



ARAMIS
**Développement d'une méthode intégrée
d'analyse des risques pour la prévention
des accidents majeurs**

BCRD

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

Autorisation de programme 2001 – Convention n°2001-01 111
Rapport final

Direction des Risques Accidentels

Septembre 2004

ARAMIS

Développement d'une méthode intégrée d'analyse des risques pour la prévention des accidents majeurs

BCRD

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

Autorisation de programme 2001 – Convention n°2001-01 111
Rapport **final**

SEPTEMBRE 2004

REDACTEURS / PERSONNES AYANT PARTICIPE AU PROJET

V. DE DIANOUS, A. VALLEE, F. PRATS, N. RODRIGUES, D. HOURTOLOU

Ce document comporte 106 pages hors annexes

	Responsable Projet	Vérification	Approbation
NOM	David HOURTOLOU	O. SALVI	B. FAUCHER
Qualité	Responsable programme Direction des Risques Accidentels	Délégué scientifique Direction des Risques Accidentels	Directeur Direction des Risques Accidentels
Visa			

SOMMAIRE

Résumé	5
Glossaire	6
1. Introduction - Contexte	9
1.1 Contexte et éléments contractuels	9
1.2 Résumé des objectifs et du déroulement du projet	10
1.2.1 Objectif cadre.....	10
1.2.2 Organisation du travail de recherche	11
1.3 Présentation du présent rapport	12
2. Opération A : Identification des scénarios d'accident	13
2.1 Objectifs	13
2.2 Organismes ayant participé à l'opération	13
2.3 Principaux résultats	14
2.3.1 Etape préliminaire : définition du vocabulaire.....	15
2.3.2 Opération A-0 : Sélection des équipements critiques sur un site	16
2.3.3 Opération A-1 : Méthode MIMAH.....	19
2.3.4 Opération A-2 : Méthode MIRAS	25
2.4 Discussions et perspectives	40
3. Opération B : indice S Cartographie de la sévérité d'un site industriel	42
3.1 Objectifs	42
3.2 Organismes ayant participé à cette opération	42
3.3 Principaux résultats	42
3.3.1 Opération B-1 : Recherche bibliographique	43
3.3.2 Opération B-2 : Description des paramètres influençant l'indice S	45
3.3.3 Opération B-3 : Elaboration des cartes de sévérité finales.....	48
3.3.4 Opération B-4 : Application des cartes de sévérité dans les études de cas	50
3.4 Discussions et perspectives	51
4. Opération C : Indice M Influence du management de la sécurité	53
4.1 Objectifs	53
4.2 Organismes ayant participé à cette opération	53
4.3 Principaux résultats	53
4.3.1 Etat de l'art	54
4.3.2 Interface entre management et performance des barrières	55
4.3.3 Evaluation de l'organisation structurelle	57
4.3.4 Evaluation de la culture de l'organisation.....	61
4.3.5 La pondération des éléments du modèle	62
4.4 Discussions et perspectives	62

5. Opération D : Indice V Cartographie de la Vulnérabilité des enjeux	64
5.1 Objectifs	64
5.2 Organismes participant à cette opération	64
5.3 Principaux résultats	64
5.3.1 Opérations D-1 et D-2 : résultats méthodologiques	65
5.3.2 Opération D-2 : Interfaçage SIG	70
5.3.3 Opération D-4 : Validation par l'expérimentation	72
5.4 Discussions et perspectives	75
6. Opération E : Agregaton des résultats et tests sur le terrain	77
6.1 Objectifs	77
6.2 Principaux résultats	77
6.2.1 Forme finale des résultats issus d'ARAMIS	77
6.2.2 Etudes de cas	78
6.3 Discussions et perspectives	78
7. Opérations F, G : Valorisation des resultats et organisation d'un comité de suivi	80
7.1 Objectifs	80
7.2 Principaux résultats	80
7.2.1 Opération F	80
7.2.2 Opération G	80
8. Liste des principales publications.....	83
8.1 Journaux spécialisés.....	83
8.2 Conférences, congrès	83
9. Bibliographie	86
9.1 Opération A	86
9.1.1 Méthode MIMAH	86
9.1.2 Barrières de sécurité.....	87
9.2 Opération B.....	88
9.2.1 Indices de risque	88
9.2.2 Terme source	90
9.2.3 Dispersion atmosphérique.....	92
9.2.4 BLEVE – Boule de feu	96
9.2.5 Incendie et explosion (gaz, poussières, solides).....	99
9.2.6 Boil-over	101
9.3 Opération C	101
9.4 Opération D	103
10. Liste des Annexes	105

RESUME

ARAMIS¹ a pour objectif de développer une nouvelle méthode d'évaluation des risques majeurs qui sache intégrer les forces des différentes approches existantes au niveau européen – de culture déterministe ou probabiliste. Le projet s'inscrit dans le cadre de la directive européenne Seveso II. En cela, la méthode développée doit aussi servir d'outil de promotion dans l'industrie chimique et auprès des autorités compétentes, pour contribuer à l'harmonisation des pratiques européennes et faciliter l'application des grands principes de la réglementation ICPE² dans les établissements français.

L'étude des dangers ou « rapport de sécurité » est devenu le document réglementaire clé dans la gestion des établissements dangereux et la communication sur les risques majeurs. Les principes directeurs régissant son élaboration sont doubles :

- L'exploitant doit démontrer que tous les risques sur son site ont été identifiés et sont effectivement maîtrisés. Cette première condition permet de délivrer les autorisations d'exploiter et de communiquer auprès de la population locale.
- L'exploitant doit fournir par son étude, toutes les informations nécessaires à l'élaboration des plans de maîtrise de l'urbanisation et des plans d'urgence.

Pour une démonstration plus explicite de la maîtrise des risques, ARAMIS a choisi de s'orienter vers une approche par barrières. Il s'agit d'identifier tous les scénarios d'accidents majeurs envisageables puis de recenser les dispositions de sécurité ou barrières s'opposant au développement de l'accident. L'acceptabilité des risques réside ensuite dans le choix du nombre et de la performance des barrières à installer pour considérer les risques maîtrisés. L'organisation humaine assure le maintien dans le temps de la qualité des barrières. A cet égard, cette dernière doit aussi être évaluée à travers un indice M qui reflète le degré de confiance fait au système humain pour garantir la fiabilité et la disponibilité des barrières.

S'agissant de plans d'urgence ou de maîtrise de l'urbanisation, hormis les enjeux politiques ou sociétaux, on constate que la représentation actuelle des risques ne permet pas aux décideurs d'avoir une vision d'ensemble des problèmes ni des alternatives envisageables. ARAMIS cherche donc à valoriser sur ce point les outils de cartographie actuels, et notamment les SIG³. L'idée forte est ainsi de dissocier le potentiel de danger inhérent au site industriel de la sensibilité de son environnement impacté, dans la représentation même des conséquences d'un accident majeur. La recherche propose donc l'élaboration d'une carte de vulnérabilité indépendante mais superposable à une carte de sévérité des scénarios retenus.

ARAMIS est un projet européen financé en partie dans le 5^{ème} PCRD, dont l'INERIS est le coordinateur technique, administratif et financier. Sa participation est cofinancée au titre d'un BCRD et d'un abondement de l'ADEME. Ce dernier financement est essentiellement consacré à la valorisation et à la dissémination des résultats des travaux en France.

Le présent document constitue le rapport final du projet au titre du BCRD, pour la période échue entre août 2001 et septembre 2004. Ce rapport présente les développements théoriques du projet, les principaux résultats obtenus qui sont également discutés et tâche de faire ressortir des pistes potentielles d'approfondissement ou de nouveaux axes de recherche.

¹ Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the framework of Seveso II Directive

² Installations Classées pour la Protection de l'Environnement

³ Système d'Information Géographique

GLOSSAIRE

Accident majeur : (*Article 2 de l'arrêté du 10 mai 2000*) un événement tel qu'une émission, un incendie ou une explosion d'importance majeure résultant de développements incontrôlés survenus au cours de l'exploitation, entraînant pour la santé humaine ou pour l'environnement, à l'intérieur ou à l'extérieur de l'établissement, un danger grave, immédiat ou différé, et faisant intervenir une ou plusieurs substances ou des préparations dangereuses.

ACUTEX : Methodology to develop ACUTE EXposure threshold levels in case of chemical release. Projet Européen du 5^e programme cadre dont l'INERIS est coordinateur.

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

ARAMIS : Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the context of the Seveso II Directive. Projet européen du 5^e programme cadre dont la participation de l'INERIS, coordinateur, est cofinancée par le présent BCRD.

Barrière organisationnelle de sécurité / de défense : une barrière organisationnelle de sécurité est constituée d'une activité humaine qui s'oppose à l'enchaînement d'événements susceptible d'aboutir à un accident.

Barrière technique de sécurité / de défense : une barrière technique de sécurité est constituée d'un dispositif de sécurité ou d'un système instrumenté de sécurité qui s'oppose à l'enchaînement d'événements susceptible d'aboutir à un accident.

Barrière de sécurité / de défense : terme regroupant à la fois les barrières techniques de sécurité et les barrières organisationnelles de sécurité.
Une barrière de sécurité de prévention permet de prévenir ou de limiter l'occurrence de l'événement redouté. Une barrière de sécurité de protection permet de diminuer les conséquences de l'événement redouté.

BCRD : Budget Civil de Recherche et Développement

BLEVE : Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion ou vaporisation explosive d'un liquide surchauffé.

Élément I.P.S. : Pour être qualifié d'important pour la sécurité (IPS), un élément (opération ou équipement) doit être choisi parmi les barrières de sécurité destinées à prévenir l'occurrence ou à limiter les conséquences d'un événement redouté susceptible de conduire à un accident majeur potentiel.

Les éléments IPS sont déterminés vis-à-vis d'un scénario d'accident majeur bien défini. Pour un scénario d'accident majeur donné, il n'y a pas nécessairement unicité de l'élément IPS. Les éléments IPS ne sont pas forcément des barrières de défense ultimes.

ERP : Etablissement Recevant du Public

ESREL : European Safety and Reliability.

Etablissement : (*Article 2 de l'arrêté du 10 mai 2000*) l'ensemble des installations classées relevant d'un même exploitant et situées sur un même site au sens de l'article 12 du décret n°77-1133 du 21 septembre 1977 modifié, y compris leurs équipements et activités connexes, dès lors que l'une au moins des installations est soumise à cet arrêté.

EU-MEDIN : Europe - Mediterranean Disaster Information Network. Il s'agit d'un forum consacré essentiellement à la gestion des risques naturels, organisé à l'initiative de la commission européenne (DG Recherche).

Evénement redouté : l'événement redouté résulte de la combinaison de dérives de paramètres de fonctionnement ou de défaillances d'éléments (équipements ou actions humaines), appelés événements indésirables.

Dans l'enchaînement d'événements conduisant à un scénario d'accident majeur, l'événement redouté central constitue le moment à partir duquel la séquence d'événements devient accidentelle.

Fonction de sécurité ou IPS : rôle à remplir par une barrière de sécurité, prévue pour limiter l'occurrence ou les conséquences d'un accident identifié dans l'analyse de risques. Une fonction de sécurité peut se décomposer en sous-fonctions de sécurité liées.

Exemple : les sous-fonctions "détecter du gaz" ET "juguler une fuite", liées entre elles, réalisent la fonction de sécurité "contrôler une fuite". La sous-fonction "juguler une fuite" peut être réalisée par une vanne à fermeture automatique asservie à une chaîne de détection gaz, réalisant la sous-fonction "détecter du gaz", l'ensemble permettant de "contrôler une fuite".

HADES : HAZard Database and Effect Study. Base de données recensant les accidents majeurs ayant entraîné des effets dominos, développée par la Faculté Polytechnique de Mons pour le compte du Ministère Fédéral Belge de l'Emploi et du Travail.

ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement

INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

INSEE : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques

MARS : Major Accident Reporting System. Base de données recensant les accidents majeurs survenus en Europe et gérée par le JRC-MAHB à Ispra, Italie.

MEDD : Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

MHIDAS : Major Hazard Incident Data Service. Base de données recensant les accidents majeurs, gérée par le HSE, Grande-Bretagne.

MIMAH : Method for the Identification of Major Accident Hazards. Méthode pour l'identification des scénarios d'accidents majeurs, développée dans le cadre du projet ARAMIS à partir de l'approche dite en nœud papillon.

MIRAS : Method for the Identification of Reference Accident Scenarios. Méthode pour l'identification des scénarios de référence, développée dans le cadre de l'opération A du projet ARAMIS à partir des résultats issus de l'opération C.

Politique de Prévention des Accidents Majeurs (PPAM) : (*Article 2 de l'arrêté du 10 mai 2000*) La politique mise en place par l'exploitant sur la base des accidents envisagés dans l'étude de dangers définie à l'article 3-5 du décret n°77-1133 du 21 septembre 1977 modifié, en vue de prévenir les accidents majeurs et de limiter leurs conséquences pour l'homme et l'environnement.

Scénario d'accident majeur : Dans une démarche d'analyse de risques, un scénario d'accident majeur peut être défini comme l'enchaînement d'événements indésirables, aboutissant à un événement redouté, conduisant lui-même à des conséquences lourdes ou effets majeurs.

SEI : Service de l'Environnement Industriel, Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

SIG : Système d'Information Géographique

Système de gestion de la sécurité (SGS) : (*Article 2 de l'arrêté du 10 mai 2000*) l'exploitant met en place dans l'établissement un système de gestion de la sécurité applicable à toutes les installations susceptibles de générer des accidents majeurs. Le système de gestion de la sécurité définit l'organisation, les fonctions des personnels, les procédures et les ressources qui permettent de déterminer et de mettre en œuvre la PPAM.

1. INTRODUCTION - CONTEXTE

1.1 CONTEXTE ET ELEMENTS CONTRACTUELS

Un rapide tour d'horizon des différents pays de l'Union européenne montre une certaine disparité des approches utilisées pour la prévention des accidents majeurs. Toutefois, cette apparente hétérogénéité peut tout à fait constituer un atout majeur dans l'amélioration globale de l'identification, de l'évaluation et in fine de la maîtrise des risques industriels d'origine accidentelle. Ce constat, se fondant sur le principe que chacun a à apprendre de ses voisins, a motivé le désir de plusieurs experts européens de joindre leurs efforts en vue de développer une méthodologie intégrée d'évaluation du risque.

Aussi l'INERIS a lancé depuis 1999 un programme de recherche et développement sur le thème de l'Analyse des Risques. Ce programme est conçu dans le contexte de l'application de la directive européenne 96/82/CE du Conseil du 9 décembre 1996 dite SEVESO II, concernant la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses. Son objectif est d'améliorer les méthodes existantes d'analyse et d'évaluation des risques puis de développer à terme des outils spécifiques destinés en particulier à l'Inspection des Installations Classées.

Autour de ces objectifs mais dans un champ plus exploratoire, l'INERIS a également proposé un projet européen dans le 5^{ème} PCRD de la Commission Européenne, en partenariat avec quatorze autres organismes européens. Ce projet est intitulé ARAMIS, « Accidental Risk Assessment Methodology for IndustrieS in the framework of the Seveso II directive ». Le financement de la Commission a été obtenu en décembre 2001 par contrat n°EVG1-CT-2001-00036 et les travaux de recherche ont débuté en janvier 2002. L'INERIS est coordinateur technique et financier du projet.

Les partenaires du projet ARAMIS sont :

- European Commission - Joint Research Centre - Institute for the Protection and Security of the Citizen – Major Accident Hazard Bureau, Italie
- Faculté Polytechnique de Mons - Major Risk Research Center, Belgique
- Universitat Politecnica de Catalunya - CERTEC, Espagne
- Association pour la Recherche et le Développement des Méthodes et Processus Industriels (ARMINES), et plus précisément trois laboratoires des écoles de Mines d'Alès, Paris et Saint-Etienne, France
- Risø National Laboratory - System Analysis Department, Danemark
- Università di Roma - Dipartimento Ingegneria Chimica, Italie
- Central Mining Institute - Safety Management and Technical Hazards, Pologne
- Delft University of Technology - Safety Science Group, Pays-Bas
- Institution of Chemical Engineers - European Process Safety Centre, Royaume-Uni
- Institut Jozef Stefan, Slovénie
- Technical University of Ostrava, République Tchèque.

Les deux derniers organismes ont rejoint le consortium en 2003 (avenant au contrat européen accepté par la commission européenne en octobre 2002).

La recherche financée au titre du BCRD intitulée ARAMIS : Développement d'une méthode intégrée d'analyse des risques pour la prévention des accidents majeurs, concerne ce même projet européen. Le financement la recherche au titre du BCRD permet de couvrir la part des dépenses de l'INERIS non prise en charge par la Commission européenne, soit environ 50% des dépenses de l'institut par convention n°2001-01111 notifiée le 8 août 2001.

En outre, l'ADEME apporte un abondement à l'INERIS sur ce projet dans le cadre de la convention n°01 94 024 notifiée le 8 février 2002. Ce financement sera essentiellement consacré à la dissémination des résultats des travaux en France.

1.2 RESUME DES OBJECTIFS ET DU DEROULEMENT DU PROJET

1.2.1 Objectif cadre

De manière générale, le projet de recherche ARAMIS vise à améliorer les démarches d'analyse et de maîtrise (gestion) des risques d'installations industrielles susceptibles d'être le siège d'accidents majeurs. Il se fonde sur un principe de gestion selon lequel « *vous ne pouvez pas gérer si vous ne pouvez pas mesurer* ».

L'objectif de cette recherche est de développer une nouvelle méthode qui permettra d'évaluer le niveau de risque d'une installation industrielle en tenant compte des mesures de sécurité destinées à prévenir les risques d'accidents majeurs. La méthodologie proposée favorisera l'application de la directive Seveso II. Le projet est bâti pour aboutir à la composition d'un indice intégré de risque, basé sur la définition de scénarios de référence et combinant 3 indices construits indépendamment :

- L'évaluation des effets potentiels des scénarios d'accident,
- L'évaluation de l'efficacité du système de management de la sécurité, réduisant la probabilité d'occurrence des accidents majeurs potentiels,
- L'estimation de la vulnérabilité de l'environnement susceptible d'être affecté par des accidents.

Il est prévu de valider la méthodologie par des études de cas. Tout au long du projet, les résultats intermédiaires sont transmis aux autorités compétentes en charge du contrôle de la prévention des accidents majeurs. Les développements du projet sont examinés périodiquement par un Comité de Suivi regroupant des experts en risques de l'industrie, des pouvoirs publics. Ce suivi par des utilisateurs finaux permet également de favoriser l'adoption de la démarche développée.

A son terme, ce projet aboutira à un outil, harmonisé au niveau européen, utilisé par les experts de la gestion du risque industriel (aussi bien par l'industrie elle-même que par les autorités de contrôle). Par conséquent, la méthodologie ARAMIS tient compte des différentes cultures d'évaluation du risque industriel et tire profit des travaux déjà réalisés en approfondissant les points suivants :

- L'évaluation de la sévérité des effets potentiels des scénarios d'accident, intégrant les zones d'effets concernées par les phénomènes, leur cinétique et leur potentiel à produire des effets domino,
- L'évaluation des mesures de prévention organisationnelles (passer de l'évaluation du système formel à l'évaluation des pratiques informelles),
- L'évaluation de la vulnérabilité de l'environnement des sites industriels en décrivant la sensibilité des cibles potentielles placées aux alentours des établissements.

1.2.2 Organisation du travail de recherche

Afin de développer cette nouvelle méthode intégrée d'évaluation des risques, il est proposé d'adopter la démarche suivante :

- Etablir une méthode d'identification des scénarios d'accident majeur de référence ;
- Composer un indice intégré du risque, à partir de la sévérité estimée des effets potentiels (indice S), de l'efficacité évaluée du système de management de la sécurité (indice M) et de la vulnérabilité de l'environnement d'un site (indice V).

