induit par un flux thermique, une cible *espaces naturels* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q141) En considérant un impact économique induit par un flux thermique, une cible *espaces naturels protégés* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q142) En considérant un impact psychologique induit par un flux thermique, une cible *terres agricoles* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels*.

Q143) En considérant un impact psychologique induit par un flux thermique, une cible *terres agricoles* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels protégés*.

Q144) En considérant un impact psychologique induit par un flux thermique, une cible *terres agricoles* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q145) En considérant un impact psychologique induit par un flux thermique, une cible *espaces naturels*:

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels protégés*.

Q146) En considérant un impact psychologique induit par un flux thermique, une cible *espaces naturels* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q147) En considérant un impact psychologique induit par un flux thermique, une cible *espaces naturels protégés* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Matrice 29 : Classer l'importance des différents impacts pour un effet de toxicité.

Q148) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *sanitaire* dû à une toxicité sur une cible environnementale par rapport à un impact *économique*, diriez vous qu'un impact *sanitaire* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *économique* ?

Q149) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *sanitaire* dû à une toxicité sur une cible environnementale par rapport à un impact *psychologique*, diriez vous qu'un impact *sanitaire* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *psychologique* ?

Q150) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *économique* dû à une toxicité sur une cible environnementale par rapport à un impact *psychologique*, diriez vous qu'un impact *économique* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *psychologique* ?

Matrice 30, 31, 32 : Classer l'importance des différentes cibles environnementales pour un effet de toxicité en fonction des différents impacts.

Q151) En considérant un impact sanitaire induit par une toxicité, une cible *terres agricoles* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels*.

Q152) En considérant un impact sanitaire induit par une toxicité, une cible *terres agricoles* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels protégés*.

Q153) En considérant un impact sanitaire induit par une toxicité, une cible *terres agricoles* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q154) En considérant un impact sanitaire induit par une toxicité, une cible *espaces naturels*:

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espace naturels protégés*.

Q155) En considérant un impact sanitaire induit par une toxicité, une cible *espaces naturels*:

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q156) En considérant un impact sanitaire induit par une toxicité, une cible *espaces naturels protégés* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q157) En considérant un impact économique induit par une toxicité, une cible *terres agricoles* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels*.

Q158) En considérant un impact économique induit par une toxicité, une cible *terres agricoles* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels protégés*.

Q159) En considérant un impact économique induit par une toxicité, une cible *terres agricoles* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q160) En considérant un impact économique induit par une toxicité, une cible *espaces naturels*:

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels protégés*.

Q161) En considérant un impact économique induit par une toxicité, une cible *espaces naturels* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q162) En considérant un impact économique induit par une toxicité, une cible *espaces naturels protégés* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q163) En considérant un impact psychologique induit par une toxicité, une cible *terres agricoles* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels*.

Q164) En considérant un impact psychologique induit par une toxicité, une cible *terres agricoles* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels protégés*.

Q165) En considérant un impact psychologique induit par une toxicité, une cible *terres agricoles* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q166) En considérant un impact psychologique induit par une toxicité, une cible *espaces naturels*:

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels protégés*.

Q167) En considérant un impact psychologique induit par une toxicité, une cible *espaces naturels* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q168) En considérant un impact psychologique induit par une toxicité, une cible *espaces naturels protégés* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Matrice 33 : Classer l'importance des différents impacts pour un effet de pollution liquide.

Q169) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *sanitaire* dû à une pollution liquide sur une cible environnementale par rapport à un impact *économique*, diriez vous qu'un impact *sanitaire* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *économique* ?

Q170) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *sanitaire* dû à une pollution liquide sur une cible environnementale par rapport à un impact *psychologique*, diriez vous qu'un impact *sanitaire* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *psychologique* ?

Q171) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *économique* dû à une pollution liquide sur une cible environnementale par rapport à un impact *psychologique*, diriez vous qu'un impact *économique* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *psychologique* ?

Matrice 34, 35, 36 : Classer l'importance des différentes cibles environnementales pour un effet de pollution liquide en fonction des différents impacts.

Q172) En considérant un impact sanitaire induit par une pollution liquide, une cible *terres agricoles* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels*.

Q173) En considérant un impact sanitaire induit par une pollution liquide, une cible *terres agricoles* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels protégés*.

Q174) En considérant un impact sanitaire induit par une pollution liquide, une cible *terres agricoles* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q175) En considérant un impact sanitaire induit par une pollution liquide, une cible *espaces naturels*:

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espace naturels protégés*.

Q176) En considérant un impact sanitaire induit par une pollution liquide, une cible *espaces naturels*:

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q177) En considérant un impact sanitaire induit par une pollution liquide, une cible *espaces naturels protégés* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q178) En considérant un impact économique induit par une pollution liquide, une cible *terres agricoles* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels*.

Q179) En considérant un impact économique induit par une pollution liquide, une cible *terres agricoles* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels protégés*.

Q180) En considérant un impact économique induit par une pollution liquide, une cible *terres agricoles* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q181) En considérant un impact économique induit par une pollution liquide, une cible *espaces naturels*:

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels protégés*.

Q182) En considérant un impact économique induit par une pollution liquide, une cible *espaces naturels* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q183) En considérant un impact économique induit par une pollution liquide, une cible *espaces naturels protégés* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q184) En considérant un impact psychologique induit par une pollution liquide, une cible *terres agricoles* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels*.

Q185) En considérant un impact psychologique induit par une pollution liquide, une cible *terres agricoles* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels protégés*.

Q186) En considérant un impact psychologique induit par une pollution liquide, une cible *terres agricoles* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q187) En considérant un impact psychologique induit par une pollution liquide, une cible *espaces naturels*:

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *espaces naturels protégés*.

Q188) En considérant un impact psychologique induit par une pollution liquide, une cible *espaces naturels* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

Q189) En considérant un impact psychologique induit par une pollution liquide, une cible *espaces naturels protégés* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *milieu aquatique*.

## Cibles matérielles

### Objectif :

Détermination de la sensibilité des cibles matérielles (site industriel, utilités publiques et infrastructures, structure bâtementaire privée, structure bâtementaire publique) face à un effet physique donné par aux impacts sanitaire, économique et psychologique.

### Matrice 37 : Classer l'importance des différents impacts pour un effet de surpression.

Q190) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *sanitaire* dû à une surpression sur une cible matérielle par rapport à un impact *économique*, diriez vous qu'un impact *sanitaire* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *économique* ?

Q191) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *sanitaire* dû à une surpression sur une cible matérielle par rapport à un impact *psychologique*, diriez vous qu'un impact *sanitaire* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *psychologique* ?

Q192) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *économique* dû à une surpression sur une cible matérielle par rapport à un impact *psychologique*, diriez vous qu'un impact *économique* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *psychologique* ?

### Matrice 38, 39, 40 : Classer l'importance des différentes cibles matérielles pour un effet de surpression en fonction des différents impacts.

Q193) En considérant un impact sanitaire induit par une surpression, une cible *site industriel* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *utilités publiques et infrastructures*.

Q194) En considérant un impact sanitaire induit par une surpression, une cible *site industriel* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâtementaire privée*.

Q195) En considérant un impact sanitaire induit par une surpression, une cible *site industriel* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q196) En considérant un impact sanitaire induit par une surpression, une cible *utilités publiques et infrastructures* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire privée*.

Q197) En considérant un impact sanitaire induit par une surpression, une cible *utilités publiques et infrastructures* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q198) En considérant un impact sanitaire induit par une surpression, une cible *structure bâimentaire privée*:

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q199) En considérant un impact économique induit par une surpression, une cible *site industriel* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *utilités publiques et infrastructures*.