L'originalité de l'approche proposée réside essentiellement dans l'intégration de ces 3 facteurs pour caractériser le risque et doit donc aboutir à une nouvelle représentation du risque majeur. Le projet est ainsi organisé en sept opérations :

- **Opération A** : Identification et sélection des scénarios d'accidents majeurs ;
- **Opération B** : Evaluation de la sévérité des effets potentiels des accidents ;
- **Opération C** : Evaluation de la performance de l'organisation de la sécurité ;
- **Opération D** : Caractérisation de la vulnérabilité de l'environnement (au sens large des cibles potentiellement affectées par un accident majeur) ;
- **Opération E** : Agrégation des résultats et études de cas sur le terrain ;
- **Opération F** : Valorisation et dissémination des résultats ;
- **Opération G** : Organisation du Comité de Suivi.

Les 4 premières opérations ont démarré avec le début du projet pour aboutir au bout de deux ans à une première version de la démarche prête à être testée dans cinq établissements SEVESO à travers l'Europe. L'opération E constitue la phase de test et d'intégration du retour d'expérience issu de ces cas de terrain.

Les opérations F et G sont destinées à promouvoir les résultats développés tout au long du projet et à s'assurer de leur applicabilité par la mise en place d'un comité de suivi.

1.3 PRESENTATION DU PRESENT RAPPORT

Le présent rapport constitue le rapport final du projet ARAMIS dans le cadre du financement BCRD – convention n°2001 – 01111 pour la période échue entre AOÛT 2001 et SEPTEMBRE 2004. Il fait suite aux deux premiers rapports intermédiaires édités respectivement en août 2002 et août 2003.

Opération par opération, ce document rappelle donc les principaux objectifs poursuivis, l'organisation spécifique de chaque opération pour y parvenir et enfin l'état actuel d'avancement et les premiers résultats déjà communicables. Les actions de valorisation et l'ensemble des communications issues de la recherche sont rassemblées spécifiquement dans le chapitre 8.

Notons pour résumer l'organisation du projet, que l'ensemble des développements théoriques doit être terminé à la fin de l'année 2003, et que l'année 2004 est dévolue à la réalisation des cas de terrain afin de tester et valider l'applicabilité de la méthode.

L'opération 0 (Work Package 0) planifiée également sur le diagramme Gantt concerne le management général du projet. Il s'agit d'assurer la coordination administrative et financière, ainsi que de produire périodiquement les rapports d'avancement techniques. Cette opération n'est pas décrite précisément dans le cadre de ce rapport.

Sont joints en annexes les documents suivants :

- **Annexe 1** : Protocoles d'audit développés pour évaluer la structure de management d'une organisation sécurité
- **Annexe 2** : Questionnaire de culture sécurité développé pour recueillir les pratiques réelles et informelles d'une organisation sécurité.
- **Annexe 3** : Questionnaire type utilisé pour collecter les avis d'experts dans l'évaluation des priorités en terme de vulnérabilité de l'environnement.

2. OPERATION A : IDENTIFICATION DES SCENARIOS D'ACCIDENT

2.1 OBJECTIFS

La définition des scénarios d'accidents constitue une étape-clef de l'évaluation des risques. Ils décrivent les enchaînements d'évènements susceptibles de conduire à l'apparition de dommages significatifs dans l'environnement. C'est donc à partir de ces scénarios qu'il est possible d'estimer les conséquences d'un accident éventuel, d'évaluer le niveau nécessaire de performances des mesures de sécurité et de juger in fine de l'acceptabilité des risques.

Le principal objectif de cette opération A est de construire **une méthode systématique** d'identification des **scénarios de référence** prenant en compte les spécificités des installations et le niveau de maîtrise propre à chaque site. Pour l'orientation de travail, il est important de garder en mémoire les points suivants :

- Il ne s'agit pas d'appliquer une approche forfaitaire remplaçant une démarche d'analyse des risques menée sur le terrain en groupe de travail. La méthode développée pourra servir en revanche d'outil d'aide à la décision tout au long du processus d'analyse des risques.
- L'objectif final n'est pas de déterminer les scénarios les plus catastrophiques pouvant survenir sur un site industriel. Il s'agit d'examiner les différents scénarios d'accidents (dont les plus catastrophiques) afin de dégager les scénarios paraissant les plus « représentatifs » du risque au regard des spécificités des installations.

Dans cette démarche, les scénarios sont définis en fonction des performances du site en matière de maîtrise des risques et servent ensuite à l'évaluation de la sévérité des accidents.

Les liens avec les autres opérations sont les suivants :

- L'identification des scénarios passe d'abord par l'évaluation de la performance des barrières sur site. L'opération C complète cette évaluation par la prise en compte du management et de la culture sécurité du site comme un mode commun de défaillance des barrières. Les conclusions des audits du management et de la culture sécurité viennent éventuellement modifier les évaluations initiales des barrières.
- Les scénarios identifiés comme scénarios de référence servent ensuite au calcul et à la cartographie des indices de sévérité tels que décrits dans l'opération B.
- La cartographie de la sévérité liée aux « scénarios de référence » est finalement à comparer aux cartographies de la vulnérabilité de l'environnement d'un site. Cette cartographie indépendante fait l'objet de l'opération D.

2.2 ORGANISMES AYANT PARTICIPE A L'OPERATION

<i>Organisation</i>	<i>Tâches réalisées</i>
Faculté Polytechnique de Mons Major Risk Research Centre (Belgique)	Responsable de l'opération A et notamment du développement des méthodes MIMAH et MIRAS
Ecole des Mines de Saint-Etienne Laboratoire SITE	Responsable du développement des arbres de défaillance dans la méthode MIMAH
INERIS	Coordination de l'opération et responsable de la méthode d'évaluation de la performance des barrières

2.3 PRINCIPAUX RESULTATS

Les travaux décrits dans ce paragraphe sont un résumé des trois livrables disponibles en anglais sur ce sujet dans le projet ARAMIS, et dont le dernier livrable « D.1.C - Scenario Identification (juillet 2004) » met à jour et complète les éléments des deux précédents livrables D.1.A (juillet 2003) et D.1.B (janvier 2004).

L'opération A était structurée suivant les quatre étapes suivantes. Elle est aujourd'hui achevée et tient compte des études de cas réalisées dans cinq pays différents (opération E) qui ont permis d'ajuster certains éléments de la méthode.

- ***Etape préliminaire : Définition du vocabulaire***

Il s'agit de définir les principaux termes et notions utilisés de façon récurrente dans l'opération. Cette étape est essentielle dans le cadre d'un programme où plusieurs partenaires européens de différentes disciplines travaillent en commun.

- ***Opération A-0 : Sélection des équipements critiques sur un site***

La démarche ARAMIS est fondée sur la définition de scénarios d'accidents sur un site. Le premier point consiste à identifier les équipements pouvant conduire à des scénarios significatifs. Cette étape a été développée au deuxième semestre 2003.

- ***Opération A-1 : Méthode pour l'identification systématique des scénarios d'accidents (MIMAH : Methodology For the Identification of Major Accident Hazards)***

La méthode MIMAH a pour objectif d'aider à une identification la plus exhaustive possible des accidents qui pourraient survenir sur un site. Pour ce faire, elle considère de façon systématique, pour chacun des équipements précédemment identifiés, l'ensemble des événements physiquement envisageables en négligeant l'action d'éventuelles barrières de sécurité. L'objectif est d'abord de définir un ensemble complet de scénarios parmi lesquels les plus catastrophiques.

MIMAH est fondée sur l'élaboration de diagrammes en nœud papillon. A chaque équipement est associé un ensemble d'événements redoutés centraux (ERC). Pour chaque ERC, un arbre des causes est élaboré, puis un arbre des événements.

L'élaboration des arbres des causes et d'événements a fait l'objet d'une comparaison avec l'analyse des accidents passés disponibles dans les bases de données MARS, HADES et MHIDAS, pour en vérifier la pertinence et l'exhaustivité.

- ***Opération A-2 : Méthode pour la définition des scénarios de référence***

- ***(MIRAS : Methodology For the Identification of Reference Accident Scenarios)***

Cette dernière étape identifie parmi les scénarios potentiels définis par MIMAH, les scénarios de référence qui feront l'objet d'une modélisation de leurs sévérités. Il s'agit ici de créer un outil d'aide au choix de ces scénarios qui sont essentiels pour une évaluation pertinente du niveau de risque d'installations industrielles. Le choix des scénarios de référence s'appuie sur une matrice de risque qui définit des zones d'acceptabilité en fonction de la fréquence estimée des phénomènes dangereux.

La méthodologie MIRAS se décompose en trois parties :

- ***➤ Revue des barrières pour la prévention des accidents majeurs***

Pour chaque scénario identifié dans MIMAH, les barrières de sécurité techniques ou organisationnelles pouvant limiter la probabilité d'un accident ou en limiter les effets sont identifiées et leurs performances théoriques sont évaluées. Ces performances font ensuite l'objet d'une décote éventuelle en fonction des résultats de l'audit du management et culture sécurité du site. La méthode de décote des barrières fait l'objet de l'opération C.

➤ **Estimation des fréquences des ERC et des phénomènes dangereux**

Pour cette étape deux méthodes sont proposées. Soit le calcul de la fréquence de l'ERC est réalisé à partir de la classe de fréquence des événements initiateurs à laquelle sont combinées des classes de probabilité de défaillance des barrières reflétant leur performance, soit la fréquence de l'ERC est basée sur des valeurs génériques chiffrées disponibles dans plusieurs base de données.

La fréquence d'un phénomène dangereux est ensuite évaluée à partir de celle de l'ERC combinée à certaines probabilités conditionnelles telles que la probabilité d'inflammation, etc.

➤ **Choix des scénarios de référence à partir de la matrice de risques**

Les scénarios identifiés par MIMAH peuvent à ce stade être placés sur une matrice de risques, qui définit des critères d'acceptabilité en fonction d'une estimation qualitative de la gravité et la fréquence calculée des phénomènes dangereux. Leur position dans la matrice conduit à retenir ou non les scénarios comme scénarios de référence pour caractériser graphiquement le niveau de risque d'une installation.

2.3.1 Etape préliminaire : définition du vocabulaire

Un vocabulaire commun a été établi (dès juillet 2002) et le modèle du nœud papillon tel que présenté sur la figure 1 (inspiré de Bellamy, Van der Schaff, 2000) a été retenu pour décrire les scénarios d'accidents majeurs.

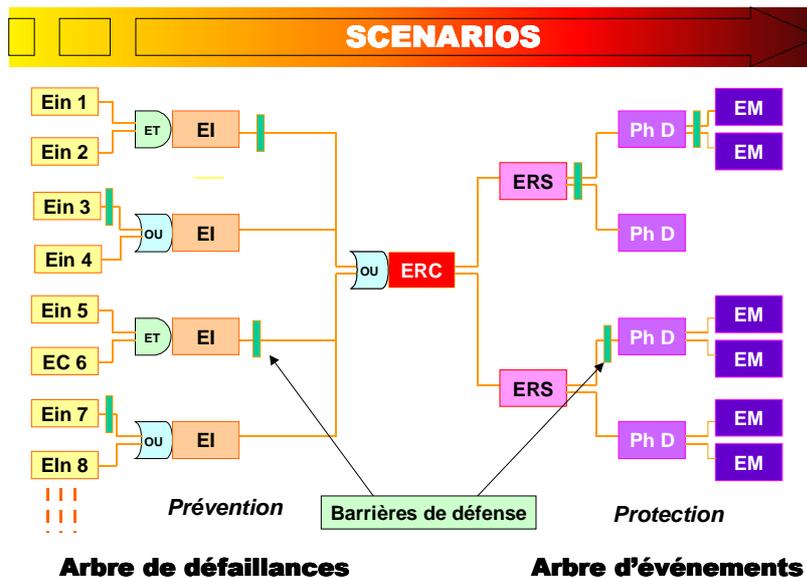


Figure 1 : Représentation d'un scénario d'accident par le modèle « Nœud Papillon »

Désignation	Signification	Définition	Exemples
Ein	Evènement Indésirable	Dérive ou défaillance sortant du cadre des conditions d'exploitation usuelles définies.	Le surremplissage ou un départ d'incendie à proximité d'un équipement dangereux peuvent être des évènements initiateurs
EC	Evènement Courant	Evènement admis survenant de façon récurrente dans la vie d'une installation.	Les actions de test, de maintenance ou la fatigue d'équipements sont généralement des évènements courants.
EI	Evènement Initiateur	Cause directe d'une perte de confinement ou d'intégrité physique.	La corrosion, l'érosion, les agressions mécaniques, une montée en pression sont généralement des évènements initiateurs

<i>Désignation</i>	<i>Signification</i>	<i>Définition</i>	<i>Exemples</i>
<i>ERC</i> <i>(EC)</i>	<i>Evènement Redouté Central</i> <i>(Le terme Evènement critique est également employé)</i>	<i>Perte de confinement sur un équipement dangereux ou perte d'intégrité physique d'une substance dangereuse</i>	<i>Rupture, Brèche, Ruine ou Décomposition d'une substance dangereuse dans le cas d'une perte d'intégrité physique</i>
<i>ERS</i>	<i>Evènement Redouté Secondaire</i>	<i>Conséquence directe de l'évènement redouté central, l'évènement redouté secondaire caractérise le terme source de l'accident</i>	<i>Formation d'une flaque ou d'un nuage lors d'un rejet d'une substance diphasique</i>
<i>Ph D</i>	<i>Phénomène Dangereux</i>	<i>Phénomène physique pouvant engendrer des dommages majeurs</i>	<i>Incendie, Explosion, Dispersion d'un nuage toxique</i>
<i>EM</i>	<i>Effets Majeurs</i>	<i>Dommages occasionnés au niveau des cibles (personnes, environnement ou biens) par les effets d'un phénomène dangereux</i>	<i>Effets létaux ou irréversibles sur la population Synergies d'accident</i>
<i>Barrières ou Mesures de Prévention</i>		<i>Barrières ou mesures visant à prévenir la perte de confinement ou d'intégrité physique</i>	<i>Peinture anti-corrosion, Coupure automatique des opérations de dépotage sur détection d'un niveau très haut...</i>
<i>Barrières ou Mesures de Protection</i>		<i>Barrières ou mesures visant à limite les conséquences de la perte de confinement ou d'intégrité physique</i>	<i>Vannes de sectionnement automatiques asservies à une détection (gaz, pression, débit), Moyens d'intervention...</i>

Tableau 1 : Légende des évènements figurant sur le modèle du nœud papillon

2.3.2 Opération A-0 : Sélection des équipements critiques sur un site

La sélection des équipements sur un site passe naturellement par une première étape de collecte d'informations dans le but de préciser l'environnement du site, l'implantation des équipements, la nature des produits mis en jeu.

Les équipements présélectionnés sont ceux contenant des substances dangereuses ; ils sont classés selon 16 catégories. Ils sont ensuite sélectionnés s'ils contiennent une quantité suffisante de produits dangereux.

2.3.2.1 Identification des produits dangereux

Les produits dangereux sont classés selon la typologie précisée dans le tableau ci-après, conformément à la directive Seveso 2. Au terme d'une première analyse, une liste complète des équipements dangereux est donc retenue en fonction de la nature des produits, de leur phase, des phrases de risques associées.

Tableau 2 : typologie des substances dangereuses

Catégorie	Phrases de risques	
Très toxiques	R26 R100 ⁽³⁾	Très toxique par inhalation Emet des vapeurs très toxique en cas de feu (*)
Toxique	R23 R101 ⁽³⁾	Toxique par inhalation Emet des vapeurs toxique en cas de feu (*)
Oxydant	R7 R8 R9	Peut provoquer un incendie (peroxyde organique) Favorise l'inflammation des matières combustibles Peut exploser en mélange avec des matières combustibles

Catégorie	Phrases de risques	
Explosif	R1	Explosif à l'état sec ^(*)
	R2	Risque d'explosion par le choc, la friction, le feu ou d'autres sources d'ignition
	R3	Grand risque d'explosion par le choc, la friction, le feu ou d'autres sources d'ignition
	R4	Forme des composés métalliques très sensibles. ^(*)
	R5	Danger d'explosion sous l'action de la chaleur. ^(*)
	R6	Danger d'explosion en contact ou sans contact avec l'air. ^(*)
	R16	Peut exploser en mélange avec des substances comburantes. ^(*)
	R19	Peut former des peroxydes explosifs. ^(*)
	R44	Risque d'explosion si chauffé en ambiance combinée. ^(*)
R102 ⁽³⁾	Substance pyrotechnique	
Inflammable	R10	Inflammable
	R18	Lors de l'utilisation, formation possible de mélange vapeur / air inflammable / explosif. ^(*)
Très inflammable	R10	Inflammable (dans des conditions particulières de pression et température) ⁽¹⁾
	R11	Facilement inflammable
	R17	Spontanément inflammable à l'air
	R30	Peut devenir facilement inflammable pendant l'utilisation. ^(*)
Extrêmement inflammable	R10	Inflammable ($T > T_{eb}$) ⁽²⁾
	R11	Facilement inflammable ($T > T_{eb}$) ⁽²⁾
	R12	extrêmement inflammable
Réagit violemment avec l'eau	R14	Réagit violemment au contact de l'eau
	R15	Au contact de l'eau dégage des gaz extrêmement inflammables
	R29	Au contact de l'eau dégage des gaz toxiques
	R14/15	Réagit violemment avec l'eau, dégageant des gaz extrêmement inflammables
	R15/29	Au contact de l'eau dégage des gaz toxiques, extrêmement inflammables
Réagit violemment avec d'autres substances	R103 ⁽³⁾	Au contact d'autres substances, dégage des gaz toxiques ^(*)
	R104 ⁽³⁾	Au contact d'autres substances, dégage des gaz très toxiques ^(*)
	R105 ⁽³⁾	Au contact d'autres substances, dégage des gaz inflammables ^(*)
	R106 ⁽³⁾	Au contact d'autres substances, peut exploser ^(*)
Dangereux pour l'environnement (environnement aquatique)	R 50	Très toxique pour les organismes aquatiques: (96h CL50 (poisson) ≤ 1 mg/l ou 48h CE50 (daphné) ≤ 1 mg/l ou 72 h CL50 (algue) ≤ 1 mg/l)
	R51	Toxique pour les organismes aquatiques (96h CL50 (poisson): 1mg/l < CL50 ≤ 10 mg/l ou 48h CE50 (daphné): 1mg/l < CE50 ≤ 10 mg/l ou 72 h CL50 (algues): 1mg/l < CL50 ≤ 10 mg/l).
Dangereux pour l'environnementt (non aquatique)	R54	Toxique pour la flore. ^(*)
	R55	Toxique pour la faune. ^(*)
	R56	Toxique pour les organismes du sol. ^(*)
	R57	Toxique pour les abeilles. ^(*)
	R59	Dangereux pour la couche d'ozone. ^(*)

notes :

⁽¹⁾ Pour tenir compte de la définition "substance très inflammable" de la directive SEVESO II, les substances ayant un point éclair inférieur à 55°C et liquides sous pression, mais qui sous certaines conditions, par exemple haute température et haute pression, peuvent générer des accidents majeurs, pourront être considérées (bien que seulement R10) comme très inflammables (phrase R11), sous conditions.

⁽²⁾ Pour tenir compte de la définition "d'extrêmement inflammable" de la directive Seveso II, les substances inflammables (R10) ou très inflammables (R11) utilisées à une température supérieure à leur température d'ébullition seront considérées comme extrêmement inflammables (R12).

⁽³⁾ Certaines phrases de risques n'ont pas de numéro "officiel". Pour une utilisation plus facile dans le projet, un numéro a été créé, reconnaissable à ce qu'il est supérieur à 100.

^(*) L'astérisque indique les phrases de risques non retenues dans la directive Seveso II mais qui sont quand même retenues pour l'application de la méthode ARAMIS.

2.3.2.2 Sélection des équipements

La méthode proposée ci-dessous est décrite en annexe 2 du rapport D1C (juillet 2004). Il s'agit de la méthode utilisée par la région wallonne, appelée méthode VADE-MECUM. Pour résumer, la méthode sélectionne parmi les équipements listés, ceux qui contiennent une quantité de produits dangereux supérieure à une valeur seuil dont la valeur dépend de la nature et de la phase du produit. Puis une deuxième étape de sélection permet de retenir des équipements qui peuvent avoir des effets domino sur ceux précédemment sélectionnés.