Q200) En considérant un impact économique induit par une surpression, une cible *site industriel* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire privée*.

Q201) En considérant un impact économique induit par une surpression, une cible *site industriel* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q202) En considérant un impact économique induit par une suppression, une cible *utilités publiques et infrastructures* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire privée*.

Q203) En considérant un impact économique induit par une suppression, une cible *utilités publiques et infrastructures* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q204) En considérant un impact économique induit par une suppression, une cible structure bâimentaire privée :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q205) En considérant un impact psychologique induit par une suppression, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *utilités publiques et infrastructures*.

Q206) En considérant un impact psychologique induit par une suppression, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire privée*.

Q207) En considérant un impact psychologique induit par une suppression, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q208) En considérant un impact psychologique induit par une suppression, une cible *utilités publiques et infrastructures* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire privée*.

Q209) En considérant un impact psychologique induit par une suppression, une cible *utilités publiques et infrastructures* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q210) En considérant un impact psychologique induit par une suppression, une cible structure bâimentaire privée :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

#### Matrice 41 : Classer l'importance des différents impacts pour un effet de flux thermique.

Q211) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *sanitaire* dû à un flux thermique sur une cible matérielle par rapport à un impact *économique*, diriez vous qu'un impact *sanitaire* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *économique* ?

Q212) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *sanitaire* dû à un flux thermique sur une cible matérielle par rapport à un impact *psychologique*, diriez vous qu'un impact *sanitaire* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *psychologique* ?

Q213) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *économique* dû à un flux thermique sur une cible matérielle par rapport à un impact *psychologique*, diriez vous qu'un impact *économique* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *psychologique* ?

#### Matrice 42, 43, 44 : Classer l'importance des différentes cibles matérielles pour un effet de flux thermique en fonction des différents impacts.

Q214) En considérant un impact sanitaire induit par un flux thermique, une cible *site industriel* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *utilités publiques et infrastructures*.

Q215) En considérant un impact sanitaire induit par un flux thermique, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire privée*.

Q216) En considérant un impact sanitaire induit par un flux thermique, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q217) En considérant un impact sanitaire induit par un flux thermique, une cible *utilités publiques et infrastructures* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire privée*.

Q218) En considérant un impact sanitaire induit par un flux thermique, une cible *utilités publiques et infrastructures* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q219) En considérant un impact sanitaire induit par un flux thermique, une cible structure bâimentaire privée:

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q220) En considérant un impact économique induit par un flux thermique, une cible *industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *utilités publiques et infrastructures*.

Q221) En considérant un impact économique induit par un flux thermique, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire privée*.

Q222) En considérant un impact économique induit par un flux thermique, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q223) En considérant un impact économique induit par un flux thermique, une cible *utilités publiques et infrastructures* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire privée*.

Q224) En considérant un impact économique induit par un flux thermique, une cible *utilités publiques et infrastructures* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q225) En considérant un impact économique induit par un flux thermique, une cible structure bâimentaire privée :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q226) En considérant un impact psychologique induit par un flux thermique, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *utilités publiques et infrastructures*.

Q227) En considérant un impact psychologique induit par un flux thermique, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire privée*.

Q228) En considérant un impact psychologique induit par un flux thermique, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q229) En considérant un impact psychologique induit par un flux thermique, une cible *utilités publiques et infrastructures* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire privée*.

Q230) En considérant un impact psychologique induit par un flux thermique, une cible *utilités publiques et infrastructures* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q231) En considérant un impact psychologique induit par un flux thermique, une cible structure bâimentaire privée :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

#### Matrice 45 : Classer l'importance des différents impacts pour un effet de toxicité.

Q232) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *sanitaire* dû à une toxicité sur une cible matérielle par rapport à un impact *économique*, diriez vous qu'un impact *sanitaire* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *économique* ?

Q233) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *sanitaire* dû à une toxicité sur une cible matérielle par rapport à un impact *psychologique*, diriez vous qu'un impact *sanitaire* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *psychologique* ?

Q234) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *économique* dû à une toxicité sur une cible matérielle par rapport à un impact *psychologique*, diriez vous qu'un impact *économique* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *psychologique* ?

Matrice 46, 47, 48 : Classer l'importance des différentes cibles matérielles pour un effet de toxicité en fonction des différents impacts.

Q235) En considérant un impact sanitaire induit par une toxicité, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *utilités publiques et infrastructures*.

Q236) En considérant un impact sanitaire induit par une toxicité, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire privée*.

Q237) En considérant un impact sanitaire induit par une toxicité, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q238) En considérant un impact sanitaire induit par une toxicité, une cible *utilités publiques et infrastructures* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire privée*.

Q239) En considérant un impact sanitaire induit par une toxicité, une cible *utilités publiques et infrastructures* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q240) En considérant un impact sanitaire induit par une toxicité, une cible *structure bâimentaire privée*:

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q241) En considérant un impact économique induit par une toxicité, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *utilités publiques et infrastructures*.

Q242) En considérant un impact économique induit par une toxicité, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire privée*.

Q243) En considérant un impact économique induit par une toxicité, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q244) En considérant un impact économique induit par une toxicité, une cible *utilités publiques et infrastructures* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire privée*.

Q245) En considérant un impact économique induit par une toxicité, une cible *utilités publiques et infrastructures* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q246) En considérant un impact économique induit par une toxicité, une cible *structure bâimentaire privée* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q247) En considérant un impact psychologique induit par une toxicité, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *utilités publiques et infrastructures*.

Q248) En considérant un impact psychologique induit par une toxicité, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire privée*.

Q249) En considérant un impact psychologique induit par une toxicité, une cible *site industriel* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q250) En considérant un impact psychologique induit par une toxicité, une cible *utilités publiques et infrastructures* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire privée*.

Q251) En considérant un impact psychologique induit par une toxicité, une cible *utilités publiques et infrastructures* :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q252) En considérant un impact psychologique induit par une toxicité, une cible structure bâimentaire privée :

N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Matrice 49 : Classer l'importance des différents impacts pour un effet de pollution liquide.

Q253) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *sanitaire* dû à une pollution liquide sur une cible matérielle par rapport à un impact *économique*, diriez vous qu'un impact *sanitaire* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *économique* ?

Q254) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *sanitaire* dû à une pollution liquide sur une cible matérielle par rapport à un impact *psychologique*, diriez vous qu'un impact *sanitaire* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *psychologique* ?

Q255) Si vous aviez à hiérarchiser l'importance d'un impact *économique* dû à une pollution liquide sur une cible matérielle par rapport à un impact *psychologique*, diriez vous qu'un impact *économique* :

N'est pas prioritaire par rapport à un	A moins d'importance qu'un	A la même importance qu'un	A plus d'importance qu'un	Est prioritaire par rapport à un
--	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------------

impact *psychologique* ?

Matrice 50, 51, 52 : Classer l'importance des différentes cibles matérielles pour un effet de pollution liquide en fonction des différents impacts.

Q256) En considérant un impact sanitaire induit par une pollution liquide, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *utilités publiques et infrastructures*.

Q257) En considérant un impact sanitaire induit par une pollution liquide, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire privée*.

Q258) En considérant un impact sanitaire induit par une pollution liquide, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q259) En considérant un impact sanitaire induit par une pollution liquide, une cible *utilités publiques et infrastructures* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire privée*.

Q260) En considérant un impact sanitaire induit par une pollution liquide, une cible *utilités publiques et infrastructures* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q261) En considérant un impact sanitaire induit par une pollution liquide, une cible structure bâimentaire privée:

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q262) En considérant un impact économique induit par une pollution liquide, une cible *industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *utilités publiques et infrastructures*.

Q263) En considérant un impact économique induit par une pollution liquide, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire privée*.

Q264) En considérant un impact économique induit par une pollution liquide, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q265) En considérant un impact économique induit par une pollution liquide, une cible *utilités publiques et infrastructures* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire privée*.

Q266) En considérant un impact économique induit par une pollution liquide, une cible *utilités publiques et infrastructures* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q267) En considérant un impact économique induit par une pollution liquide, une cible structure bâimentaire privée :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q268) En considérant un impact psychologique induit par une pollution liquide, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *utilités publiques et infrastructures*.

Q269) En considérant un impact psychologique induit par une pollution liquide, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire privée*.

Q270) En considérant un impact psychologique induit par une pollution liquide, une cible *site industriel* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q271) En considérant un impact psychologique induit par une pollution liquide, une cible *utilités publiques et infrastructures* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire privée*.

Q272) En considérant un impact psychologique induit par une pollution liquide, une cible *utilités publiques et infrastructures* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

Q273) En considérant un impact psychologique induit par une pollution liquide, une cible *structure bâimentaire privée* :

	N'est pas sensible par rapport à une	est moins sensible qu'une	Est aussi sensible qu'une	Est plus sensible qu'une	A une grande sensibilité par rapport à une
--	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--

cible *structure bâimentaire publique*.

## *Annexe II : Matrices*

L'annexe II présente les matrices déduites des structures hiérarchiques construites pour l'établissement de l'indice de vulnérabilité. Les différentes classes de cibles sont rappelées ci-dessous :

- ***Cibles Humaines (H)***

- ✓ Personnel du site H1
- ✓ Population locale sédentaire H2
- ✓ Etablissement Recevant du Public (ERP) H3
- ✓ Usagers des voies de communication H4

- ***Cibles Environnementales (E)***

- ✓ Terres agricoles E1
- ✓ Espaces naturels E2
- ✓ Espaces naturels protégés E3
- ✓ Milieu aquatique E4

- ***Cibles Matérielles (M)***

- ✓ Site industriel M1
- ✓ Utilités publiques et infrastructures M2
- ✓ Structure bâtementaire privé M3
- ✓ Structure bâtementaire public M4

## Détermination de la vulnérabilité globale

### Objectif :

Détermination de l'importance des effets physiques EP (surpression, flux thermique, toxicité et pollution liquide) pour chaque catégorie de cibles (H, E, M) pour la détermination de la Vulnérabilité globale ( $V_{\text{globale}}$ ).

1ere Phase : hiérarchisation des critères de caractérisation

$V_{\text{globale}}$	$V_H$	$V_E$	$V_M$
$V_H$	1		
$V_E$		1	
$V_M$			1

Hiérarchisation de l'importance de la vulnérabilité des catégories de cibles (H, E, M) pour la détermination de la vulnérabilité globale  $V$  (matrice 1).

Par exemple, est ce que la catégorie humaine est plus, moins, beaucoup plus,... importante que la catégorie environnementale ?

2eme Phase : hiérarchisation des alternatives en fonction de chaque critère de caractérisation

$V_H$	surp	ft	tox	poll
surp	1			
ft		1		
tox			1	
poll				1

Evaluation de l'importance des effets physiques (surpression, flux thermique, toxicité, pollution liquide) pour la catégorie cible humaine (matrice 2).

Par exemple, est ce qu'un effet physique de surpression est plus, moins, beaucoup plus,... important qu'un effet physique de flux thermique pour la catégorie cible humaine?

$V_E$	surp	ft	tox	poll
surp	1			
ft		1		
tox			1	
poll				1

Evaluation de l'importance des effets physiques (surpression, flux thermique, toxicité, pollution liquide) pour la catégorie cible environnementale (matrice 3).

Par exemple, est ce qu'un effet physique de surpression est plus, moins, beaucoup plus,... important qu'un effet physique de flux thermique pour la catégorie cible environnementale?

$V_M$	surp	ft	tox	poll
surp	1			
ft		1		
tox			1	
poll				1

Evaluation de l'importance des effets physiques (surpression, flux thermique, toxicité, pollution liquide) pour la catégorie cible matérielle (matrice 4).

Par exemple, est ce qu'un effet physique de surpression est plus, moins, beaucoup plus,... important qu'un effet physique de flux thermique pour la catégorie cible matérielle?

## Détermination de la vulnérabilité humaine pour un effet physique i.

### Objectif :

Détermination de la sensibilité des cibles humaines (H1 à H4) face à un effet physique donné (surpression, flux thermique, toxicité, pollution liquide)

1ere Phase : hiérarchisation des critères de caractérisation

Hiérarchisation de l'importance des 3 types d'impacts générés par une **surpression** pour la catégorie cibles humaines.(matrice 5)

$V_H^{surp}$	Isan	Ieco	Ipsy
Isan	1		
Ieco		1	
Ipsy			1

Hiérarchisation de l'importance des 3 types d'impacts générés par un **flux thermique** pour la catégorie cibles humaines.(matrice 9)

$V_H^{ft}$	Isan	Ieco	Ipsy
Isan	1		
Ieco		1	
Ipsy			1

Hiérarchisation de l'importance des 3 types d'impacts générés par une **toxicité** pour la catégorie cibles humaines.(matrice 13)

$V_H^{tox}$	Isan	Ieco	Ipsy
Isan	1		
Ieco		1	
Ipsy			1

Hiérarchisation de l'importance des 3 types d'impacts générés par une **pollution liquide** pour la catégorie cibles humaines.(matrice 17)

$V_H^{poll}$	Isan	Ieco	Ipsy
Isan	1		
Ieco		1	
Ipsy			1

2eme Phase : hiérarchisation des alternatives en fonction de chaque critère de caractérisation

Détermination de la sensibilité des cibles humaines (H1 à H4) en considérant un impact sanitaire généré par une **surpression**.(matrice 6)

$V_H^{surp,san}$	H1	H2	H3	H4
H1	1			
H2		1		
H3			1	
H4				1

Détermination de la sensibilité des cibles humaines (H1 à H4) en considérant un impact sanitaire généré par un **flux thermique**.(matrice 10)

$V_H^{ft,san}$	H1	H2	H3	H4
H1	1			
H2		1		
H3			1	
H4				1

Détermination de la sensibilité des cibles humaines (H1 à H4) en considérant un impact sanitaire généré par une **toxicité**.(matrice 14)

$V_H^{tox,san}$	H1	H2	H3	H4
H1	1			
H2		1		
H3			1	
H4				1

Détermination de la sensibilité des cibles humaines (H1 à H4) en considérant un impact sanitaire généré par une **pollution liquide**.(matrice 18)

$V_H^{poll,san}$	H1	H2	H3	H4
H1	1			
H2		1		
H3			1	
H4				1

Détermination de la sensibilité des cibles humaines (H1 à H4) en considérant un impact économique généré par une **surpression**.(matrice 7)

$V_H^{surp,eco}$	H1	H2	H3	H4
H1	1			
H2		1		
H3			1	
H4				1

Détermination de la sensibilité des cibles humaines (H1 à H4) en considérant un impact économique généré par un **flux thermique**.(matrice 11)

$V_H^{ft,eco}$	H1	H2	H3	H4
H1	1			
H2		1		
H3			1	
H4				1

Détermination de la sensibilité des cibles humaines (H1 à H4) en considérant un impact économique généré par une **toxicité**.(matrice 15)

$V_H^{tox,eco}$	H1	H2	H3	H4
H1	1			
H2		1		
H3			1	
H4				1

Détermination de la sensibilité des cibles humaines (H1 à H4) en considérant un impact économique généré par une **pollution liquide**.(matrice 19)