Première étape :

Sélection des équipements contenant une quantité importante de produits dangereux

Pour définir la valeur du seuil qui sert de comparaison avec la quantité de produits dangereux, une première quantité Ma est définie en fonction des caractéristiques des produits. Celle-ci est corrigée pour les liquides dont l'évaporation conduit à une aggravation des risques.

Propriétés de la substance	Masse de référence (kg)		
	Solide	Liquide	Gaz
1 Très toxique	10.000	1.000	100
2 Toxique	100.000	10.000	1.000
3 Oxydant	10.000	10.000	10.000
4 Explosive (définition 2a annexe 1 Directive Seveso II)	10.000	10.000	---
5 Explosive (définition 2b annexe 1 Directive Seveso II)	1.000	1.000	---
6 Inflammable	---	10.000	---
7 Très Inflammable	---	10.000	---
8 Extrêmement inflammable	---	10.000	1.000
9 Dangereux pour l'environnement	100.000	10.000	1.000
10 autres classifications que celles ci-dessus impliquant des phrases de risques R14, R14/15, R29	10.000	10.000	---

Tableau 3 : Masse de référence Ma selon la nature des substances

Définition de la quantité seuil Mb : pour les liquides dont l'évaporation conduit à une aggravation des risques, la masse Ma précédemment définie doit être divisée par un facteur

$S : Mb = \frac{Ma}{S}$, définissant ainsi une nouvelle référence Mb .

S est la somme de deux coefficients S_1 et S_2 . S remplit les conditions suivantes :

$0.1 \leq S \leq 10$	
Si $S < 0.1$	alors $S = 0.1$
Si $S > 10$	alors $S = 10$

Les coefficients S_1 et S_2 se calculent ainsi :

Le coefficient S_1 est lié à la différence entre la température de service T_p (°C) et la température d'ébullition à pression atmosphérique T_{eb} (°C): $S_1 = 10^{\frac{(T_p - T_{eb})}{100}}$

Le coefficient S_2 ne s'applique que lorsque la température de service est inférieure à 0°
 : $S_2 = \frac{T_{eb}}{(-50)}$. En cas de température de service positive : $S_2 = 0$

=> une première sélection d'équipements est alors réalisée : les équipements dont la masse de produit dangereux est supérieure à la masse seuil M_b sont sélectionnés.

Deuxième étape:

Possibilité d'effet domino

Pour les autres équipements non précédemment sélectionnés, la possibilité d'effet domino est prise en compte. Ainsi, pour les équipements contenant des produits explosifs ou inflammables ET situés à moins de 50 m d'un équipement dangereux précédemment sélectionné, une nouvelle quantité seuil est déterminée M_c : $M_c = S_3 \cdot M_b$

$$\text{avec } \begin{cases} 0.1 \leq S_3 \leq 1 \\ S_3 = (0.02 \cdot D)^3 \end{cases}$$

où D est la distance entre les deux équipements.

S_3 doit remplir les conditions suivantes :

$$\begin{cases} 0.1 \leq S_3 \leq 10 \\ \text{Si } S_3 < 0.1 & \text{alors } S_3 = 0.1 \\ \text{Si } S_3 > 10 & \text{alors } S_3 = 10 \end{cases}$$

=> une deuxième sélection d'équipements peut alors être réalisée : les équipements contenant des produits explosifs ou inflammables, situés à moins de 50 m d'un équipement sélectionné à la première étape et dont la masse de produit dangereux est supérieure à la masse seuil M_c sont également sélectionnés.

La méthode proposée permet de limiter le nombre d'équipements sélectionnés, mais elle n'interdit nullement une analyse complémentaire qui peut aboutir à la sélection d'autres équipements. Ce pourra être par exemple le cas si des équipements sont proches des limites de propriété du site, ou si ceux-ci peuvent être le siège de réactions dangereuses.

2.3.3 Opération A-1 : Méthode MIMAH

La méthode MIMAH, déjà finalisée en juillet 2003, permet d'identifier de façon systématique l'ensemble des scénarios d'accidents physiquement envisageables à partir de la typologie d'équipement et des dangers associés à la substance impliquée.

De façon très schématique, la méthode MIMAH peut être décrite selon le logigramme suivant. Elle s'applique à chaque équipement sélectionné lors de l'étape précédente.

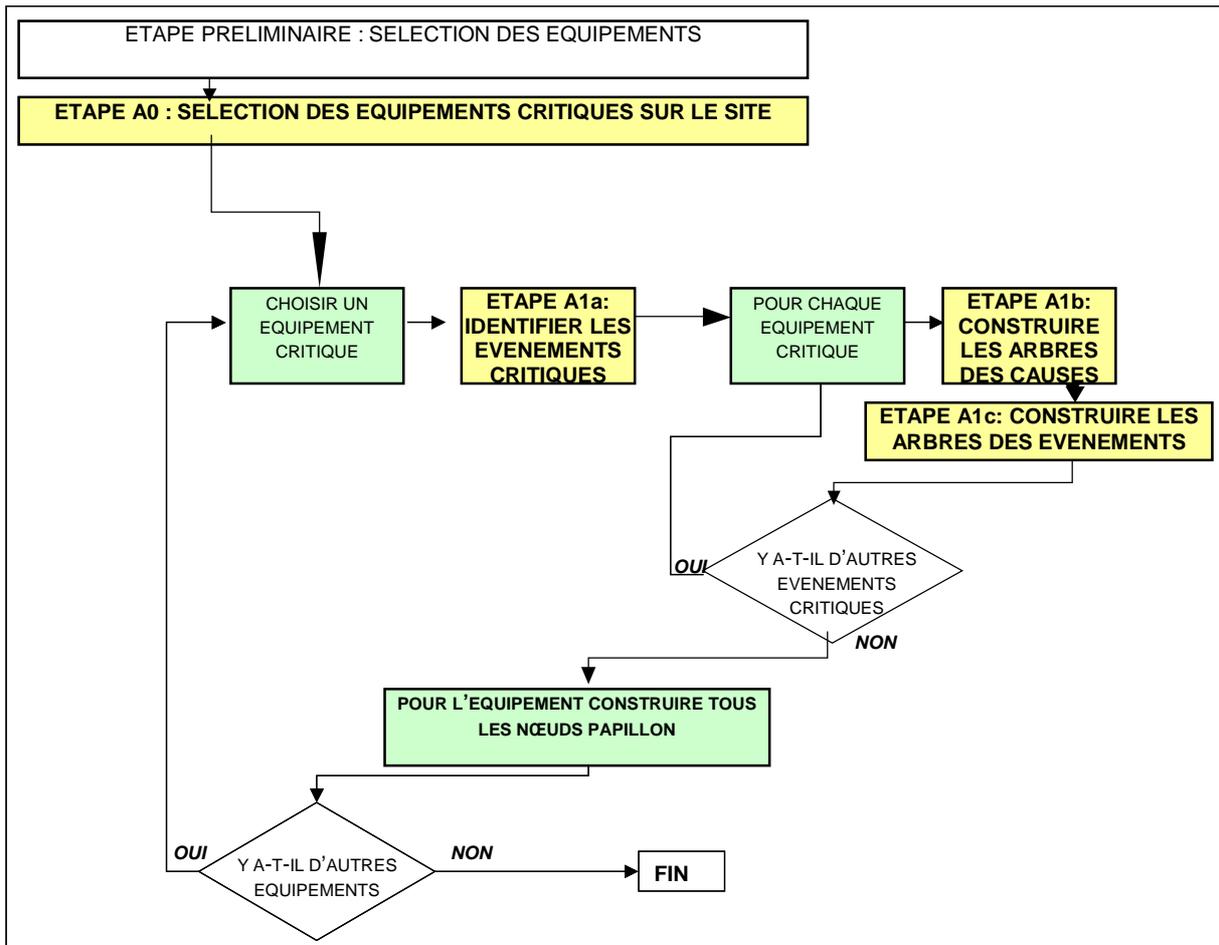


Figure 2 : Logigramme des étapes de la méthode MIMAH

2.3.3.1 Etape A1a : Identifier par équipement les événements critiques ou ERC

Les équipements sélectionnés au cours de l'opération précédente font l'objet d'une classification selon le tableau ci-dessous :

N	Type d'équipements	Définition
Unités de stockage		
EQ1	Stockage en vrac solide	Stockage de substances sous forme solide (poudres ou billes). Les substances y sont stockées en vrac ou en siols (les stockages en sous forme de sacs ne font pas partie de cette catégorie)
EQ2	Stockage de solides en petits contenants	Stockage de solides sous forme de petits contenants ou réservoirs de capacité inférieure à $\cong 1 \text{ m}^3$.
EQ3	Stockage de liquides en petits contenants	Stockage de liquides sous forme de petits contenants ou réservoirs de capacité inférieure à $\cong 1 \text{ m}^3$.
EQ4	Stockage sous pression	Réservoirs de stockage à température ambiante et à une pression supérieure à 1 bar. La pression est celle du fluide à saturation ou peut être celle d'un gaz inerte. La substance peut être un gaz liquéfié sous pression (deux phases en équilibre) ou un gaz sous pression (une phase gaz).
EQ5	Stockage à pression supérieure à la pression de saturation	Réservoirs de stockage fonctionnant à température ambiante à une pression supérieure à 1 bar. La pression est exercée par un gaz inerte par exemple et maintient le stockage à une pression supérieure à sa pression de saturation. Le stockage contient une substance en phase liquide.
EQ6	Stockage atmosphérique	Stockage à pression et température ambiante, contenant un liquide. La substance peut être un gaz liquéfié sous pression (deux phases en équilibre) ou un gaz sous pression (une phase gaz).
EQ7	Stockage cryogénique	Stockage fonctionnant à pression atmosphérique (ou moins) et basse température. La substance est un gaz liquéfié réfrigéré.

N	Type d'équipements	Définition
Unités de (dé)chargement		
EQ8	Equipement de transport sous pression	Equipement de transport à température ambiante et pression supérieure à 1 bar (pression exercé par la substance elle-même).
EQ9	Equipement de transport atmosphérique	Equipement de transport à pression et température ambiante comportant une substance liquide.
Réseaux de canalisations		
EQ10	Canalisation	Canalisations entre deux unités, les canalisations dans l'unité sont liées aux divers équipements
Equipements process		
EQ11	Stockage intermédiaire dans le procédé	Equipement de stockage dans l'unité (peut être stockage sous pression, cryogénique..)
EQ12	Equipement avec réactions chimiques	Equipement avec réaction chimique, par exemple réacteur.
EQ13	Equipement séparation physique ou chimique	Equipement séparation physique ou chimique (par exemple colonne de distillation, filtres, sècheurs..).
EQ14	Equipement de production et fourniture d'énergie	Equipement de production et fourniture d'énergie (par exemple fours, chaudières..)
EQ15	Equipement de conditionnement	Equipement dédiés au packaging des substances (exclut les packages eux-mêmes)
EQ16	Autres équipements	Autres équipements (pompes..)

Tableau 4 : Typologie d'équipements considérée dans MIMAH

A partir de chaque type d'équipement, sont identifiés les évènements redoutés centraux potentiels. La méthode est détaillée en annexe 3 du rapport D1C (juillet 2004). Elle s'appuie sur l'utilisation de deux matrices :

- une matrice croisant le type d'équipement avec les 12 évènements critiques potentiels ;
- une matrice croisant les évènements critiques avec l'état physique des substances.

La liste d'évènements critiques possibles est spécifiée dans le Tableau 5.

Evénements redoutés critiques		Commentaires
ERC1	Décomposition	Cet événement critique ne concerne que les substances solides . Il correspond à un changement d'état physique de la substance par apport d'énergie/chaleur ou par réaction avec une substance chimique incompatible. La décomposition de la substance conduit à une émission de gaz toxiques ou à l'explosion retardée des gaz inflammables formés (la réaction n'est pas spontanée mais peut être violente). Cet ERC ne concerne que les stockages vrac de produits solides.
ERC2	Explosion	Cet ERC ne concerne que les stockages vrac de produits solides explosifs (phrases R2, R3, R6..). Il correspond à un changement d'état physique de la substance par apport d'énergie/chaleur ou par réaction avec une substance chimique incompatible. Le changement d'état entraîne une combustion solide avec effets de surpression (ou explosion) due à une réaction violente et spontanée. Dans le cas d'un solide stocké dans un récipient fermé, l'explosion est considérée comme une cause de surpression interne pouvant conduire à une perte de confinement (rupture catastrophique ou brèche).
ERC3	Mise en mouvement (entraînement par l'air)	Cet ERC est réservé aux poussières et pulvérulents exposés à l'atmosphère (stockage ouvert ou convoyeurs..). L'évènement se produit par déplacement d'air (par exemple trop forte ventilation).
ERC4	Mise en mouvement (entraînement par un liquide)	Cet ERC est réservé aux poussières et pulvérulents exposés à l'atmosphère (stockage ouvert ou convoyeurs..). L'évènement se produit par déplacement de liquide (par exemple inondation ou débordement d'un liquide d'un autre équipement).
ERC5	Inflammation – départ de feu	Cet ERC correspond à une réaction entre un produit oxydant et un produit inflammable ou combustible ou à une décomposition d'un peroxyde organique conduisant à un feu. Cet ERC concerne les substances dont une perte d'intégrité physique (décomposition, contamination) conduit à un incendie. Cet ERC peut être associé aux substances pyrotechniques.
ERC6	Brèche en phase gaz	Cet ERC correspond à un trou de diamètre donné dans la paroi en phase gaz d'un équipement, conduisant à un rejet continu. Cet ERC s'applique aussi aux équipements contenant un solide en suspension dans une phase gazeuse.
ERC7	Brèche en phase liquide	Cet ERC correspond à un trou de diamètre donné dans la paroi en phase liquide d'un équipement, conduisant à un rejet continu.
ERC8	Fuite sur canalisation en phase liquide	Cet ERC correspond à un trou de diamètre égal à un certain pourcentage du diamètre nominal d'une canalisation véhiculant un liquide. L'ERC peut être une ouverture « fonctionnelle » sur la canalisation : fuites de joints sur pompes, sur vannes, sur bouchons pleins, etc.

<i>Evénements redoutés critiques</i>		<i>Commentaires</i>
ERC9	Fuite sur canalisation en phase gaz	Cet ERC correspond à un trou de diamètre égal à un certain pourcentage du diamètre nominal d'une canalisation véhiculant un gaz. L'ERC peut être une ouverture « fonctionnelle » sur la canalisation : fuites de joints sur pompes, sur vannes, sur bouchons pleins, etc. Cet ERC s'applique aussi aux canalisations véhiculant un solide en suspension dans une phase gazeuse.
ERC10	Rupture catastrophique	La rupture catastrophique correspond à la perte complète de l'équipement conduisant à un rejet complet et instantané de la substance. Le BLEVE est aussi considéré comme une rupture catastrophique particulière. Dans certains cas, la rupture catastrophique peut conduire à l'éjection de missiles et une onde de surpression.
ERC11	Effondrement de réservoir	L'effondrement de réservoir correspond à la perte complète de l'équipement conduisant à un rejet complet et instantané de la substance. L'ERC est dû à une réduction de pression du réservoir, conduisant à son effondrement par action de la pression atmosphérique. Cet ERC ne conduit pas à l'éjection de missiles ou la production d'une onde de surpression.
ERC12	Effondrement du toit de réservoir	L'effondrement du toit peut être dû à une réduction de la pression interne conduisant à l'effondrement du toit mobile sous l'effet de la pression atmosphérique. Cas spécifique des stockages atmosphériques aériens.

Tableau 5 : Liste des événements redoutés centraux

2.3.3.2 Etape A1b : Elaborer un arbre de défaillances pour chaque ERC

MIMAH a élaboré des arbres de défaillances génériques pour chacun des événements critiques définis précédemment. Pour chaque ERC identifié pour un équipement, le (les) arbres génériques définis dans le tableau ci-dessous seront élaborés. Certains événements critiques font l'objet de plusieurs arbres génériques ; il est important de détailler l'ensemble des arbres proposés car ils sont associés à des conséquences assez différentes en nature ou en intensité. Cette dissociation de certains arbres a été introduite au second semestre 2003. Les différents arbres correspondent également à des causes différentes.

Les correspondances entre ERC et arbres génériques sont reprises ci-après :

ERC	Evènement critique	Arbres génériques des défaillances (AD)
ERC1	Décomposition	AD décomposition chimique AD Décomposition due à une source ponctuelle d'ignition AD Décomposition thermique
ERC2	Explosion	AD Explosion d'un matériau explosif AD Explosion (réaction violente)
ERC3	Mise en mouvement (entraînement par l'air)	AD Mise en mouvement (entraînement par l'air)
ERC4	Mise en mouvement (entraînement par un liquide)	AD Mise en mouvement (entraînement par un liquide)
ERC5	Inflammation – départ de feu	AD inflammation – départ de feu (Perte d'intégrité physique)
ERC6	Brèche en phase gaz	AD large brèche en phase gazeuse AD brèche moyenne en phase gazeuse AD petite brèche en phase gazeuse
ERC7	Brèche en phase liquide	AD large brèche en phase liquide AD brèche moyenne en phase liquide AD petite brèche en phase liquide
ERC8	Fuite sur canalisation en phase liquide	AD large fuite sur canalisation liquide AD fuite moyenne sur canalisation liquide AD petite fuite sur canalisation liquide
ERC9	Fuite sur canalisation en phase gaz	AD large fuite sur canalisation gaz AD fuite moyenne sur canalisation gaz AD petite fuite sur canalisation gaz

ERC	Evènement critique	Arbres génériques des défaillances (AD)
ERC10	Rupture catastrophique	AD rupture catastrophique
ERC11	Effondrement de réservoir	Effondrement de réservoir
ERC12	Effondrement du toit de réservoir	Effondrement du toit de réservoir

Tableau 6 : Arbres génériques par type d'ERC

A défaut de valeurs justifiées sur site, ARAMIS propose des valeurs type de diamètre de brèche et de fuites de canalisation, qui serviront à calculer le terme source des modélisations de sévérité (opération B) :

Type de brèche ou fuite	ERC6 et ERC7 : diamètres de brèches	ERC8 et ERC9 : diamètres de fuite
Large	100 mm	Rupture guillotine
Moyenne	35 à 50 mm ou diamètre de l'équipement (vannes..)	22 à 44 % du diamètre de canalisation
Petite	10 mm	10% du diamètre de canalisation

Tableau 7 : Valeurs types de brèches et de diamètres de fuite

Les causes identifiées dans MIMAH sont des causes génériques qui peuvent être complétées en lien avec l'industriel, au cours d'une démarche d'analyse des risques. Les arbres génériques sont conçus comme des supports pour assurer un maximum d'exhaustivité dans la recherche des causes. Plusieurs niveaux de causes sont définis, qui sont à adapter à la complexité de l'analyse des risques. Dans certains cas, des arbres spécifiques à certaines phases de l'installation (arrêt, démarrage, maintenance) pourront être envisagés.

L'identification des arbres génériques a été faite en identifiant successivement :

- Les **conditions nécessaires et suffisantes** pouvant conduire aux pertes de confinement ou d'intégrité physique envisagées. Ces conditions sont généralement physiques. Par exemple, dans le cas d'un incendie, il est nécessaire d'avoir à la fois un produit combustible, une source d'inflammation et un produit comburant.
- Les **causes directes** dont découlent les conditions nécessaires et suffisantes. Ces causes directes peuvent être regroupées en catégories génériques ;
- Chacune des causes directes peut à son tour être détaillée. Par exemple une montée en pression peut être due à un surremplissage ou à une agression thermique.
- Enfin, un dernier niveau, les **évènements indésirables**, a été établi en recherchant les évènements pouvant conduire aux causes directes détaillées. Ces évènements se ramènent souvent à des lacunes en terme d'organisation ou des erreurs humaines. Il a été décidé d'arrêter le développement des arbres à ce niveau qui semble suffisant pour identifier les principales mesures de sécurité à mettre en œuvre ainsi que l'importance du management dans la maîtrise des accidents majeurs.