$V_H^{poll,eco}$	H1	H2	H3	H4
H1	1			
H2		1		
H3			1	
H4				1

Détermination de la sensibilité des cibles humaines (H1 à H4) en considérant un impact psychologique généré par une **surpression**.(matrice 8)

$V_H^{surp,psy}$	H1	H2	H3	H4
H1	1			
H2		1		
H3			1	
H4				1

Détermination de la sensibilité des cibles humaines (H1 à H4) en considérant un impact psychologique généré par un **flux thermique**.(matrice 12)

$V_H^{ft,psy}$	H1	H2	H3	H4
H1	1			
H2		1		
H3			1	
H4				1

Détermination de la sensibilité des cibles humaines (H1 à H4) en considérant un impact psychologique généré par une **toxicité**.(matrice 16)

$V_H^{tox,psy}$	H1	H2	H3	H4
H1	1			
H2		1		
H3			1	
H4				1

Détermination de la sensibilité des cibles humaines (H1 à H4) en considérant un impact psychologique généré par une **pollution liquide**.(matrice 20)

$V_H^{poll,psy}$	H1	H2	H3	H4
H1	1			
H2		1		
H3			1	
H4				1

### Détermination de la vulnérabilité environnementale pour un effet physique i.

**Objectif :**

Détermination de la sensibilité des cibles environnementales (E1 à E4) face à un effet physique donné (surpression, flux thermique, toxicité, pollution liquide)

1ere Phase : hiérarchisation des critères de caractérisation

Hiérarchisation de l'importance des 3 types d'impacts générés par une **surpression** pour la catégorie cibles environnementales.(matrice 21)

$V_E^{surp}$	Isan	Ieco	Ipsy
Isan	1		
Ieco		1	
Ipsy			1

Hiérarchisation de l'importance des 3 types d'impacts générés par un **flux thermique** pour la catégorie cibles environnementales.(matrice 25)

$V_E^{ft}$	Isan	Ieco	Ipsy
Isan	1		
Ieco		1	
Ipsy			1

Hiérarchisation de l'importance des 3 types d'impacts générés par une **toxicité** pour la catégorie cibles environnementales.(matrice 29)

$V_E^{tox}$	Isan	Ieco	Ipsy
Isan	1		
Ieco		1	
Ipsy			1

Hiérarchisation de l'importance des 3 types d'impacts générés par une **pollution liquide** pour la catégorie cibles environnementales.(matrice 33)

$V_E^{poll}$	Isan	Ieco	Ipsy
Isan	1		
Ieco		1	
Ipsy			1

2eme Phase : hiérarchisation des alternatives en fonction de chaque critère de caractérisation

Détermination de la sensibilité des cibles environnementales (E1 à E4) en considérant un impact sanitaire généré par une **surpression**.(matrice 22)

$V_E^{surp,san}$	E1	E2	E3	E4
E1	1			
E2		1		
E3			1	
E4				1

Détermination de la sensibilité des cibles environnementales (E1 à E4) en considérant un impact sanitaire généré par un **flux thermique**.(matrice 26)

$V_E^{ft,san}$	E1	E2	E3	E4
E1	1			
E2		1		
E3			1	
E4				1

Détermination de la sensibilité des cibles environnementales (E1 à E4) en considérant un impact sanitaire généré par une **toxicité**.(matrice 30)

$V_E^{tox,san}$	E1	E2	E3	E4
E1	1			
E2		1		
E3			1	
E4				1

Détermination de la sensibilité des cibles environnementales (E1 à E4) en considérant un impact sanitaire généré par une **pollution liquide**.(matrice 34)

$V_E^{poll,san}$	E1	E2	E3	E4
E1	1			
E2		1		
E3			1	
E4				1

Détermination de la sensibilité des cibles environnementales (E1 à E4) en considérant un impact économique généré par une **surpression**.(matrice 23)

$V_E^{surp,eco}$	E1	E2	E3	E4
E1	1			
E2		1		
E3			1	
E4				1

Détermination de la sensibilité des cibles environnementales (E1 à E4) en considérant un impact économique généré par un **flux thermique**.(matrice 27)

$V_E^{ft,eco}$	E1	E2	E3	E4
E1	1			
E2		1		
E3			1	
E4				1

Détermination de la sensibilité des cibles environnementales (E1 à E4) en considérant un impact économique généré par une **toxicité**.(matrice 31)

$V_E^{tox,eco}$	E1	E2	E3	E4
E1	1			
E2		1		
E3			1	
E4				1

Détermination de la sensibilité des cibles environnementales (E1 à E4) en considérant un impact économique généré par une **pollution liquide**.(matrice 35)

$V_E^{poll,eco}$	E1	E2	E3	E4
E1	1			
E2		1		
E3			1	
E4				1

Détermination de la sensibilité des cibles environnementales (E1 à E4) en considérant un impact psychologique généré par une **surpression**.(matrice 24)

$V_E^{surp,psy}$	E1	E2	E3	E4
E1	1			
E2		1		
E3			1	
E4				1

Détermination de la sensibilité des cibles environnementales (E1 à E4) en considérant un impact psychologique généré par un **flux thermique**.(matrice 28)

$V_E^{ft,psy}$	E1	E2	E3	E4
E1	1			
E2		1		
E3			1	
E4				1

Détermination de la sensibilité des cibles environnementales (E1 à E4) en considérant un impact psychologique généré par une **toxicité**.(matrice 32)

$V_E^{tox,psy}$	E1	E2	E3	E4
E1	1			
E2		1		
E3			1	
E4				1

Détermination de la sensibilité des cibles environnementales (E1 à E4) en considérant un impact psychologique généré par une **pollution liquide**.(matrice 36)

$V_E^{poll,psy}$	E1	E2	E3	E4
E1	1			
E2		1		
E3			1	
E4				1

## Détermination de la vulnérabilité matérielle pour un effet physique i.

### Objectif :

Détermination de la sensibilité des cibles matérielles (M1 à M4) face à un effet physique donné (surpression, flux thermique, toxicité, pollution liquide)

1ere Phase : hiérarchisation des critères de caractérisation

Hiérarchisation de l'importance des 3 types d'impacts générés par une **surpression** pour la catégorie cibles matérielles.(matrice 37)

$V_M^{sup}$	Isan	Ieco	Ipsy
Isan	1		
Ieco		1	
Ipsy			1

Hiérarchisation de l'importance des 3 types d'impacts générés par un **flux thermique** pour la catégorie cibles matérielles.(matrice 41)

$V_M^{ft}$	Isan	Ieco	Ipsy
Isan	1		
Ieco		1	
Ipsy			1

Hiérarchisation de l'importance des 3 types d'impacts générés par une **toxicité** pour la catégorie cibles matérielles.(matrice 45)

$V_M^{tox}$	Isan	Ieco	Ipsy
Isan	1		
Ieco		1	
Ipsy			1

Hiérarchisation de l'importance des 3 types d'impacts générés par une **pollution liquide** pour la catégorie cibles matérielles.(matrice 49)

$V_M^{poll}$	Isan	Ieco	Ipsy
Isan	1		
Ieco		1	
Ipsy			1

2eme Phase : hiérarchisation des alternatives en fonction de chaque critère de caractérisation

Détermination de la sensibilité des cibles matérielles (M1 à M4) en considérant un impact sanitaire généré par une **surpression**.(matrice 38)

$V_M^{sup,sa}$	M1	M2	M3	M4
M1	1			
M2		1		
M3			1	
M4				1

Détermination de la sensibilité des cibles matérielles (M1 à M4) en considérant un impact sanitaire généré par un **flux thermique**.(matrice 42)

$V_M^{ft,sa}$	M1	M2	M3	M4
M1	1			
M2		1		
M3			1	
M4				1

Détermination de la sensibilité des cibles matérielles (M1 à M4) en considérant un impact sanitaire généré par une **toxicité**.(matrice 46)

$V_M^{tox,sa}$	M1	M2	M3	M4
M1	1			
M2		1		
M3			1	
M4				1

Détermination de la sensibilité des cibles matérielles (M1 à M4) en considérant un impact sanitaire généré par une **pollution liquide**.(matrice 50)

$V_M^{poll,sa}$	M1	M2	M3	M4
M1	1			
M2		1		
M3			1	
M4				1

Détermination de la sensibilité des cibles matérielles (M1 à M4) en considérant un impact économique généré par une **surpression**.(matrice 39)

$V_M^{sup,eco}$	M1	M2	M3	M4
M1	1			
M2		1		
M3			1	
M4				1

Détermination de la sensibilité des cibles matérielles (M1 à M4) en considérant un impact économique généré par un **flux thermique**.(matrice 43)

$V_M^{ft,eco}$	M1	M2	M3	M4
M1	1			
M2		1		
M3			1	
M4				1

Détermination de la sensibilité des cibles matérielles (M1 à M4) en considérant un impact économique généré par une **toxicité**.(matrice 47)

$V_M^{tox,eco}$	M1	M2	M3	M4
M1	1			
M2		1		
M3			1	
M4				1

Détermination de la sensibilité des cibles matérielles (M1 à M4) en considérant un impact économique généré par une **pollution liquide**.(matrice 51)

$V_M^{poll,eco}$	M1	M2	M3	M4
M1	1			
M2		1		
M3			1	
M4				1

Détermination de la sensibilité des cibles matérielles (M1 à M4) en considérant un impact psychologique généré par une **surpression**.(matrice 40)

$V_M^{sup,psy}$	M1	M2	M3	M4
M1	1			
M2		1		
M3			1	
M4				1

Détermination de la sensibilité des cibles matérielles (M1 à M4) en considérant un impact psychologique généré par un **flux thermique**.(matrice 44)

$V_M^{ft,psy}$	M1	M2	M3	M4
M1	1			
M2		1		
M3			1	
M4				1

Détermination de la sensibilité des cibles matérielles (M1 à M4) en considérant un impact psychologique généré par une **toxicité**.(matrice 48)

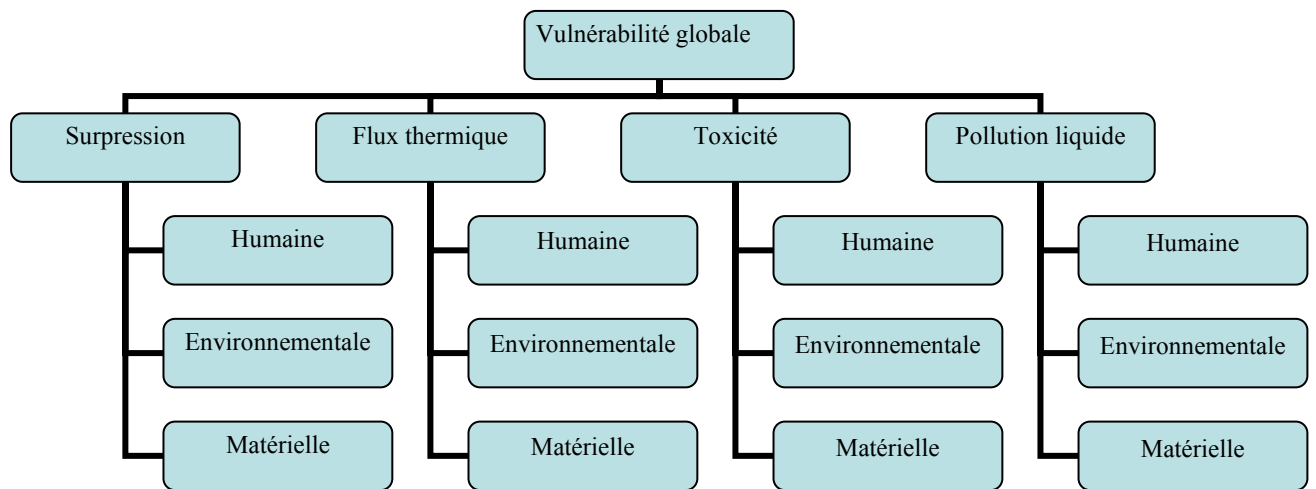
$V_M^{tox,psy}$	M1	M2	M3	M4
M1	1			
M2		1		
M3			1	
M4				1

Détermination de la sensibilité des cibles matérielles (M1 à M4) en considérant un impact psychologique généré par une **pollution liquide**.(matrice 52)

$V_M^{poll,psy}$	M1	M2	M3	M4
M1	1			
M2		1		
M3			1	
M4				1

## ***Annexe III : Structures hiérarchiques***

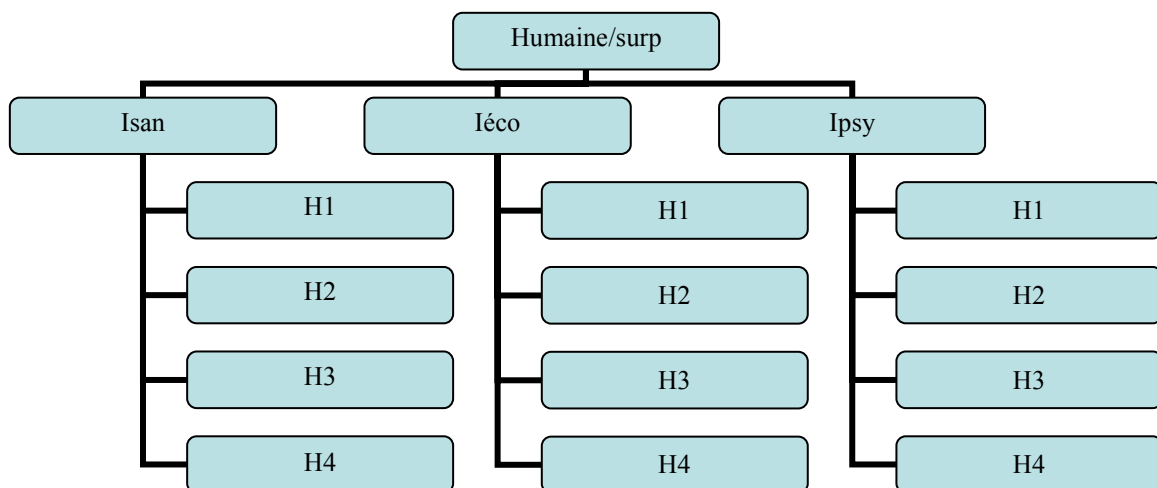
L'annexe III présente l'ensemble des structures hiérarchiques construites pour organiser les données décrivant la problématique d'établissement d'une vulnérabilité globale.