Les principes et les hypothèses mis en œuvre dans MIMAH ont été justifiés grâce à un examen des bases d'accidents MARS, MHIDAS et HADES. Il est alors apparu qu'à quelques exceptions, la méthode MIMAH permettait de bien décrire les séquences d'évènements à l'origine d'accidents majeurs. Cette analyse a aussi permis de corriger ou de compléter quelques insuffisances. En revanche, l'examen des bases d'accidents ne permet pas de tirer des conclusions fermes quant aux accidents majeurs les plus couramment observés.

Un exemple d'arbres de défaillances extrait de MIMAH est présenté ci-dessous :

Figure 3 : exemple d'arbre des défaillances – cas de la rupture catastrophique

Detailed direct causes	Direct causes	Necessary and sufficient causes	Critical event
filled beyond normal level and failure to detect and stop rising level	overfilling vessel causes overpressure	or internal overpressure (liquid)	or catastrophic rupture
more flow in than out and vessel filled at maximum	Pump causes overpressure		
internal combustion/explosion and pressure relief fails	combustion/explosion causes overpressure		
runaway reaction and failure to shut off feed in time	runaway (side) reaction causes overpressure		
contained liquid filled vessel and temperature rise	thermal expansion of liquid filled vessel causes overpressure		
sudden blockage and stratification potential in vessel (e.g. LNG)	back pressure wave causes overpressure		
no mixing in vessel and difference in temperature between layers (temperature inversion)	roll-over of vessel contents causes overpressure		
overcompression and leak/rupture of internal high pressure source e.g. HP steam coil	overcompression causes overpressure	Internal overpressure (Gas material)	
Wrong connection procedure or Source should not be connected	external HP source connected causes overpressure		
Overpressure in the external HP source			
runaway reaction and failure to shut off feed in time	runaway (side) reaction causes overpressure		
internal combustion/explosion and flammable atmosphere and ignition source	combustion/explosion causes overpressure	Internal overpressure (Solid material)	
solid is unstable and condition of stability exceeded	dust explosion overpressures enclosure or unstable solid explodes		
Natural causes (snow, ice, water, wind)	Overloading	Excessive external stress	
Earthquake	High amplitude vibrations		
Low resilience material or Low temperature	Brittle structure	and Brittle rupture	
Hydrogen or other chemical causes of embrittlement			
Embrittlement due to welding			
Embrittlement due to other thermal cycles			
Hammering or impact during transport and handling	Impact		
Dropped object			
impact by a structure element			
Missile (domino effect)			
Fall of a structure element (domino effect)			

2.3.3.3 Etape A1c : Elaborer un arbre d'évènements pour chaque ERC.

MIMAH élabore par événement redouté des arbres d'évènements types. On trouvera ci-dessous des exemples d'arbres pour différents événements redoutés et phase de substances.

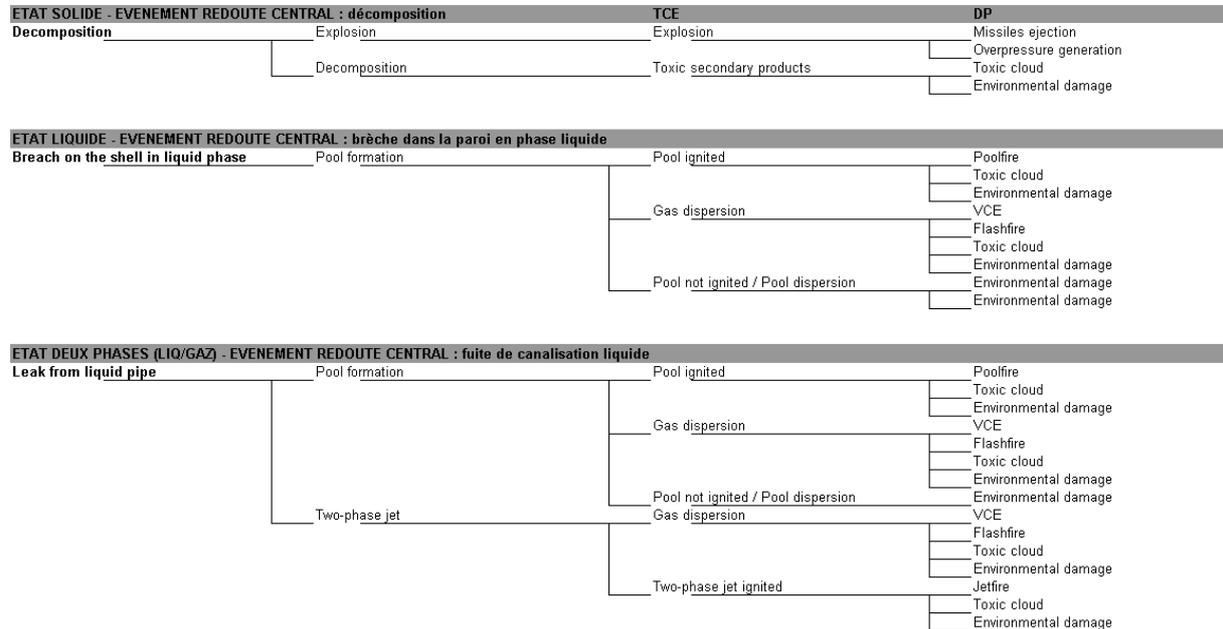


Figure 4 : Exemples d'arbres des causes

Les dangers liés aux produits définis en terme de phrases de risque ou de catégories de danger issues principalement de la directive 67/548/CE (Très Toxique, Toxique, Inflammable...) permettent ensuite d'élaguer ces arbres en ne retenant que les phénomènes dangereux compatibles avec les dangers associés à la substance. Une application informatique (EXCEL) a été développée permettant de faire une sélection automatique des événements.

A ce stade des opérations, les équipements sont identifiés avec l'ensemble des scénarios possibles. Les scénarios sont représentés par un ensemble de nœuds-papillon. On peut alors passer à l'étape suivante de sélection des scénarios de référence.

2.3.4 **Opération A-2 : Méthode MIRAS**

La méthode MIRAS (Method for the Identification of Reference Accident Scenarios) a été développée au cours des 12 derniers mois.

Son objectif est la sélection de scénarios de référence qui seront modélisés et feront l'objet d'une cartographie de la sévérité. Le choix des scénarios de référence s'appuie sur une matrice de risques, qui définit des zones d'acceptabilité en fonction notamment de la fréquence d'occurrence évaluée pour chaque phénomène dangereux identifié.

Le logigramme ci-après résume les principales étapes de la méthode MIRAS.

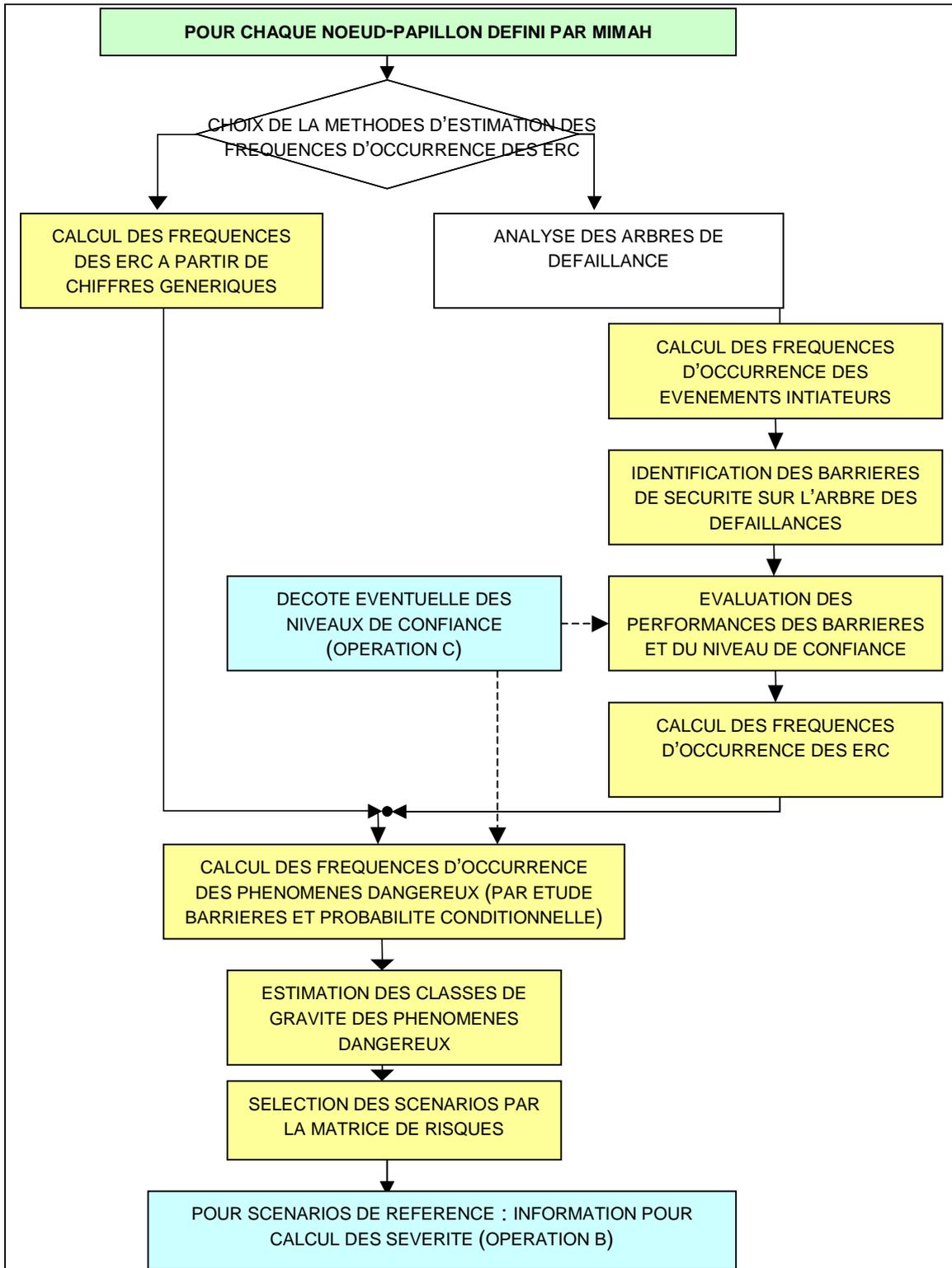


Figure 5 : Vue générale des étapes MIRAS

2.3.4.1 Etape A2a : Fréquence d'occurrence d'un phénomène dangereux

Identification des barrières

Pour chaque scénario identifié par MIMAH, les barrières de sécurité techniques ou organisationnelles pouvant limiter la probabilité d'un accident ou en limiter les effets sont identifiées et reportées sur les nœuds-papillon. L'identification est réalisée dans le cadre de l'analyse des risques en présence de l'industriel. A défaut de fournir un inventaire exhaustif des barrières de sécurité existantes, il a été choisi dans le cadre d'ARAMIS, de construire une méthode pour une identification systématique de ces mesures de sécurité.

Une fois l'identification et l'évaluation des barrières effectuées, on pourra utiliser le graphe de risques (cf paragraphe suivant) pour avoir un avis critique sur l'exhaustivité dans l'identification des barrières. En effet, sans remplacer la matrice de risques qui permet la sélection des scénarios de référence, le graphe de risques est un outil précieux en cours d'analyse pour juger de l'acceptabilité d'un scénario. L'identification des barrières pourra être poussée si le nombre de barrières en place conduit à un scénario insuffisamment maîtrisé.

La méthode d'identification des barrières est fondée sur la définition de **fonctions de sécurité génériques**. Ces fonctions de sécurité sont traduites par un verbe d'action suivi d'une intention à accomplir. Cinq verbes d'action permettent ainsi de couvrir l'ensemble des fonctions qu'il convient d'assurer pour maîtriser les risques d'accidents :

Eviter. Il s'agit de rendre un événement impossible. Cette fonction désigne généralement des modifications profondes des installations et est à rapprocher du concept des procédés intrinsèquement plus sûrs.

Prévenir. Il s'agit cette fois de limiter la probabilité d'occurrence d'un événement, sans toutefois pouvoir le rendre impossible.

Détecter. Il s'agit de détecter un événement. Cette fonction seule ne suffit généralement pas à assurer la maîtrise de l'accident et doit être associée à d'autres fonctions comme contrôler ou limiter notamment.

Contrôler. Il s'agit de maîtriser le déroulement d'une dérive afin de ramener le système dans un état opérationnel en sécurité.

Limiter. La fonction « limiter » ou « réduire » consiste à agir sur les conséquences d'un événement afin d'en réduire la gravité. Le système n'est en revanche pas ramené dans un état totalement sûr. Equivalente au terme anglais « *to mitigate* », cette fonction s'applique le plus souvent au terme source de l'accident (par exemple, limiter un temps de fuite ou un débit).

Les barrières sont classées selon une typologie (opération C) qui dépend du mode de fonctionnement ou de défaillance des barrières. Il y a donc :

- les barrières dites passives (rétention, murs coupe-feu) qui ne requièrent pas de source d'énergie extérieure pour remplir leur fonction de sécurité,
- les barrières dites actives qui nécessite une source extérieure d'activation pour remplir leur fonction de sécurité. On peut encore diviser cette classe en sous-catégories, mais on y retrouve en fait des organes mécaniques (soupapes, vannes), des systèmes de régulation (en fonctionnement permanent), des systèmes instrumentés de sécurité (activation sur alerte),
- les barrières dites humaines, qui nécessite l'intervention de l'homme pour remplir leur fonction de sécurité.

Cette démarche a été appliquée complètement sur les arbres d'évènements qui présentent un niveau de détail moins important que les arbres des causes. Néanmoins, l'approche présentée ici reste valable quels que soient les évènements à analyser comme le montre l'exemple ci-dessous d'un éclatement d'un réacteur, suite au mélange de produits incompatibles.

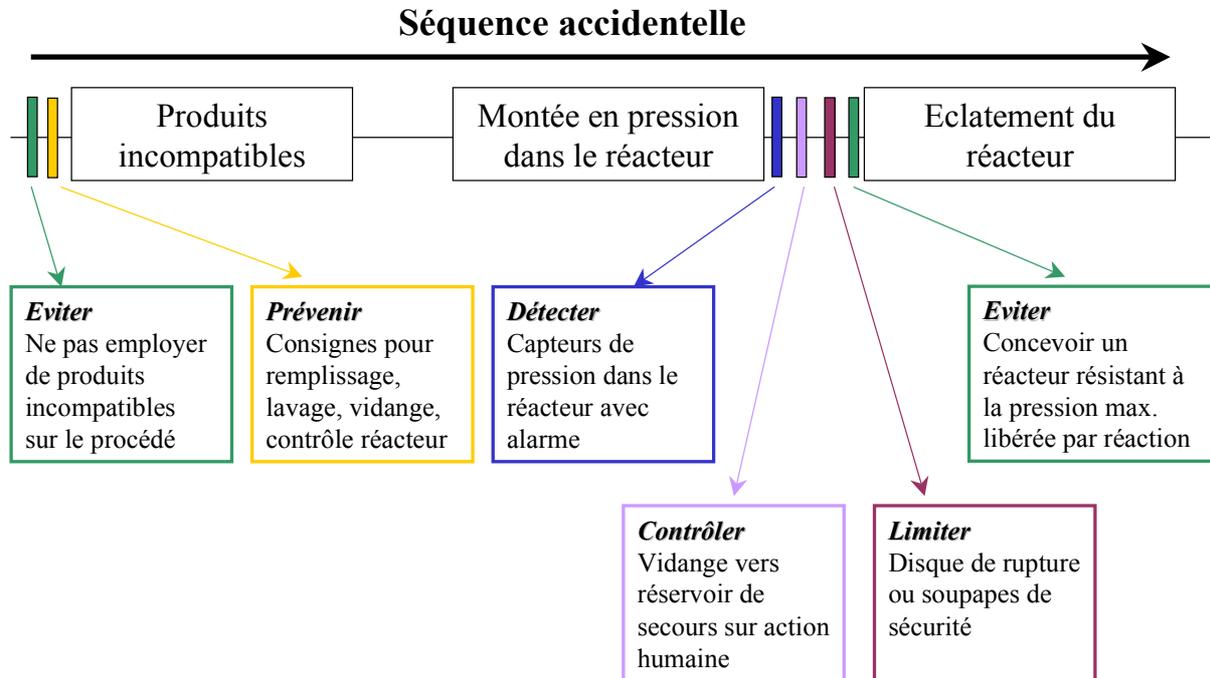


Figure 6 : Exemple d'identification des fonctions (cahier des charges) que doivent remplir des barrières de sécurité

Utilisation des barrières dans les arbres

En prévention (partie gauche du nœud papillon), la mise en œuvre d'une barrière réduit la probabilité d'occurrence de l'évènement redouté central et peut éventuellement générer des sous-événements critiques à prendre en compte. En protection (partie droite du nœud papillon), la mise en œuvre d'une barrière réduit la probabilité d'observer l'effet majeur envisagé et conduit éventuellement à considérer un sous-événement avec un effet réduit.

La barrière identifiée est reportée sur les arbres.

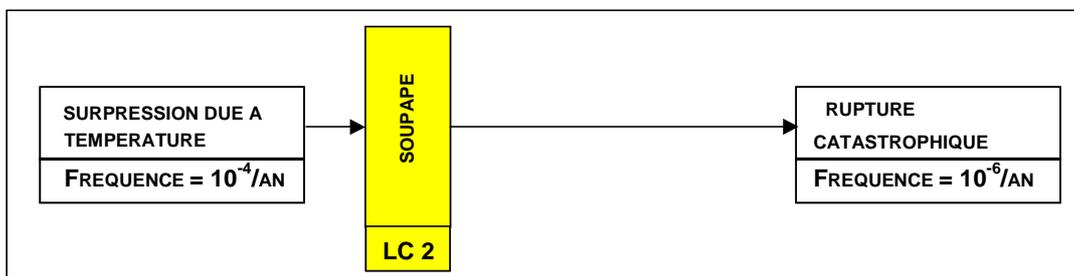


Figure 7 : représentation simplifiée des barrières sur les arbres

L'effet de la barrière dépend de son type ; la barrière peut conduire à éliminer un scénario (barrière EVITER) ou conduire à un nouveau scénario avec des effets réduits, comme illustré sur les schémas suivants.

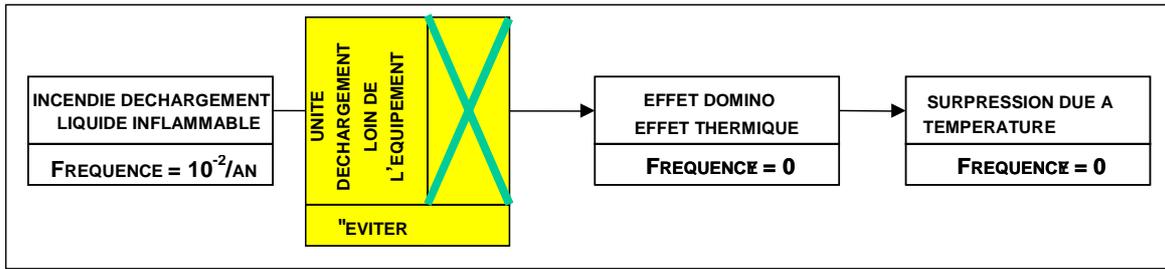


Figure 8 : effet d'une barrière EVITER sur le calcul des fréquences d'occurrence

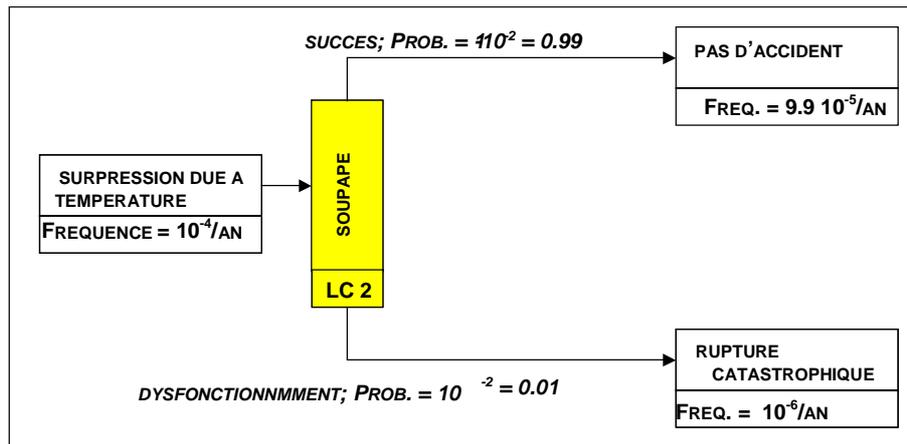


Figure 9 : effet d'une barrière CONTROLER ou DETECTER sur le calcul des fréquences

On trouve ci-dessous un exemple de prise en compte des barrières de type PREVENIR ou LIMITER/CONTROLER sur des arbres.