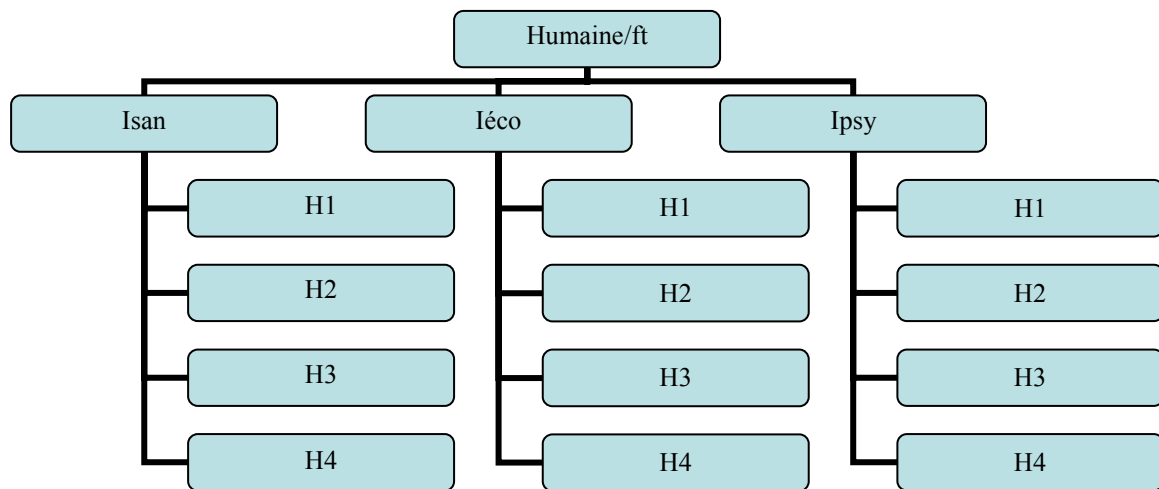
Structure hiérarchique n°1 : Vulnérabilité globale (matrices 1, 2, 3, 4)

La structure hiérarchique n°1 permet de construire la fonction de vulnérabilité globale qui dépend de la vulnérabilité humaine, environnementale et matérielle pour les critères de surpression, de flux thermique, de toxicité et de pollution liquide.

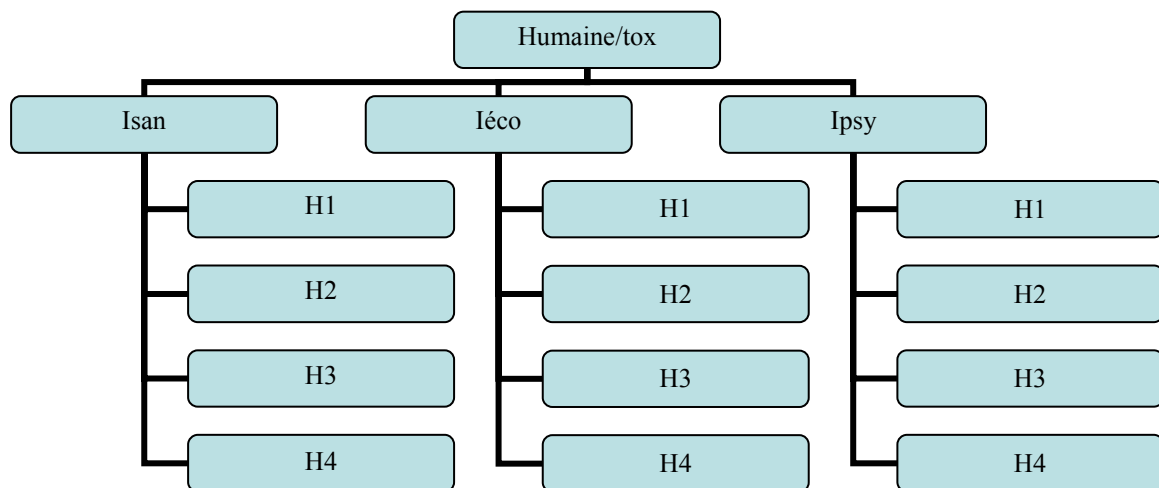
Les structures hiérarchiques 2, 3, 4 et 5 permettent d'évaluer la vulnérabilité humaine pour les cibles humaines détaillées (H1, H2, H3 et H4) en fonction des critères impact sanitaire, impact économique et impact psychologique pour chaque effet physique (surpression, flux thermique, toxicité et pollution liquide).



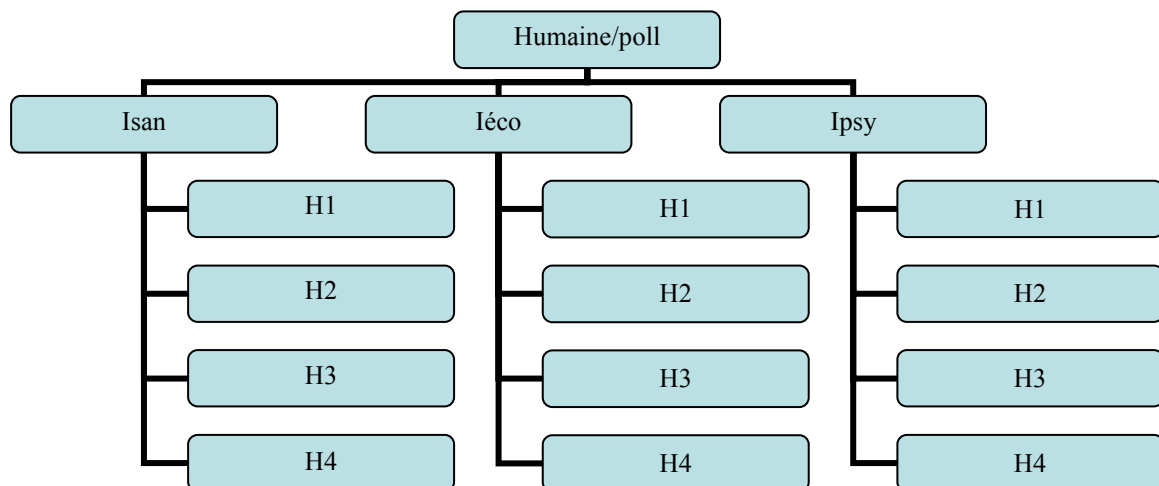
Structure hiérarchique n°2 : Vulnérabilité humaine pour un effet de surpression (surp) (matrices 5, 6, 7, 8)



Structure hiérarchique n°3 : Vulnérabilité humaine pour un effet de flux thermique (ft) (matrices 5, 6, 7, 8)

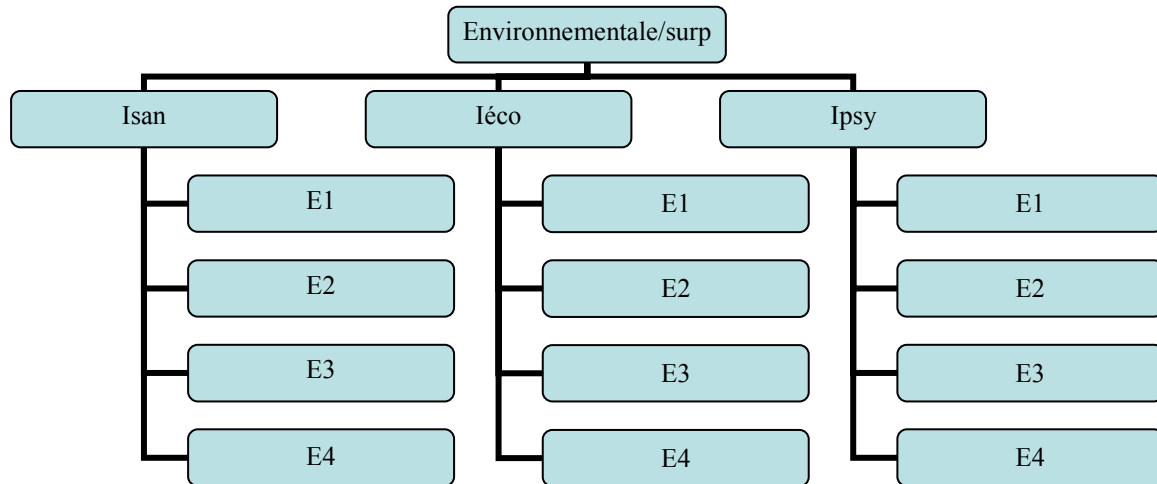


Structure hiérarchique n°4 : Vulnérabilité humaine pour un effet de toxicité (tox) (matrices 13, 14, 15, 16)