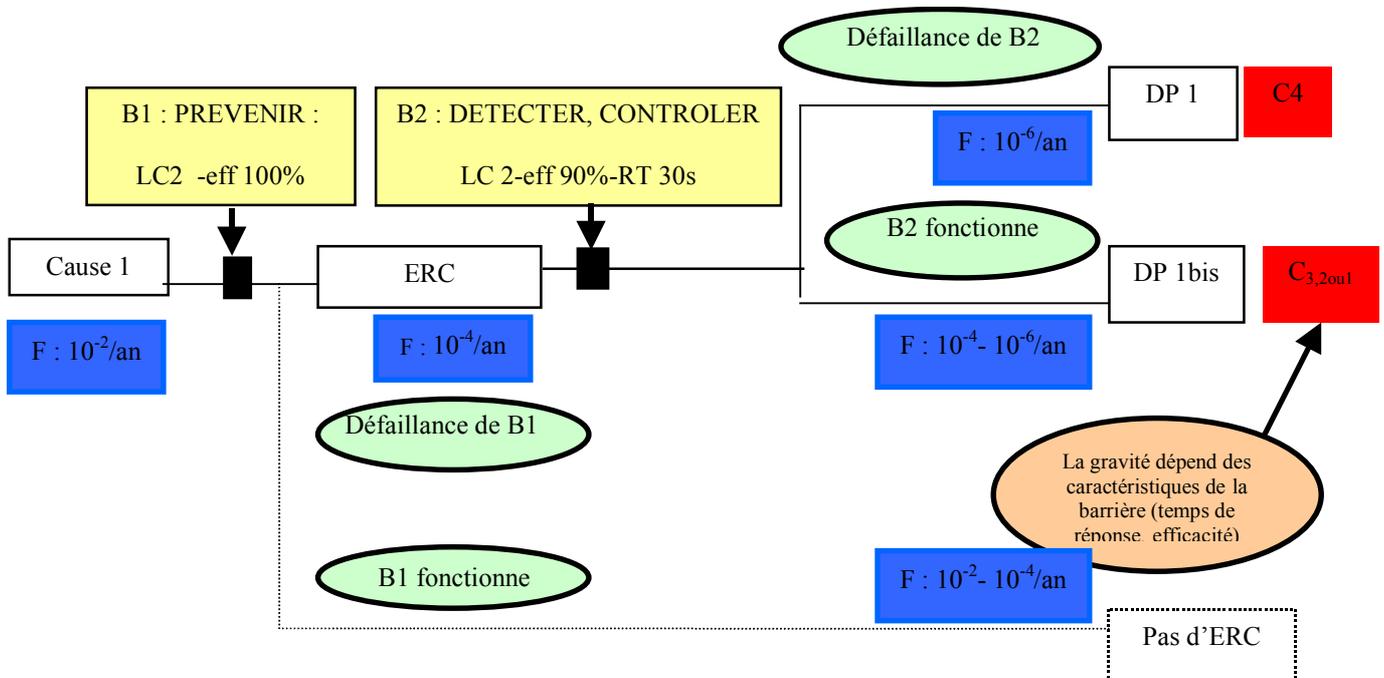


Figure 10 : exemple de prise en compte des barrières

Evaluation de la performance des barrières de défense

Les barrières étant identifiées, une évaluation de leur robustesse permet ensuite de :

- Vérifier que la barrière a des performances suffisantes et adaptées ; **elle peut ainsi être retenue comme une barrière de sécurité** ;
- Evaluer son niveau de confiance, lié à sa probabilité de défaillance ; **cette estimation du niveau de confiance est nécessaire pour calculer la probabilité d'occurrence des événements critiques.**

Les performances font ensuite l'objet d'une éventuelle décote en fonction des résultats de l'audit du management sécurité, la décote étant différente selon la typologie des barrières (humaine, passive, active..). La méthode de décote est précisée dans l'opération C.

La plupart du temps, une fonction de sécurité est remplie par une combinaison de barrières actives, passives ou humaines, très souvent sur le mode DETECTION, TRAITEMENT, ACTION. Chacune des barrières composant la chaîne doit donc être évaluée distinctement, et les règles de combinaison (notamment des niveaux de confiance) sont construites par dérivation de la norme CEI 61511, en respectant deux critères principaux :

- L'architecture de la fonction de sécurité : barrières en série ou en parallèle (principe de redondance),
- L'indépendance des barrières.

A la différence des normes CEI 61508 et CEI 61511, le niveau de confiance est valable pour la combinaison de plusieurs fonctions de sécurité associées, et pas seulement pour le calcul d'une seule barrière. La condition pour cela est l'indépendance totale des barrières. L'évaluation des barrières de défense repose sur les trois critères suivants :

- **Efficacité** : capacité de la barrière de défense à remplir la fonction de sécurité qui lui est dévolue (et définie dans l'opération A sous la forme d'un verbe d'action).
- **Temps de réponse** : durée nécessaire pour que la barrière de défense accomplisse la fonction qui lui est dévolue avec l'efficacité définie.
- **Niveau de confiance** : classe de performance d'une barrière de défense, liée à sa probabilité de défaillance sur sollicitation, ou sa probabilité de ne pas remplir la fonction de sécurité qui lui est dévolue.

L'efficacité et le niveau de confiance des barrières techniques peuvent être estimés en analyse de risques par l'étude de critères complémentaires :

- Indépendance des barrières de sécurité et des systèmes de régulation ;
- Concept éprouvé ;
- Dimensionnement adapté aux conditions du site et effectué selon les normes et standards reconnus ;
- Présence d'une maintenance préventive ;
- Présence de tests périodiques sur les barrières ;
- Architecture sûre incluant des dispositifs à sécurité positive ;

Pour les barrières mettant en jeu une action humaine, les facteurs suivants seront pris en compte pour l'évaluation :

- Formation adéquate du personnel ;
- Présence de procédures claires ;
- Accessibilité de la barrière ;
- Nombre de tâches à réaliser ;
- Facilité du diagnostic ;
- Contrôle des opérations.

Si certains critères ne sont pas assurés, la barrière pourra ne pas être retenue en tant que barrière ou fera l'objet de prescriptions complémentaires (par exemple en cas d'absence de tests réguliers).

Selon les critères définis plus haut, chaque barrière est créditée d'un niveau de confiance en fonction de sa probabilité estimée de défaillance sur sollicitation (PFD : Probability of Failure on Demand) ou sa probabilité de défaillance horaire. Chaque niveau de confiance correspond à un facteur de réduction de la probabilité d'occurrence de l'événement redouté, donc du risque. **Une barrière de sécurité avec un niveau de confiance de n aura une probabilité de défaillance de 10^{-n} et réduira d'un facteur 10^n la probabilité de l'événement.**

<i>Niveau de confiance</i>	<i>Réduction du risque</i>	<i>Probabilité de défaillance à la demande (PFD)</i>	<i>Probabilité de défaillance à l'heure</i>
4	10 000	$\geq 10^{-5}$ to $< 10^{-4}$	$\geq 10^{-9}$ to $< 10^{-8}$
3	1 000	$\geq 10^{-4}$ to $< 10^{-3}$	$\geq 10^{-8}$ to $< 10^{-7}$
2	100	$\geq 10^{-3}$ to $< 10^{-2}$	$\geq 10^{-7}$ to $< 10^{-6}$
1	10	$\geq 10^{-2}$ to $< 10^{-1}$	$\geq 10^{-6}$ to $< 10^{-5}$

Tableau 8 : Niveau de confiance et réduction des risques associés

Estimation des niveaux de confiance des barrières

Des critères ont donc été développés pour chaque type de barrière (passive, active, humaine) mais ne sont pas exposés dans ce document. Le niveau de confiance est évalué soit par application des principes de la norme CEI 61508 pour les barrières actives, soit par retour d'expérience à partir d'une valeur PFD générique pour les barrières passives et humaines. La difficulté est ensuite de vérifier comment ces barrières sont installées, gérées et maintenues dans le temps, en fonction de l'organisation particulière d'un site. Ceci fait intervenir des activités spécifiques du système de management de la sécurité évaluées dans l'opération C.

□ **Pour les dispositifs techniques :**

L'estimation est inspirée des normes CEI 61508 et CEI 61511 applicables aux dispositifs électroniques et instrumentés de sécurité. Selon le type de dispositif (simple ou complexe), le niveau de confiance est obtenu en fonction du taux de défaillance sûre du dispositif et sa tolérance à la défaillance (liée notamment à la redondance des éléments). On se reportera à l'annexe 9 du rapport D1C pour plus de détails.

Le tableau suivant présente quelques exemples de valeurs type :

dispositifs	Niveau de confiance (NC)
Soupape de sécurité	2
Vanne de sécurité	1
Clapet anti-retour	0
Relais classique	1

Tableau 9 : exemple de niveau de confiance de barrières techniques

□ Pour les barrières humaines :

L'estimation repose sur le type d'action (prévention, intervention) et le contexte (stress, formation, diagnostic aisé...). Quelques exemples de valeurs sont données ci-après :

Type d'action	Niveau de confiance (NC)
Opération normale	2
Réponse à une alarme, sans nécessité d'intervention rapide	2
Réponse à une alarme, avec intervention nécessaire dans les 15 minutes	1
Réponse à une alarme, avec intervention nécessaire immédiatement et fort enjeu	0

Tableau 10 : exemples de niveau de confiance de barrières humaines

Processus de réduction et d'acceptation des risques

Il est important de noter d'ores et déjà que la qualité et la quantité de barrières doit être proportionnée à la fois aux effets potentiels et à la probabilité de l'accident. D'ailleurs, la mise en œuvre d'une barrière de défense revient toujours à réduire la probabilité d'observer un événement associé à une gravité donnée.

L'acceptabilité du risque est traitée par la matrice de risques qui définit les zones pour lesquelles des dispositifs complémentaires doivent être envisagés si le scénario se trouve dans la zone concernée.

Pour évaluer la fréquence d'occurrence des phénomènes dangereux, il faut d'abord identifier les barrières de sécurité qui vont permettre de réduire cette fréquence d'occurrence. On se propose alors d'utiliser au cours de l'analyse des risques un graphe issu des normes CEI 61508 et CEI 61511, qui permet de se faire une première idée de la maîtrise d'un scénario et ainsi d'approfondir si nécessaire la recherche de barrières.

Les graphes pages suivantes permettent ainsi visuellement et très rapidement de définir le niveau d'exigence nécessaire sur les barrières de défense en fonction seulement, de la gravité estimée de l'évènement, de sa cinétique ou de ses conditions particulières d'occurrence, et du niveau de probabilité de l'évènement initiateur.

Les zones dont il est fait mention sur les graphes sont à rapprocher des zones indiquées dans la matrice de risques.

Les notations sont les suivantes :

C _n	Conséquence potentielle de l'évènement analysé, définie à partir de la sévérité des effets et de la vulnérabilité des cibles et répartie en quatre classes de C ₁ (conséquences très faibles) à C ₄ (conséquences majeures)
F	Fréquence d'exposition des cibles aux conséquences définies ci-dessus. (F ₁) l'accident peut survenir lors d'opérations rares et/ou spécifiques, ou les cibles sont présentes rarement dans les zones de danger (F ₂) l'accident survient dans des conditions normales d'exploitation ou les cibles sont présentes en permanence dans les zones de danger
D	Possibilité pour les cibles d'éviter les conséquences définies ci-dessus, lorsque les autres barrières sont défaillantes. (D ₁) Cinétique longue <u>et</u> intervention / évacuation clairement définies <u>et</u> personnel averti que les barrières sont défaillantes (D ₂) Autres cas
P	Probabilité de l'évènement initiateur. P _A (probabilité faible ou $\leq 10^{-4}$ / an) à P _D (probabilité forte ou $> 10^{-2}$ / an et $\leq 10^{-1}$ / an)
---	Pas de spécification de sécurité nécessaire
a	Barrière nécessaire sans spécification de sécurité particulière
b	Situation non acceptable en l'état. <u>Nécessité de revoir l'installation et de réduire le risque à la source.</u>
1,2,3,4	Niveau requis de confiance des barrières.

Les valeurs lues en croisant les données d'entrée sont les objectifs de niveaux de confiance **pour la totalité des barrières** de sécurité agissant sur un scénario donné. Si le niveau de confiance global n'est pas atteint, on pourra se situer en dehors de la zone visée de la matrice de risques. Mais la correspondance entre les deux outils (matrice et graphe de risques) n'est pas totale, puisque la matrice considère des phénomènes dangereux et non des évènements critiques. Le graphe de risques donne une estimation de la classe d'acceptabilité.

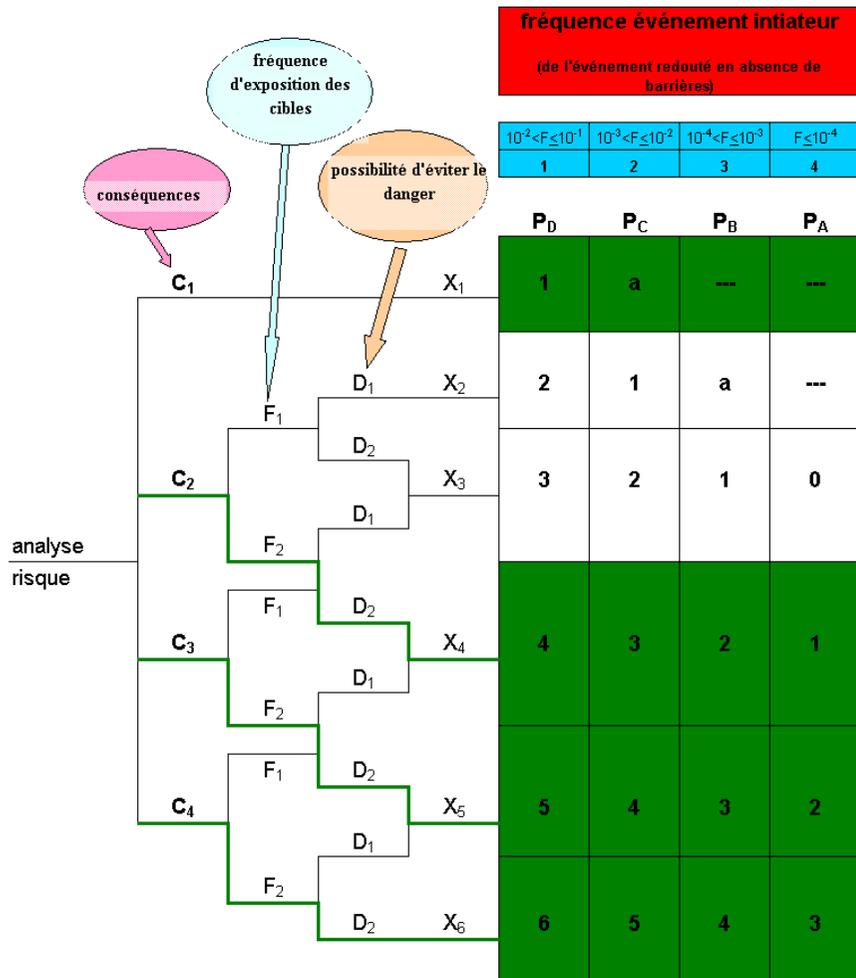
Les fréquences d'occurrence des évènements initiateurs (P_N dans le graphe de risque) peuvent être estimées en analyse de risques, par le retour d'expérience de l'industriel. La fréquence d'occurrence sera liée au nombre de fois où l'évènement s'est produit sur le site ou des installations similaires. A titre d'exemple, un évènement se produisant une fois dans la vie de l'installation se verra attribuer une fréquence de 10⁻¹/an.

A défaut des fréquences d'occurrence estimées en analyse de risques, des fréquences d'occurrence issues de la littérature peuvent être utilisées. Une liste d'évènements initiateurs types est donnée à titre indicatif en annexe 7 du rapport D1C (juillet 2004). Parmi ces valeurs on pourra retenir :

- Un système de régulation a une fréquence d'occurrence de défaillance de 10⁻¹/an ;
- Une erreur humaine a une fréquence d'occurrence de défaillance de 10⁻²/opération ; mais cette valeur est modifiée par les possibilités d'autocontrôle, procédures.

GRAPHE DE RISQUE : objectifs pour scénarios effets négligeables

NIVEAU DE CONFIANCE TOTAL REQUIS



GRAPHE DE RISQUE : objectifs pour scénarios effets négligeables

FREQUENCE RESIDUELLE EVENEMENT REDOUTE CENTRAL

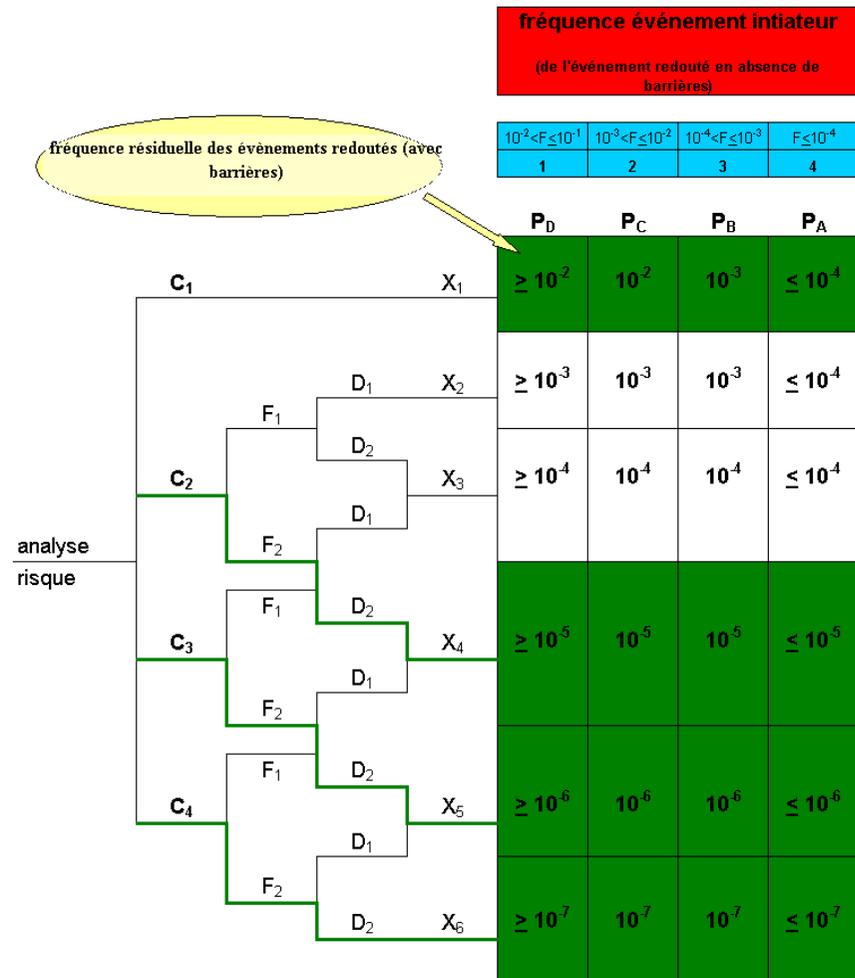
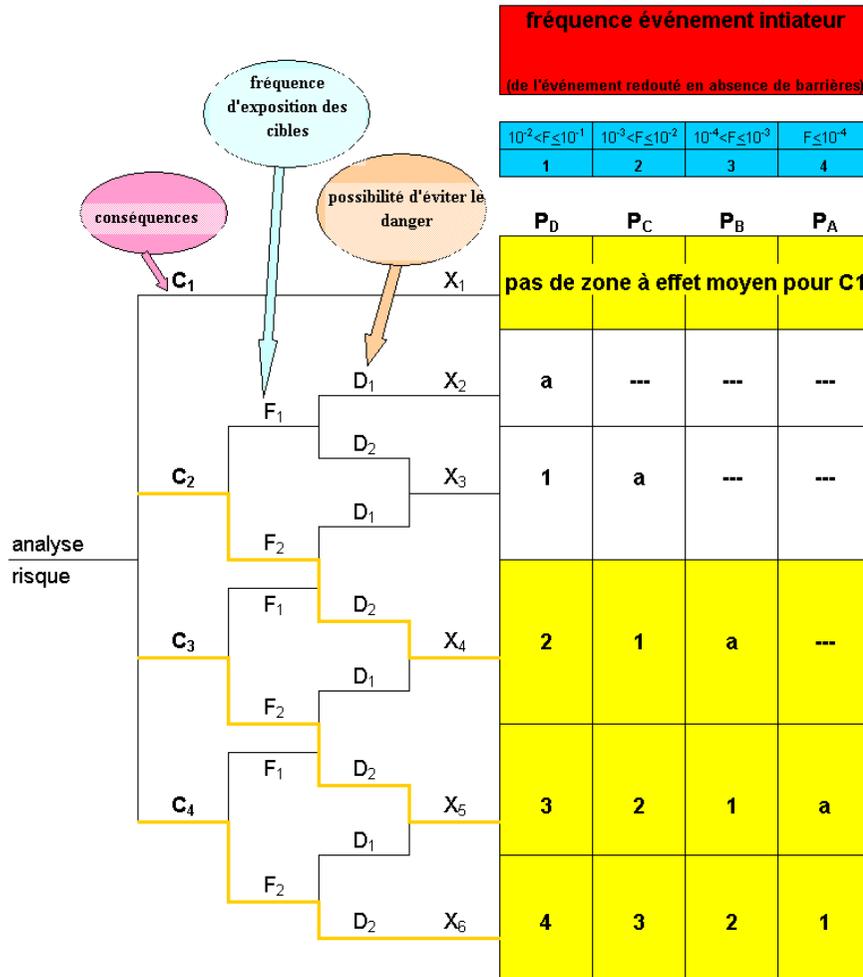


Figure 11 : graphe de risques pour atteindre niveau des zones à effet négligeable

GRAPHE DE RISQUE : objectifs pour scénarios effets moyens

NIVEAU DE CONFIANCE TOTAL REQUIS



GRAPHE DE RISQUE : objectifs pour scénarios effets moyens

FREQUENCE RESIDUELLE EVENEMENT REDOUTE CENTRAL

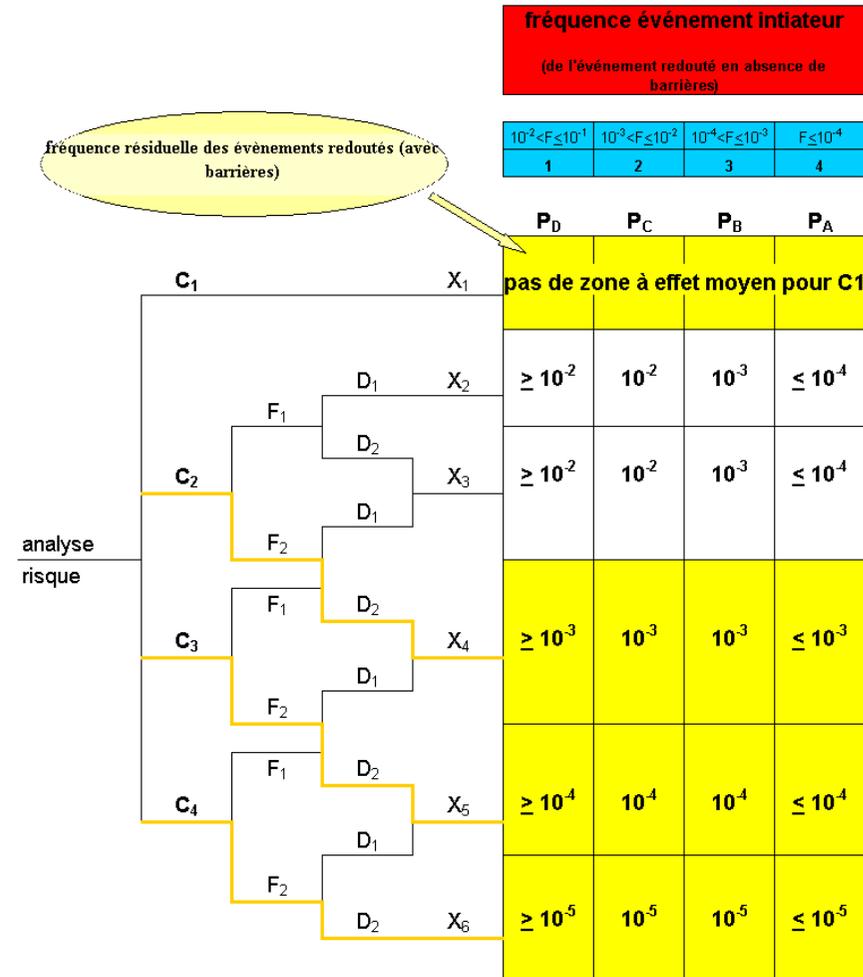


Figure 12 : graphe de risque pour atteindre le niveau des effets moyens

Règles de calcul et de combinaison des classes de fréquence

La fréquence d’occurrence d’un ERC (point central d’un nœud papillon) est calculée à partir des classes de fréquence des événements initiateurs auxquelles s’ajoutent les niveaux de confiance des barrières concernées représentant leurs probabilités de défaillance.

La fréquence des phénomènes dangereux est ensuite calculée à partir de celles des événements critiques et des distributions de probabilités de chaque phénomène dangereux potentiel. L’annexe 12 du rapport DIC donne des exemples de probabilités de phénomènes dangereux dont certains sont repris ci-après.

Les règles de calcul dans un arbre d’événement sont résumées par les figures ci dessous :

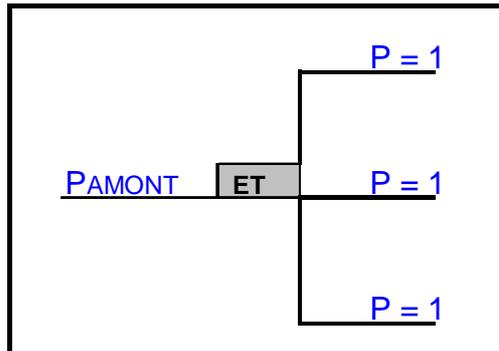


Figure 13 : Calcul des arbres d’évènements avec porte ET

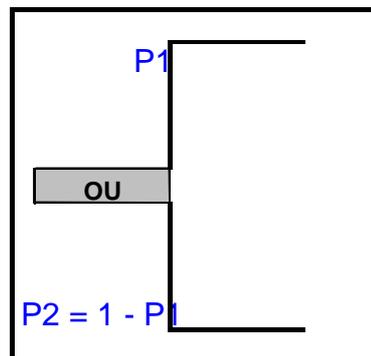


Figure 14 : Calcul des arbres d’évènements avec porte OU

Evaluation des probabilités conditionnelles :

A partir d’un événement critique, si plusieurs situations (porte OU) peuvent se produire, il est nécessaire d’évaluer les probabilités de transmission d’un événement. Par exemple, plusieurs situations peuvent donner lieu à des probabilités de transmission :

- Possibilité de jet impactant : la probabilité dépend de la direction de fuite, du vent.
- Probabilité d’inflammation immédiate : celle-ci dépend de la nature du produit, de la présence de source.
- Probabilité d’inflammation différée : celle-ci dépend de la nature du produit, de la présence de source d’inflammation.
- Probabilité de VCE : celle-ci dépend de la direction de fuite, de l’encombrement.

Les valeurs génériques proposées pour ces probabilités sont adaptées et discutées pour chaque site. Néanmoins, ARAMIS fournit à titre d’orientation et comme support à la discussion, des chiffres génériques issus d’un important travail de synthèse bibliographique. Ces chiffres figurent en annexe 12 du rapport D1C (juillet 2004).

Prise en compte des barrières de sécurité

Les barrières retenues et prises en compte après évaluation de leurs performances sont utilisées pour l’évaluation de la fréquence d’occurrence des phénomènes dangereux. En fonction de leur nature, elles agissent différemment :

- Pour une barrière de prévention : celle-ci modifie la probabilité de transmission du phénomène dangereux. Par exemple, si on envisage une fuite de produit inflammable dans une zone équipée de matériels ATEX, la probabilité d’ignition immédiate est réduite par rapport à une situation où le matériel électrique est standard.
- Pour une barrière de type CONTROLER ou LIMITER : un scénario complémentaire doit être considéré correspondant à la conséquence résiduelle après fonctionnement de la barrière (principe de mitigation).

2.3.4.2 Etape A2b : Classes de gravité a priori d’un phénomène dangereux

Cette étape consiste en une estimation (sans calcul) de la classe de gravité des scénarios envisagés. A ce stade les scénarios ne doivent pas être modélisés de façon précise ; seuls les scénarios retenus comme scénarios de référence à l’issue de MIRAS feront l’objet de modélisations. Cela fait l’objet de l’opération B.

Grille de gravité

MIRAS propose une grille en quatre classes de gravité (C₁ à C₄) en fonction de la nature des effets (sur l’homme, l’environnement ou comme source d’effet domino).

Tableau 11 : Définition des classes de gravité

CONSEQUENCES			CLASSE
Effet domino	Effet sur cibles humaines	Effets sur l’environnement	
<i>Voir note</i>	Pas de blessures ou blessures légères ne nécessitant pas d’arrêt de travail	Pas d’action nécessaire, simple observation	C ₁
<i>Voir note</i>	Blessures nécessitant une hospitalisation de durée supérieure à 24 heures	Sérieux effets sur l’environnement, nécessitant des moyens locaux d’intervention	C ₂
<i>Voir note</i>	Blessures irréversibles ou morts sur site Blessures réversibles à l’extérieur	Sérieux effets sur l’environnement à l’extérieur du site, nécessitant des moyens nationaux d’intervention	C ₃
<i>Voir note</i>	Blessures irréversibles ou morts à l’extérieur du site	Effets irréversibles sur l’environnement à l’extérieur du site, nécessitant des moyens nationaux d’intervention	C ₄

Remarque pour les effets domino : si un phénomène dangereux peut entraîner par effet domino un deuxième phénomène dangereux et que la classe de gravité de ce deuxième phénomène dangereux est plus élevée que celle du premier phénomène dangereux, la classe de gravité de ce dernier doit être augmentée à la classe de gravité du deuxième phénomène dangereux.

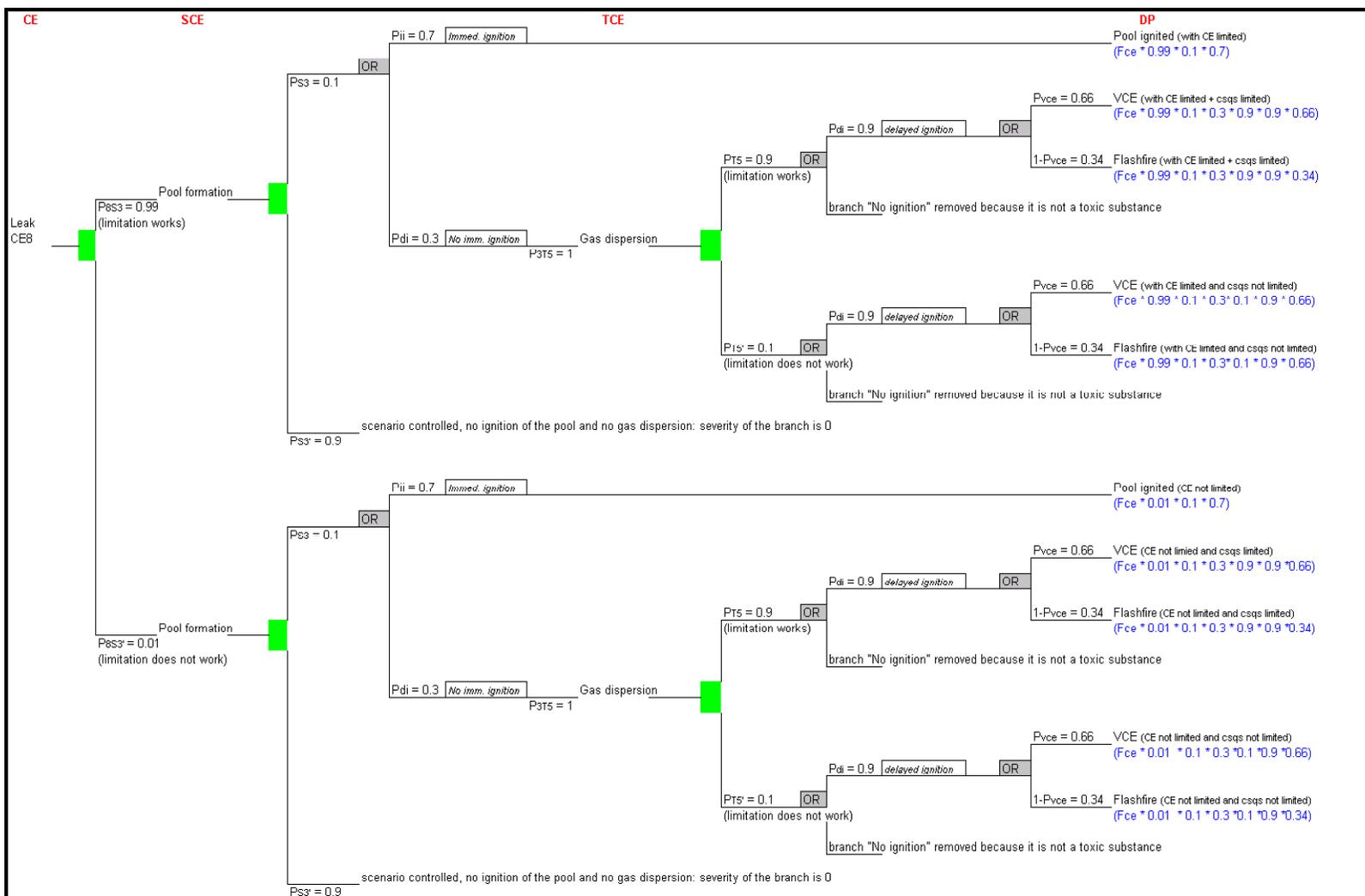


Figure 15 : Exemple d'arbre d'évènements avec prise en compte des barrières de sécurité

Choix d’une classe de gravité par type de phénomène dangereux

Au-delà de cette grille, ARAMIS propose également en fonction de la nature des phénomènes dangereux et des produits impliqués une classification a priori des phénomènes. En cas de doute, des calculs complémentaires peuvent être menés pour valider la classe de gravité correspondante.

<i>Phénomène dangereux</i>	<i>Classe de conséquences</i>
Feu de nappe	C2
Feu de cuve	C1
Jet enflammé	C2
VCE	C3 ou C4 (en fonction de la quantité émise)
Flashfire	C3
Nuage toxique	C3 ou C4 (en fonction des phrases de risques – C4 pour des substances très toxiques)
Feu	C2
Projection de missiles	C3
Création onde de surpression	C3
Boule de feu	C4
Dégâts à l’environnement	A juger sur site
Explosion de poussières	C2 ou C3 (en fonction de la substance et de la quantité)
Boilover et feu de nappe associé	C3

Tableau 12 : Estimation grossière des classes de gravité par phénomène dangereux

2.3.4.3 Etape A2c : Choix des scénarios de référence par la matrice de risques

A l’issue du travail réalisé dans MIMAH, l’ensemble des phénomènes dangereux a été identifié et caractérisé par :

- l’évaluation de la fréquence d’occurrence (incluant la probabilité de défaillance des barrières mises en place),
- l’estimation a priori de leur classe de gravité.

Les scénarios peuvent donc à ce stade être placés sur une matrice de risques, qui définit des critères d’acceptabilité et de sélection des scénarios en fonction de cette caractérisation en gravité / fréquence.

La matrice de risques comporte en abscisse la classe de gravité des phénomènes dangereux et en ordonnée la fréquence d’occurrence des phénomènes dangereux. La matrice est proposée comme un exemple ; ARAMIS s’est attaché à définir une méthodologie mais les valeurs seuils doivent être considérées comme des valeurs adaptables à chaque site étudié.

La zone verte (effets négligeables) correspond aux phénomènes dangereux avec une fréquence d’occurrence et/ou des conséquences suffisamment faibles pour ne pas être considéré comme représentatif du risque d’un établissement.

La zone jaune (effets moyens) correspond aux phénomènes dangereux dont la probabilité est tolérable et qui représente le niveau de risque moyen d’un établissement. Les phénomènes dans cette zone sont retenus pour la modélisation et constituent les scénarios de référence.

La zone rouge (effets importants) correspond à des phénomènes dangereux dont la probabilité d’occurrence n’est pas satisfaisant en l’état : des barrières complémentaires de sécurité doivent être rajoutées. Les phénomènes dans cette zone sont retenus pour la modélisation et font également partie des scénarios de référence.

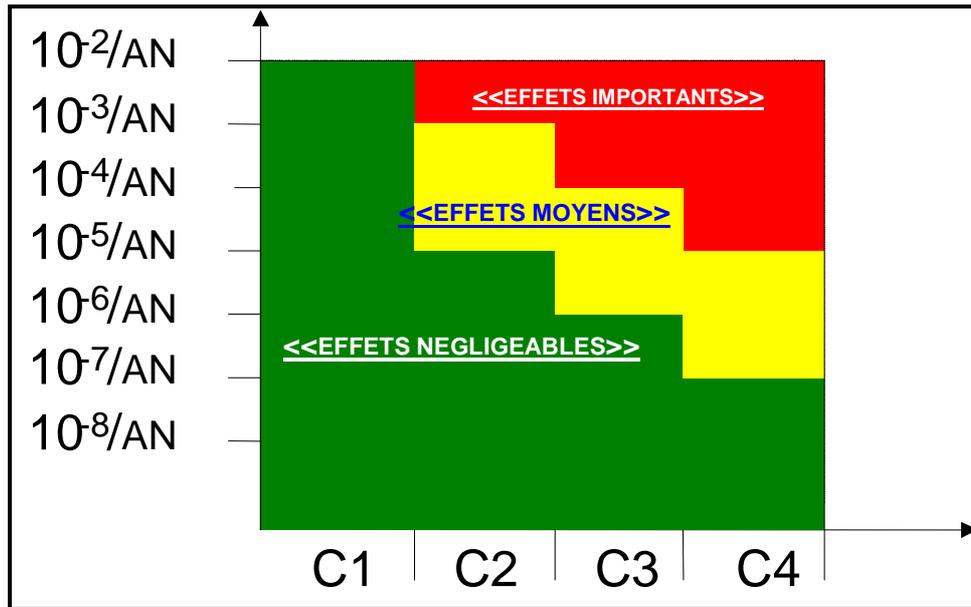


Figure 16: Matrice de Risques

Tous les phénomènes dangereux définis par les arbres génériques et issus de la prise en compte des barrières sont donc placés dans la matrice de risques : les scénarios retenus comme scénarios de référence sont ceux situés dans les zones jaune ou rouge.

Pour les scénarios ainsi retenus, les informations nécessaires à leur modélisation sont précisées dans le cadre de l'opération B.

2.4 DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES

La méthodologie de sélection des scénarios est une méthode simple qui se présente comme un outil pratique et facilement utilisable en groupe de travail. Il demande de passer davantage de temps avec l'Industriel par rapport à une analyse des risques classique. Toutefois l'expérience des études de cas montre que le temps passé à discuter l'architecture et le niveau de confiance des barrières avec l'instrumentiste, l'ingénieur process ou de maintenance enrichit notablement les discussions et les propositions d'amélioration du point de vue de la sécurité.