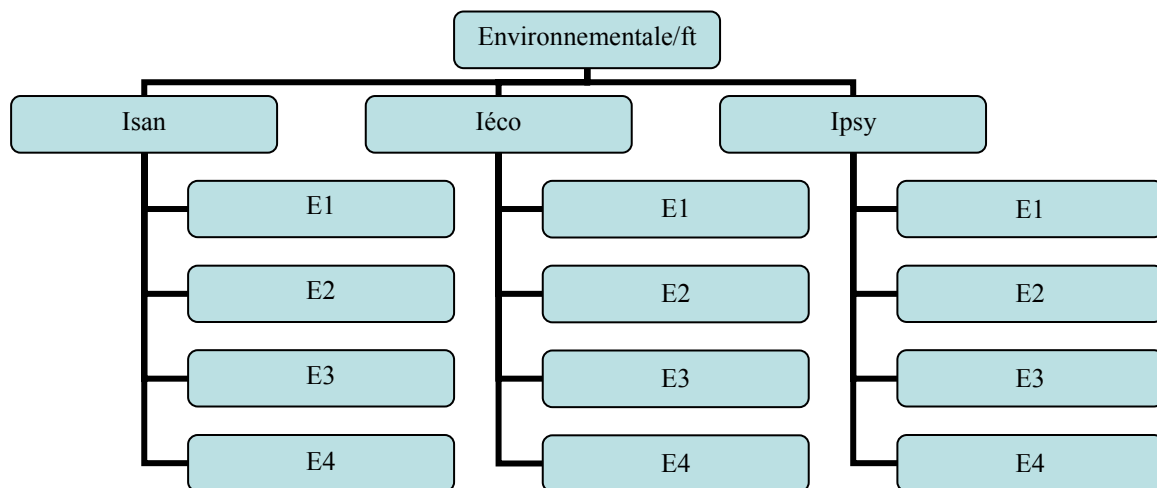


Structure hiérarchique n°5 : Vulnérabilité humaine pour un effet de pollution liquide (poll) (matrices 17, 18, 19, 20)

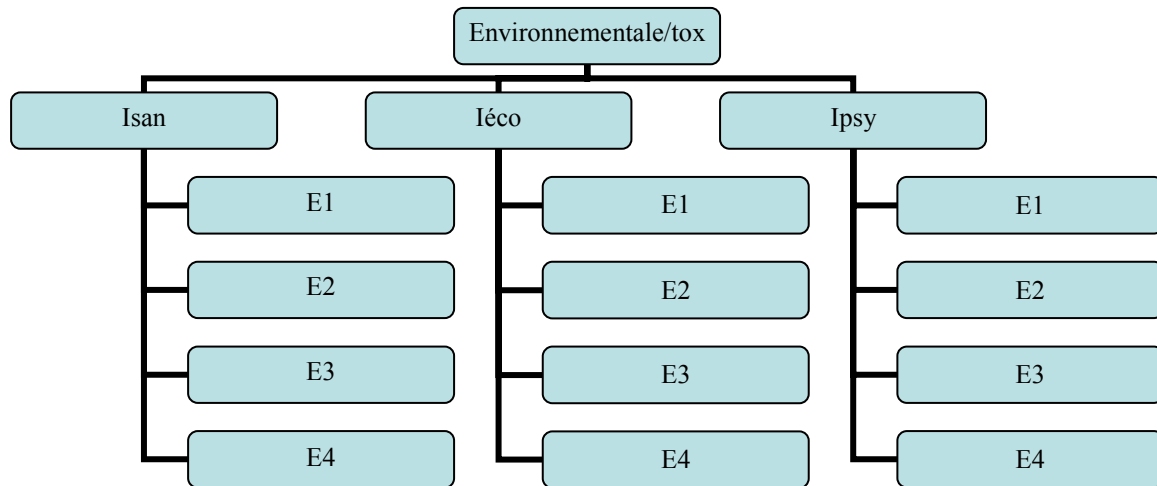
Les structures hiérarchiques 6, 7, 8 et 9 permettent d'évaluer la vulnérabilité environnementale pour les cibles environnementales détaillées (E1, E2, E3 et E4) en fonction des critères impact sanitaire, impact économique et impact psychologique pour chaque effet physique (surpression, flux thermique, toxicité et pollution liquide).



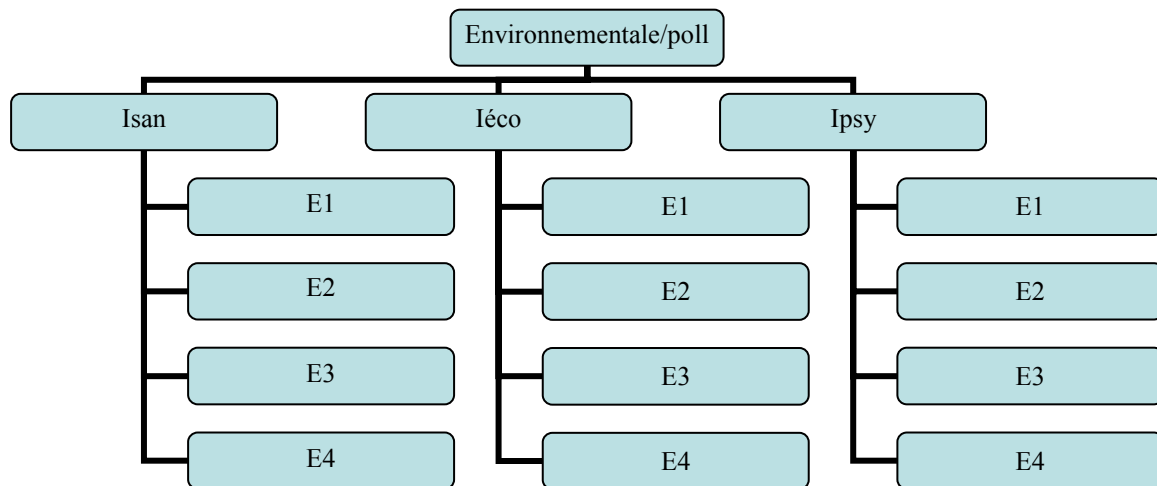
Structure hiérarchique n°6 : Vulnérabilité environnementale pour un effet de surpression (surp) (matrices 21, 22, 23, 24)



Structure hiérarchique n°7 : Vulnérabilité environnementale pour un effet de flux thermique (ft) (matrices 25, 26, 27, 28)

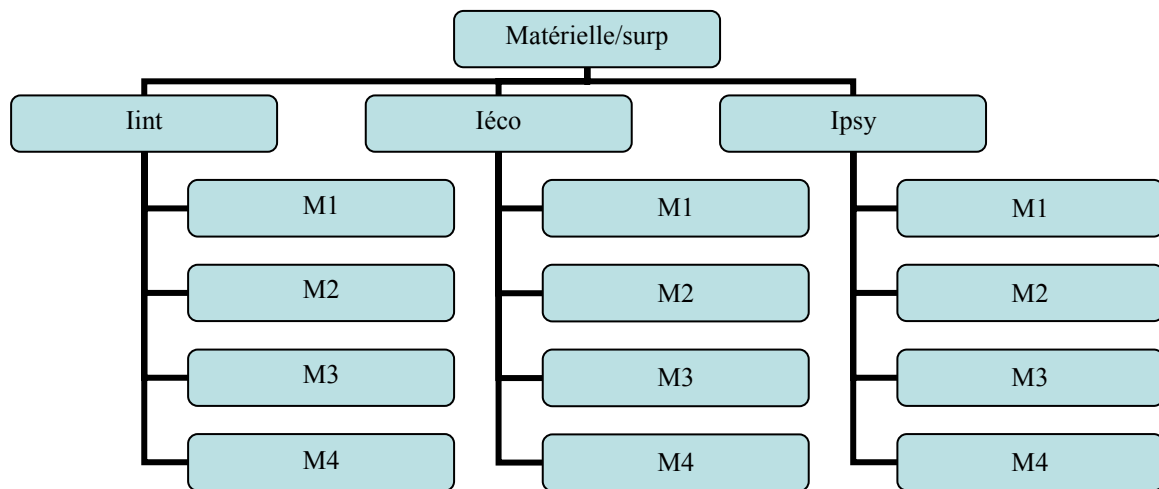


Structure hiérarchique n°8 : Vulnérabilité environnementale pour un effet de toxicité (tox) (matrices 29, 30, 31, 32)