S'agissant ensuite de la matrice des risques, il faut rappeler que les seuils retenus à l'heure actuelle représente un consensus entre les partenaires du projet, qui mérite toutefois d'être encore discuté, testé et affiné au fur et à mesure des études de cas éventuelles.

La sélection des scénarios s'effectue selon des critères de probabilité et de gravité. Il est donc très important, une fois les arbres établis, que les données d'entrée sur les classes de fréquence soit fiables ou du moins fassent également l'objet d'un consensus solide. Deux difficultés se présentent avec la fin prochaine du projet :

- L'imprécision dans les chiffres de fréquences d'occurrence des événements initiateurs et les chiffres de probabilité conditionnelle des phénomènes dangereux;
- L'imprécision dans les niveaux de confiance des barrières de sécurité.

Pour améliorer la précision sur les niveaux de confiance des barrières, il serait intéressant :

- de mener des expérimentations sur les dispositifs techniques en appliquant strictement la norme CEI61511 afin de préciser les champs d'efficacité des barrières et valider les éléments éventuellement fournis par les constructeurs;
- de mener des études permettant d'évaluer les critères clef des barrières qui ont une influence directe sur leur niveau de confiance (par exemple autocontrôle, type de relayage, fréquence des tests, ancienneté du dispositif).

Les calculs de probabilité doivent être menés avec beaucoup de rigueur et peuvent nécessiter des calculs complémentaires à l'aide de logiciels plus élaborés (type QRA) lorsque le raisonnement en ordre de grandeur n'est plus suffisant pour hiérarchiser des scénarios ou prendre des décisions particulières. Il est à noter qu'une méthode simplifiée telle qu'ARAMIS s'avère généralement suffisante considérant les questions soulevées dans une étude des dangers, et réserve ainsi l'intérêt d'une modélisation QRA à quelques scénarios ou installations particulières à très forts enjeux.

3. OPERATION B : INDICE S CARTOGRAPHIE DE LA SEVERITE D'UN SITE INDUSTRIEL

3.1 OBJECTIFS

L'opération B consiste à apprécier le potentiel de risque représenté par un site industriel, à travers la modélisation de la sévérité de certains scénarios d'accident identifiés lors de l'opération précédente.

L'appréciation de ce potentiel de risque se traduit dans l'opération par l'élaboration de cartes de sévérité, sur le même principe que les cartes de vulnérabilité développées dans l'opération D. Pour garder toute sa pertinence, la carte de sévérité doit donc être construite indépendamment de celles de l'opération D. Pour ce faire, la cartographie est basée sur deux principes. D'abord la sévérité des scénarios est calculée à partir de seuils d'effets préétablis indépendants du nombre ou type de cibles dans l'environnement du site. Ensuite la sélection des scénarios dont la sévérité est modélisée correspond aux résultats de la méthode MIRAS, c'est-à-dire que les scénarios de référence choisis dans l'opération A sont considérés représentatifs du niveau de risque résiduel d'un site industriel.

Les informations données par une carte de sévérité, à laquelle pourra être superposée une carte de vulnérabilité, devraient finalement fournir tous les éléments pertinents à un décideur pour baser une politique de gestion des risques plus transparente et légitime.

3.2 ORGANISMES AYANT PARTICIPE A CETTE OPERATION

<i>Organisation</i>	<i>Tâches réalisées</i>
Universitat Politecnica de Catalunya Center for Studies on Technological Risk (CERTEC) - Espagne	Responsable de l'opération B, de l'élaboration des indices de sévérité et de la cartographie résultante.
Faculté Polytechnique de Mons Major Risk Research Centre (Belgique)	Responsable de l'étude bibliographique réalisée sur le calcul des termes sources et les modèles de dispersion.
Central Mining Institute (Pologne) Safety Management and Technical Hazards	Responsable de l'étude bibliographique réalisée sur les modèles d'explosion de gaz (VCE) et de poussières.
INERIS	Coordination de l'opération.

3.3 PRINCIPAUX RESULTATS

Les travaux décrits dans ce paragraphe sont un résumé des deux livrables disponibles en anglais sur ce sujet dans le projet ARAMIS, à savoir le D.2.B "Method for the calculation of the risk severity index" (janvier 2004) et D.2.C "The risk severity index" (juillet 2004).

L'opération B était structurée en quatre étapes successives qui sont reprises de manière détaillée dans le reste de ce paragraphe.

- **Opération B-1 : Recherche bibliographique**
Cette tâche a été achevée à la fin du premier semestre 2002.
- **Opération B-2 : Analyse et description des paramètres influençant l'indice S**
Il s'est agi de mettre en évidence et de décrire les différents paramètres influençant l'indice de sévérité S. Ce travail a été finalisé à la fin du premier semestre 2003.

- **Opération B-3 : Intégration des paramètres pour le calcul des indices de sévérité S**
 Cette étape consiste à mettre en place une méthode pour l'intégration des différents paramètres pour le calcul de l'indice S. Elle s'est déroulée au cours de l'année 2003.
- **Opération B-4 : Validation des cartes de sévérité à travers des études de cas**
 En 2004, la méthode de calcul de l'indice S a été testée et évaluée, en l'appliquant sur des accidents passés, suffisamment renseignés, ou en réalisation des études de cas en collaboration avec cinq industriels européens (opération E).

3.3.1 Opération B-1 : Recherche bibliographique

La revue bibliographique s'est achevée à la fin du premier semestre 2002. Les références bibliographiques relatives à l'opération B sont listées par thème au chapitre 9. Cette recherche a été menée sur les différents axes suivants :

- les indices de risque déjà existants utilisés pour l'évaluation du risque dans les domaines de la sécurité et de l'environnement,
- les méthodes d'évaluation des effets d'un phénomène accidentel : terme source, incendie, explosion (explosion de gaz, de poussières ou de solides), BLEVE, rejet toxique (instantané, continu), Boil-over...,
- les seuils des effets et les hypothèses de modélisation (notamment les conditions météorologiques) utilisés dans les différents pays européens.

3.3.1.1 Indices de risque

Les indices de risque trouvés lors de la revue bibliographique se répartissent en 4 catégories:

- Les indices de risque basés sur une définition mathématique du risque (risque = gravité × fréquence) sont très généraux et ne sont pas spécifiques à un risque donné.
Exemples : Fine risk index, Hazard Rating number...
- Les indices de risque relatifs à l'incendie, qui sont applicables à des installations du type bâtiments commerciaux et industriels, logements, etc..., sans tenir compte de l'activité réalisée à l'intérieur. Les paramètres essentiels sont la quantité et le type de substances combustibles impliquées.
Exemples : Purl index, Eric index...
- Les indices de risque basés sur les dangers associés aux substances, où les risques associés à l'incendie, l'explosion, la dispersion toxique, etc... sont analysés.
Exemples : IFAL index, Dow index, Mond index...
- Les indices utilisés pour estimer le coût généré par les accidents industriels, qui permettent d'orienter la prise de décision, pour les primes d'assurance par exemple.
Exemples : Cost update indexes...

En définitive, les indices de risques les plus proches de la problématique d'analyse des risques pour la prévention des accidents majeurs sur les installations industrielles sont de 2 types :

- Les indices définissant les dangers intrinsèques des substances, indépendamment de leur utilisation. Ils sont généralement construits de manière mathématique simple, en utilisant les propriétés physico-chimiques et toxicologiques des produits. Les valeurs obtenues peuvent être utilisées par la suite directement ou avec des facteurs correctifs pour le calcul d'indices plus élaborés.

- Les indices permettant d'évaluer le risque associé à une installation industrielle. Ils consistent en général en un facteur représentant les dangers intrinsèques du produit impliqué, auquel sont associés un ensemble de facteurs de pénalité et de sécurité. Les facteurs de pénalité sont fonction de conditions telles que la température, la pression, l'existence d'une réaction exothermique, etc. qui influencent l'ampleur des conséquences d'un éventuel accident. Les facteurs de pénalité augmentent la valeur de l'indice. Les facteurs de sécurité réduisent la valeur de l'indice de risque et permettent de tenir compte des éléments (existence d'un système de contrôle, de moyens de lutte contre l'incendie) dans le système étudié qui sont de nature à réduire la fréquence d'occurrence d'un accident ou la gravité des conséquences.

Il apparaît néanmoins que ces indices de risque sont soit trop généraux, soit trop spécifiques pour être utilisés dans le contexte Seveso II de la prévention des accidents majeurs.

3.3.1.2 Modèles d'évaluation des effets des phénomènes accidentels

La revue bibliographique concernant les modèles mathématiques permettant l'évaluation des effets accidentels a porté sur les éléments suivants : terme source, dispersion atmosphérique, incendie et explosion, Boil-over et BLEVE. L'inventaire réalisé montre la grande diversité des modèles mathématiques existants pour prédire les effets des accidents majeurs.

Une sélection de modèles a été réalisée, sur la base des critères de sélection suivants :

- complexité des modèles et de résolution des équations,
- précision des calculs,
- quantité ou disponibilité des informations d'entrée nécessaires pour l'utilisation du modèle,
- disponibilité et facilité d'accès aux modèles (ensemble d'équations et/ou logiciels),
- degré d'acceptation et utilisation reconnue par la communauté scientifique.

L'objectif de cette sélection n'était pas de comparer les différents modèles entre eux, mais de retenir les modèles qui pourront être utilisés dans la méthode de calcul de l'indice S. **Il est important de noter toutefois que l'indice S pourra être calculé quel que soit le modèle mathématique choisi par l'utilisateur pour l'évaluation des conséquences.**

3.3.1.3 Seuils d'effets

L'ensemble des partenaires européens travaillant sur le projet ARAMIS ont été interrogés afin de connaître les seuils d'effets (thermiques, surpression, inhalation toxique, effets missiles) utilisés dans leurs pays pour l'évaluation des conséquences des phénomènes accidentels.

Les données recueillies à ce jour concernent la Belgique, l'Espagne, l'Italie et la France.

On remarque que les valeurs de seuils d'effets adoptées par chaque pays sont hétérogènes. Il y a également deux approches, suivant les pays. Dans le premier cas, les seuils choisis permettent de définir des zones pour mettre en œuvre l'organisation et l'intervention adéquates des secours (Espagne, Italie). Dans le deuxième cas, les seuils choisis permettent de définir des zones caractérisant les effets directs sur les hommes et / ou les structures (France, Belgique). Ce travail est notamment toujours poursuivi en lien avec le groupe de travail européen Land-Use Planning ainsi que le projet ACUTEX s'agissant d'harmonisation des seuils d'effets toxiques utilisés en Europe.

3.3.2 Opération B-2 : Description des paramètres influençant l'indice S

3.3.2.1 Phénomènes dangereux et événements majeurs considérés

Pour la construction de l'indice de sévérité S, sont pris en compte des phénomènes dangereux (feu de nappe, VCE, nuage toxique...) et leurs événements majeurs correspondants identifiés suite à l'application des méthodes développées dans l'opération A.

La méthode MIMAH considère 13 phénomènes dangereux et 4 types d'événements majeurs, les liens entre les 2 notions étant donnés dans le Tableau 13 ci-après. Les événements majeurs représentent les effets engendrés par chacun des phénomènes dangereux et sont la base du calcul de l'indice S. Il est à noter qu'un phénomène dangereux peut avoir plusieurs événements majeurs associés. Les événements majeurs considérés sont les suivants : effets thermiques, effets de surpression, effets toxiques et effets missiles.

<i>Phénomènes dangereux</i>		<i>Evènements majeurs</i>			
		EM 1 Effets thermiques	EM 2 Effets de surpression	EM 3 Effets missiles	EM 4 Effets toxiques
Feu de nappe	PhD 1	X			X
Feu de bac	PhD 2	X			X
Feu de torche	PhD 3	X			
VCE	PhD 4	X	X	X	
Flash fire	PhD 5	X			
Nuage toxique	PhD 6				X
Feu de solides	PhD 7	X			X
Emission de missiles	PhD 8			X	
Ondes de surpression	PhD 9		X		
Boule de feu	PhD 10	X			
Pollution environnementale	PhD 11				X
Explosion de poussières	PhD 12	X	X	X	
Boil-over	PhD 13	X			

Tableau 13 : Liens entre phénomènes dangereux et événements majeurs

3.3.2.2 Analyse des niveaux d'effets

Pour chaque type d'événement, il a été convenu de définir 4 catégories de niveaux d'effets, qui seront mis en correspondance avec des intervalles de valeurs de l'indice de sévérité S, comme explicité dans le tableau suivant :

<i>Classes</i>	<i>Indice de Sévérité S</i>	<i>Description</i>
1	$S < 25$	Peu ou pas d'effets
2	$25 \leq S < 50$	Effets réversibles
3	$50 \leq S < 75$	Effets irréversibles
4	$75 \leq S \leq 100$	Début des effets létaux

Tableau 14 : Correspondance entre les classes et les valeurs de l'indice S

La zone définie au-delà de la valeur de sévérité 100 représente soit la possibilité d'effets dominos soit un seuil de grande létalité notamment pour les substances toxiques.

Chaque classe de sévérité a été mise en relation avec des seuils d'effets thermiques, de surpression, toxiques et missiles, dans une première tentative d'extrapolation des seuils recensés et utilisés dans les différents pays européens.

Valeur de S	Effets thermiques (stationnaire et non-stationnaire)	Flash-fire (% LIE)	Effets de surpression (mbar)	Missiles	Effets toxiques
	t = 60 s				t = 1 h
0	1 kW/m ²	1/60 LIE	10	N/A	0,1 TEEL1
25	1,8 kW/m ²	1/6 LIE	30		TEEL1
50	3 kW/m ²	1/3 LIE	50		TEEL2
75	5 kW/m ²	½ LIE	140		TEEL3
100	8 kW/m ²	LIE	250		

Tableau 15 : Définition des niveaux d'effets

Les valeurs dans le tableau ont été établies car elles sont nécessaires pour le développement et l'application de la méthode. Ces premières propositions ne sont pas à considérer comme un travail d'harmonisation des seuils, problème essentiellement politique et qui requiert encore en soi un important travail de recherche et de consensus.

3.3.2.3 Interpolation de l'indice S en dehors des valeurs seuils

Dans une première approche dont le but est d'obtenir des ordres de grandeur d'effets comparables entre eux (différents phénomènes), l'interpolation des valeurs S entre 0 et 100 est simplement obtenue par régression linéaire entre chacun des quatre segments définis dans le Tableau 15.

Ces équations de régression linéaire sont données à titre indicatif pour chaque type d'effet à considérer. Pour plus de détail, le lecteur pourra se reporter au livrable D1B.

Classes	Relation entre S et la dose thermique (stationnaire et non-stationnaire)	Domaine de validité	Equation
1	$S = 0,1903 \cdot q^{(4/3)} \cdot t$	$q^{(4/3)} \cdot t \leq 131,4$	Eq. 1
2	$S = 0,195 \cdot q^{(4/3)} \cdot t - 0,6161$	$131,4 < q^{(4/3)} \cdot t \leq 259,6$	Eq. 2
3	$S = 0,0987 \cdot q^{(4/3)} \cdot t + 24,39$	$259,6 < q^{(4/3)} \cdot t \leq 513$	Eq. 3
4	$S = 0,0559 \cdot q^{(4/3)} \cdot t + 46,31$	$513 < q^{(4/3)} \cdot t \leq 960$	Eq. 4

Tableau 16 : Relation entre S et la dose thermique

Classes	Relation entre S et la surpression	Domaine de validité	Equation
1	$S = 0,833 \cdot \Delta P$	$\Delta P \leq 30$	Eq. 5
2	$S = 1,25 \cdot \Delta P - 12,5$	$30 < \Delta P \leq 50$	Eq. 6
3	$S = 0,278 \cdot \Delta P + 36,11$	$50 < \Delta P \leq 140$	Eq. 7
4	$S = 0,833 \cdot \Delta P + 43,182$	$140 < \Delta P \leq 250$	Eq. 8

Tableau 17 : Relation entre S et la surpression

Classes	Relation entre S et la toxicité	Equation
1	$S = \frac{25}{TEEL1} \cdot C_{eq}$	Eq. 9
2	$S = \frac{25}{(TEEL2 - TEEL1)} \cdot (C_{eq} + TEEL2 - 2 \cdot TEEL1)$	Eq. 10

Classes	Relation entre S et la toxicité	Equation
3	$S = \frac{25}{(TEEL3 - TEEL2)} \cdot (C_{eq} + 2 \cdot TEEL3 - 3 \cdot TEEL2)$	Eq. 11
4	$S = \frac{25}{(6^{1/n} - 1) \cdot TEEL3} \cdot C_{eq} + \frac{(75 \cdot 6^{1/n} - 100)}{(6^{1/n} - 1)}$	Eq. 12

Tableau 18 : Relation entre S et les valeurs seuils de toxicité

3.3.2.4 Cartographie des différents indices de sévérité calculés

Au-delà des simples corrélations avec les seuils d’effets, afin de représenter la sévérité d’un scénario sous une forme cartographique et de faciliter la création de cette nouvelle couche dans un SIG (donc comparable à une carte de vulnérabilité), il était primordial de pouvoir exprimer S en fonction de la distance par rapport à l’origine d’un scénario.

5 distances sont nécessaires pour une cartographie pertinente de la sévérité d’un scénario.

Indice de sévérité S	Distance
0	d ₀
25	d ₁
50	d ₂
75	d ₃
100	d ₄

Tableau 19 : Valeurs de S et les 5 distances calculées d₀ à d₄

Ces distances sont déterminées à partir des modèles d’évaluation des conséquences, pour les différents types de phénomènes dangereux. A n’importe quelle distance de l’origine du scénario, une approximation de S est obtenue simplement à travers les équations suivantes :

Relation entre S et la distance	Domaine de validité	Equation
$S = \frac{25}{(d_1 - d_0)} \cdot x - \frac{25 \cdot d_0}{(d_1 - d_0)}$	d ₁ < x < d ₀	Eq. 13
$S = \frac{25}{(d_2 - d_1)} \cdot x + \frac{(25 \cdot d_2 - 50 \cdot d_1)}{(d_2 - d_1)}$	d ₂ < x < d ₁	Eq. 14
$S = \frac{25}{(d_3 - d_2)} \cdot x + \frac{(50 \cdot d_3 - 75 \cdot d_2)}{(d_3 - d_2)}$	d ₃ < x < d ₂	Eq. 15
$S = \frac{25}{(d_4 - d_3)} \cdot x + \frac{(75 \cdot d_4 - 100 \cdot d_3)}{(d_4 - d_3)}$	d ₄ < x < d ₃	Eq. 16

Tableau 20 : Expression de S en fonction de la distance

A ce stade, il est important de noter que le choix est laissé à l’utilisateur d’utiliser le modèle mathématique qui lui semble le plus pertinent, permettant de calculer la décroissance des effets en fonction de la distance par rapport à l’origine de l’accident.

La proposition de modèles spécifiques par type de phénomène au regard de l’existant est un travail de recherche à part entière qui serait par ailleurs une suite intéressante à donner à cette partie du projet ARAMIS.

3.3.3 Opération B-3 : Elaboration des cartes de sévérité finales

3.3.3.1 Combinaison des indices de sévérité liés à différents scénarios

A partir d'un nœud papillon donné, un indice de sévérité S_{EC} est calculé pour un événement critique central donné. Pour un événement critique, il s'agit donc d'agréger des différents indices de sévérité spécifiques associés à chacun des phénomènes dangereux (et de leurs effets) générés par cet événement critique. La distribution des probabilités d'occurrence entre les phénomènes dangereux est alors prise en compte (exploitation de l'arbre d'évènements) sur la base du retour d'expérience.

Ainsi, l'expression de S_{EC} est donnée ci-dessous :

$$S_{EC}(d) = \sum_{i=1}^n P_{PhDi} \times S_{PhDi} (d) \quad \text{Eq. 17}$$

- où : d est la distance par rapport à l'origine de la fuite ou du phénomène dangereux,
- n est le nombre de phénomènes dangereux,
- P_{PhDi} est la probabilité d'occurrence du phénomène dangereux $PhDi$,
- $S_{PhDi} (d)$ est l'indice de risque spécifique associé au phénomène dangereux $PhDi$.