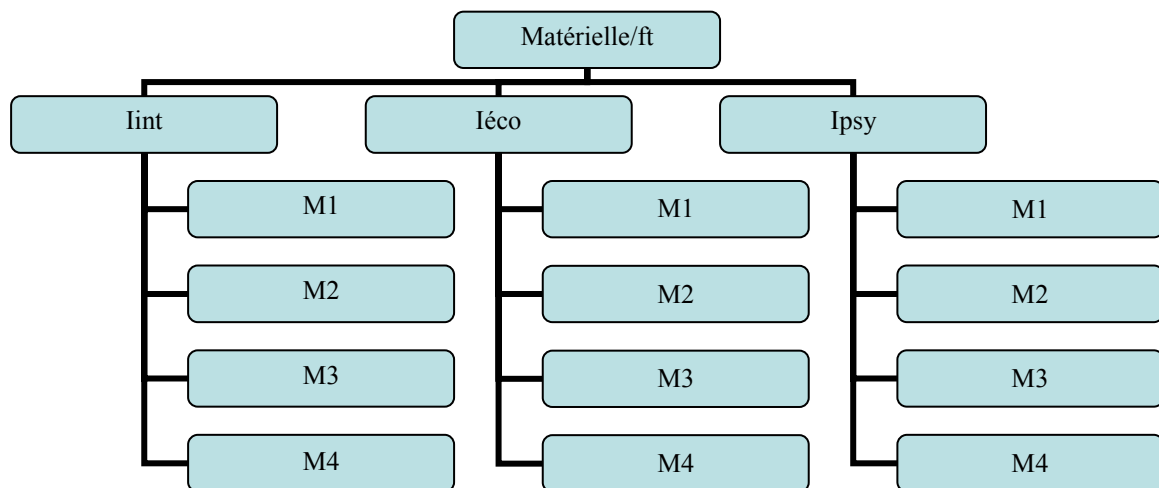


Structure hiérarchique n°9 : Vulnérabilité environnementale pour un effet de pollution liquide (poll) (matrices 33, 34, 35, 36)

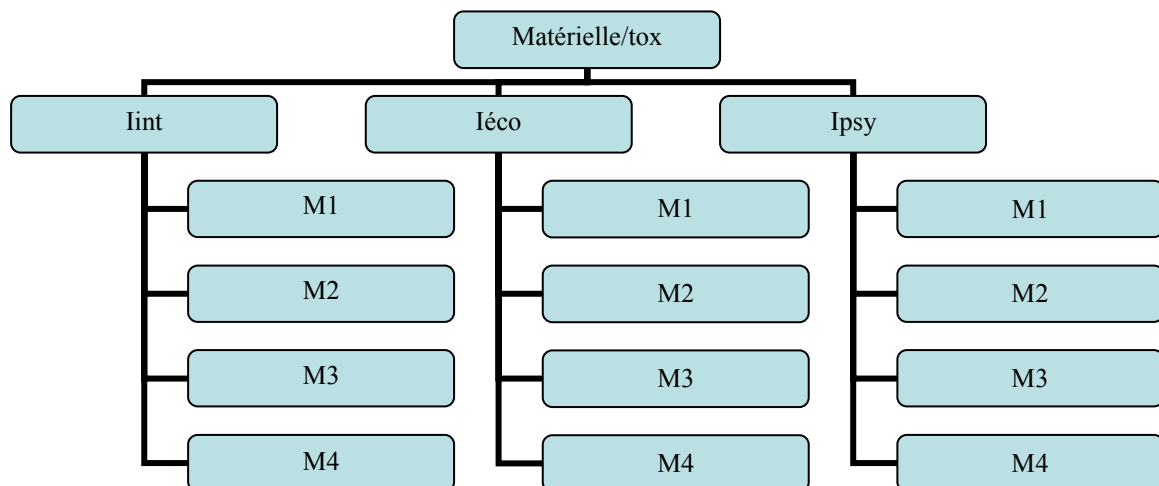
Les structures hiérarchiques 10, 11, 12 et 13 permettent d'évaluer la vulnérabilité matérielle pour les cibles matérielles détaillées (M1, M2, M3 et M4) en fonction des critères impact intégrité, impact économique et impact psychologique pour chaque effet physique (surpression, flux thermique, toxicité et pollution liquide).



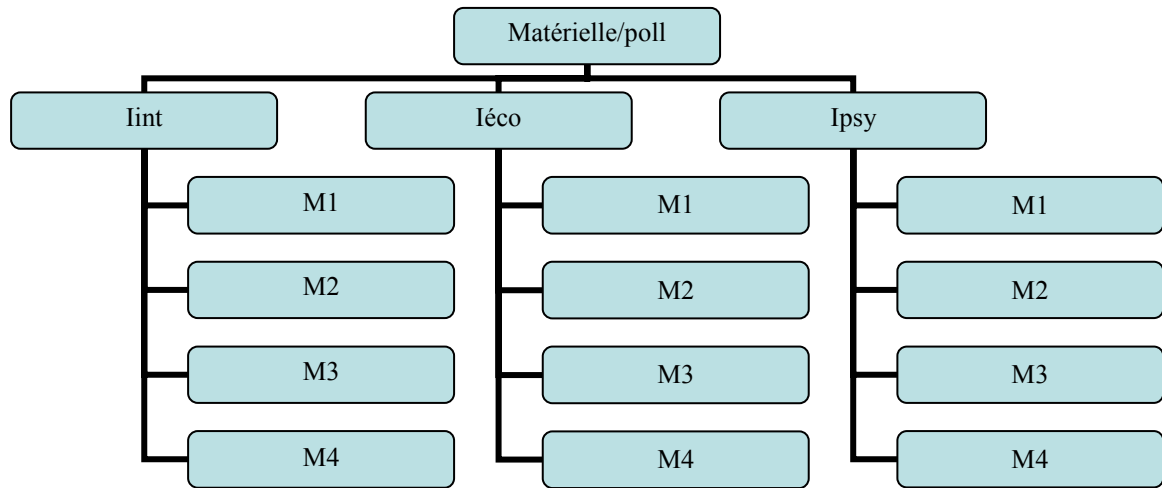
Structure hiérarchique n°10 : Vulnérabilité matérielle pour un effet de surpression (surp) (matrices 37, 38, 39, 40)



Structure hiérarchique n°11 : Vulnérabilité matérielle pour un effet de flux thermique (ft) (matrices 41, 42, 43, 44)



Structure hiérarchique n°12 : Vulnérabilité matérielle pour un effet de toxicité (tox) (matrices 45, 46, 47, 48)



Structure hiérarchique n°13 : Vulnérabilité matérielle pour un effet de pollution liquide (poll) (matrices 49, 50, 51, 52).