Lorsqu'en un point donné à l'extérieur du site, plusieurs scénarios produisent des effets cumulés, la règle d'agrégation des différents indices S est alors la combinaison des indices de sévérité de chaque évènement critique considéré et leur fréquence d'occurrence.

$$S(d) = \sum_{j=1}^m F_{CEj} \times S_{CEj} (d) \quad \text{Eq. 18}$$

- où : d est la distance par rapport à l'origine de la fuite ou du phénomène dangereux,
- n est le nombre d'évènements critiques associés à l'installation,
- F_{CEj} est la fréquence d'occurrence de l'évènement critique CEj ,
- $S_{CEj} (d)$ est l'indice de sévérité associé à l'évènement critique CEj .

Les valeurs obtenues en employant l'équation 18 sont comprises entre 0 et 1,2 d'après un premier retour provenant des études de cas. Ces valeurs ont donc été normalisées pour obtenir une échelle résultante entre 0 et 1000, pour l'ensemble d'une installation.

<i>Indice de sévérité S d'une installation</i>	<i>Description</i>
$S \geq 750$	Très élevé
$500 \leq S < 750$	Elevé
$300 \leq S < 500$	Elevé / Moyen
$100 \leq S < 300$	Moyen
$75 \leq S < 100$	Moyen / Faible
$10 \leq S < 75$	Faible
$S < 10$	Très faible

Tableau 21 : Echelle d'indice de sévérité S d'une installation

3.3.3.2 Prise en compte de la rose des vents dans la cartographie

De manière à simplifier les modalités de calcul, il a été décidé de calculer les distances d_0 à d_4 en considérant :

- des conditions météorologiques forfaitaires. L'ensemble des partenaires s'est accordé sur les couples (F,2) et (D,5) à retenir pour les modélisations.
- huit directions pour représenter la rose des vents et une probabilité d'obtenir chaque direction de vent normalisée par rapport à la probabilité la plus importante.

Cette procédure de prise en compte de la rose des vents dans la cartographie de la sévérité est résumée dans le logigramme ci-dessous.

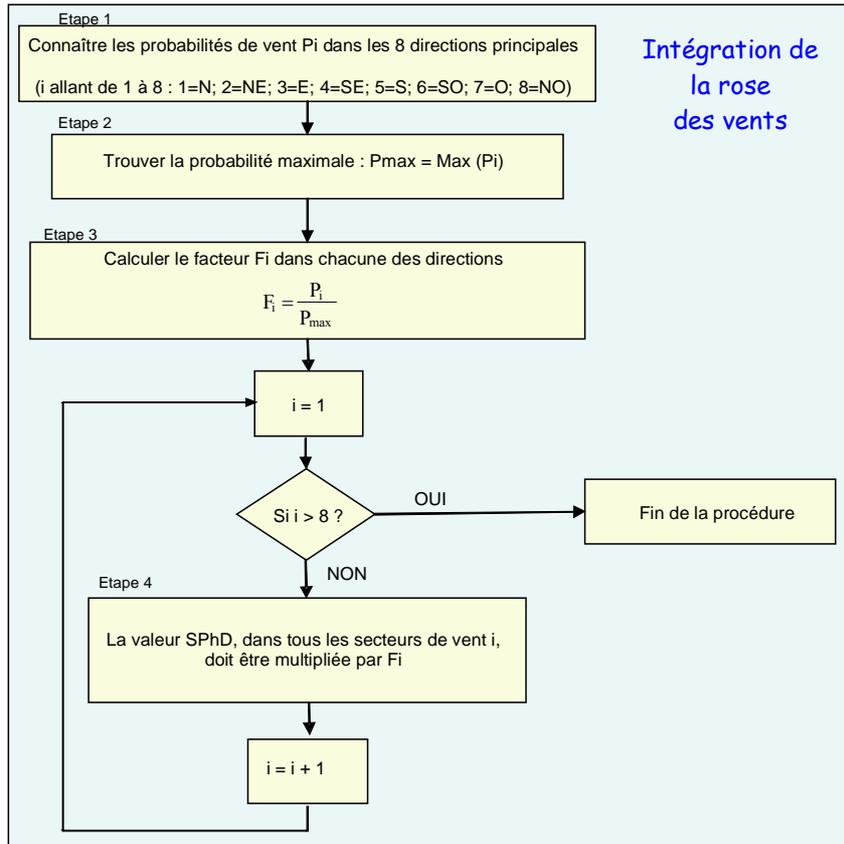


Figure 17 : Procédure pour tenir compte de la rose des vents

3.3.3.3 Cartographie des indices de sévérité

La méthode développée et l'interface avec un logiciel SIG permettent de produire les cartes de sévérité suivantes :

- Cartographie de l'indice de sévérité spécifique associé à chaque phénomène dangereux (SPhD) (valeurs comprises entre 0 et 100),
- Cartographie de l'indice de sévérité associé à un événement critique (SEC) (valeurs comprises entre 0 et 100),
- Cartographie de la sévérité d'une installation, par type d'effets (effets toxiques, effets de surpression, effets thermiques, pollution).
- Cartographie de l'indice de sévérité global S (valeurs comprises entre 0 et 1000).

3.3.4 Opération B-4 : Application des cartes de sévérité dans les études de cas

Le paragraphe suivant reprend les cartes de sévérité expérimentales notamment produites lors de l'étude de cas réalisée en France. Ces cartes sont discutées puis mises en perspective directement dans le paragraphe suivant qui propose également d'autres pistes de recherche.

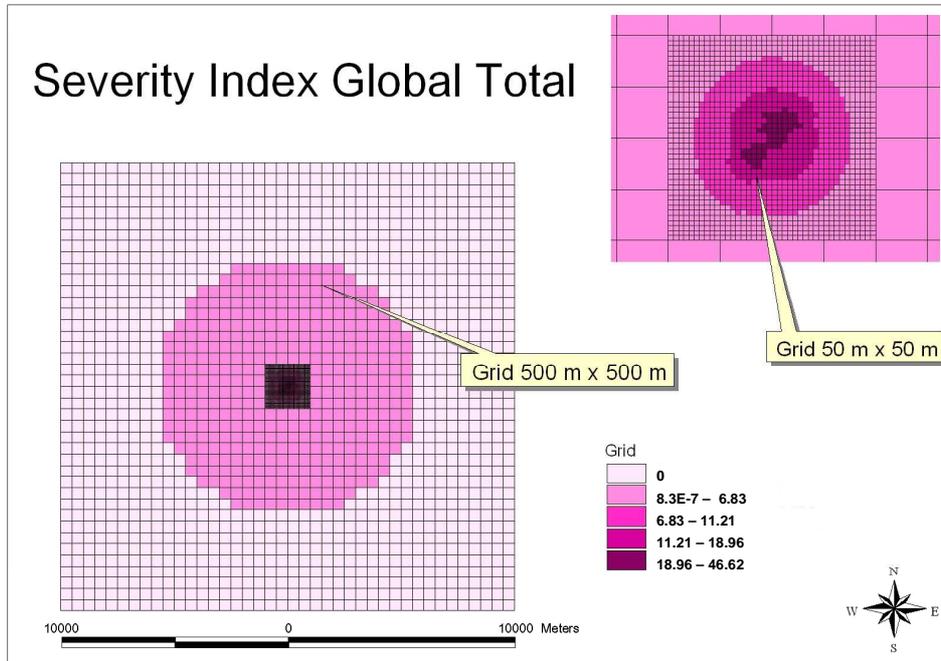


Figure 18 : Indice de sévérité total, pour une installation

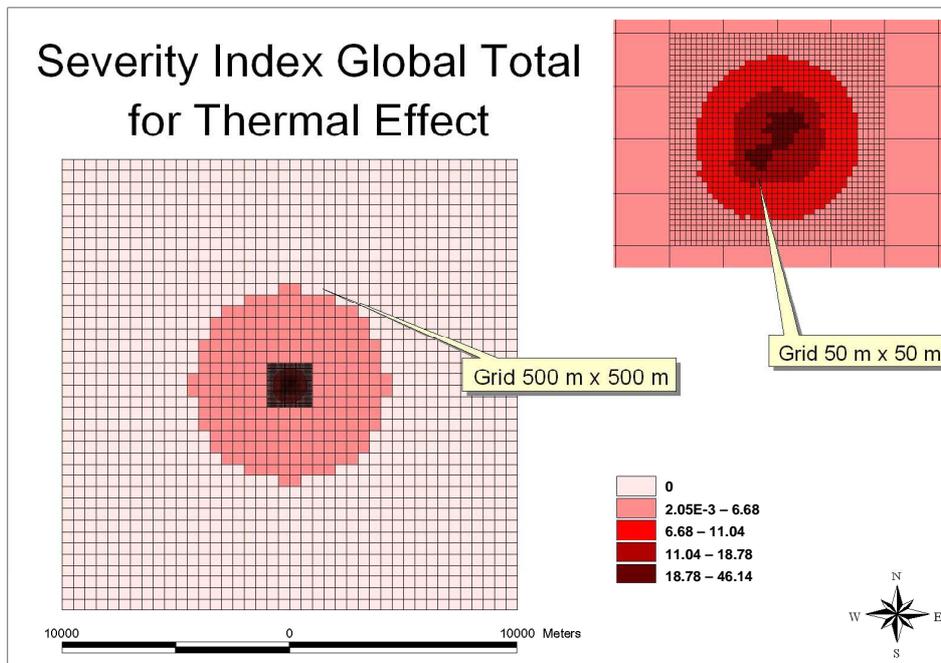


Figure 19 : Indice de sévérité effets thermiques, pour une installation

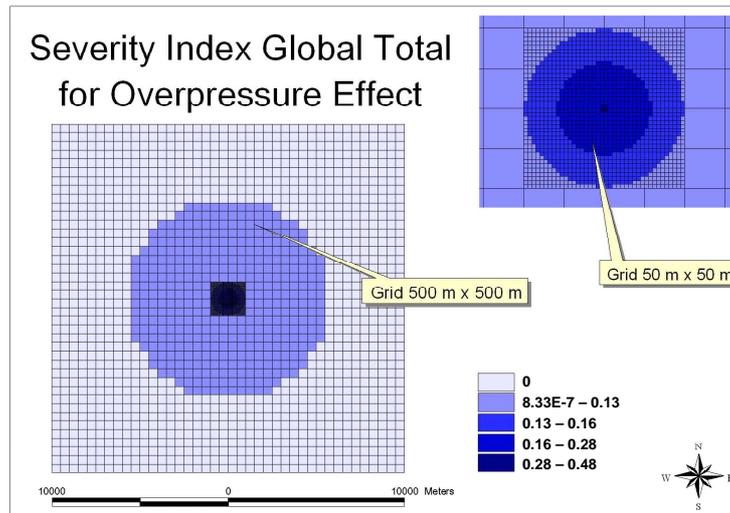


Figure 20 : Indice de sévérité effets de surpression, pour une installation

3.4 DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES

A l'issue des études de cas, le premier point qui ressort fortement est la difficulté d'interprétation des cartes de sévérité. Si l'on passe en revue la méthode d'élaboration de ces cartes, on peut d'ores et déjà faire le bilan des points positifs et négatifs suivants.

Tout d'abord au niveau d'un scénario, l'indice de sévérité et donc la carte de sévérité résultante possèdent un sens physique. Par exemple, la valeur 75 correspond grossièrement au début des effets létaux, tout phénomène confondu. Ce travail de comparaison des phénomènes dangereux entre eux s'avère très utile et très pertinent pour un décideur. Il est bien sûr basé sur la définition préalable de seuils d'effets. Au-delà du travail de défrichage réalisé dans ARAMIS, on ne peut qu'encourager une réflexion approfondie sur ce sujet et une harmonisation politique de ces valeurs au plan national voire européen.

Lorsque la cartographie intègre plus d'un scénario (équation 18), le sens physique de la valeur représentée disparaît et l'échelle obtenue dans les figures précédentes devient très difficile à analyser. Encore plus important, ce mode de combinaison de la sévérité de différents scénarios peut introduire des biais importants qu'il convient de signaler :

- En utilisant l'équation 18, plus on considère de scénarios de référence dans l'équation 18, plus la sévérité résultante est importante. Or le nombre de scénarios sélectionnés reste arbitraire même s'il dérive de l'application d'une matrice de risque. En pratique, le nombre de scénarios envisageables dans un établissement Seveso est quasi-infini.
- Cette équation 18 donne aussi trop de poids à la fréquence du scénario par rapport à la valeur de sévérité résultante. Par exemple, en un point donné, un scénario A ($S=75$, $F=10^{-5}$) donne une sévérité de 0,62. Un scénario B ($S=25$, $F=10^{-3}$) donne une sévérité de 20,83. En ce point donné, le scénario B qui correspond à l'apparition d'effets réversibles possède un poids final 30 fois plus important que le scénario A correspondant à un risque léta.

Pour remédier à ces problèmes, plusieurs solutions peuvent être envisagées. Il est possible d'introduire un coefficient ou un exposant per mettant de réduire le poids de la fréquence dans la formule. Ceci introduit toutefois encore plus de subjectivité dans la formule.

Une autre possibilité sachant que la cartographie possède du sens physique pour un seul scénario (équation 17) serait d'agréger différemment les valeurs disponibles en un point donné dans l'environnement du site. Ainsi lorsque les effets de plusieurs scénarios sont à combiner en un point, deux types d'information pourraient simplement être cartographiés.

- On peut attribuer aux coordonnées du point, la **sévérité maximale des différents scénarios pour une plage de fréquence définie à l'avance**. Une telle cartographie permet de cerner la limite des effets réversibles, irréversibles létaux pour une période prise en référence, à l'image des cartes disponibles pour des risques naturels (crue centennale pour les inondations).

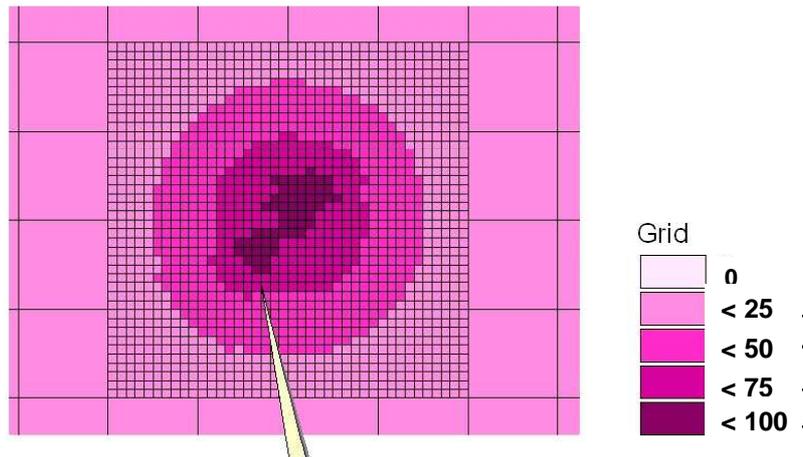


Figure 21 : Exemple de la sévérité d'un site industriel sur 100 000 ans

- On peut attribuer aux coordonnées du point, la **fréquence maximale des différents scénarios pour une plage de sévérité définie à l'avance**. Une telle cartographie permet de cerner la probabilité d'obtenir un effet particulier (début des effets létaux) dans l'environnement d'un site, synthèse beaucoup plus proche de la notion de risque individuel rencontrée dans les méthodes probabilistes quantifiées.

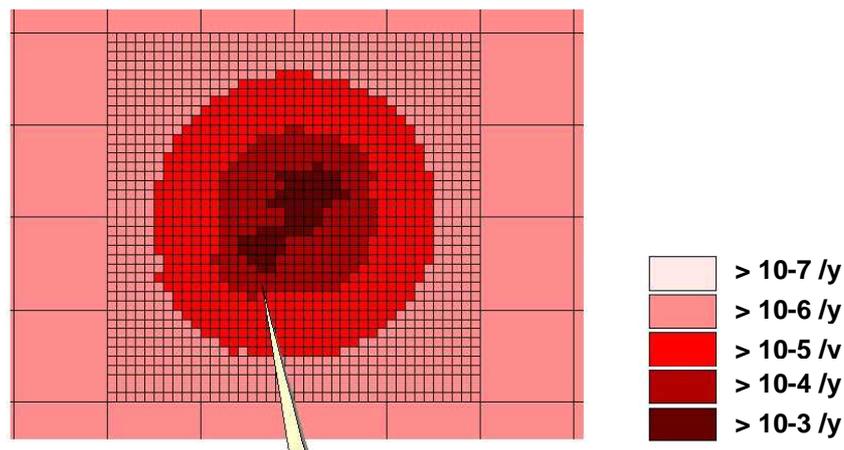


Figure 22 : Probabilité d'observer des effets létaux ($S=75$) à l'extérieur du site

La manière dont est conçue la méthode ARAMIS et l'interface construite avec un logiciel SIG rendent très faciles l'élaboration de ces deux types de cartes. Elles sont de plus faciles à interpréter ou à expliquer à un non-spécialiste et conservent un sens physique fort. L'étape suivante est de les comparer aux différentes cartes de vulnérabilité obtenues séparément.

4. OPERATION C : INDICE M INFLUENCE DU MANAGEMENT DE LA SECURITE

4.1 OBJECTIFS

Les industriels et les pouvoirs publics ont besoin de méthodologies et d'outils nouveaux pour évaluer la performance de la maîtrise des risques d'accidents majeurs sur un établissement donné. La maîtrise de ces risques repose notamment sur l'organisation mise en place pour gérer les barrières de défense identifiées au moment des analyses de risques.

Dans le cadre du projet ARAMIS, l'opération C a pour objet d'évaluer l'influence du management de la sécurité sur la maîtrise des risques d'accidents majeurs sur site. Il s'agit :

- d'effectuer le lien entre le management et les performances attendues des barrières caractérisées pendant l'analyse de risque,
- d'évaluer l'influence de l'organisation mise en place sur un site sur le niveau de confiance attendu des différentes barrières.

L'objet de ce chapitre est d'expliquer plus précisément comment est structurée l'évaluation de l'influence de la gestion de la sécurité sur un site industriel donné, et donc la performance de la maîtrise des risques. Le résultat final de l'opération, l'indice M, prend la forme :

- d'un maintien des niveaux de confiance des barrières aux valeurs identifiées pendant l'analyse de risques dans le cas d'une évaluation correcte de l'organisation. Le niveau de confiance attendu est alors considéré comme optimal.
- d'un déclassement du niveau de confiance attendu des barrières de défense dans le cas où l'évaluation de l'organisation est considérée comme moyenne ou faible.

4.2 ORGANISMES AYANT PARTICIPE A CETTE OPERATION

<i>Organisation</i>	<i>Département</i>
Risoe National Laboratory Systems Analysis Department (Danemark)	Responsable de l'opération C, et notamment de la méthode d'évaluation de la culture sécurité d'un site
Delft University of Technology Safety Science Group (Pays-Bas)	Responsable de l'élaboration du modèle et de l'outil d'évaluation du système de management des barrières
Central Mining Institute (Pologne) Safety Management and Technical Hazards	Responsable de la comparaison entre le modèle de management développé par TUD et les principales normes et standards de management existants sur le marché
Ecole des Mines de Paris Pôle Cindyniques (France)	Responsable de la validation du modèle de management de TUD par comparaison avec leur méthode interne PERM
INERIS	Coordination de l'opération et coopération avec TUD pour confronter le modèle de management MIRIAM et celui développé dans I-RISK.

4.3 PRINCIPAUX RESULTATS

L'organisation de la sécurité sur un site industriel, notamment à travers la gestion des barrières de défense dont elle doit assurer la performance, a été décrite et étudiée dans cette opération sous deux dimensions.

La première dimension est structurelle. Elle correspond au système formel de gestion de la sécurité mis en place sur le site et à son fonctionnement. Cette dimension de l'organisation est évaluée par un outil de type protocole d'audit.

La seconde dimension non moins essentielle a été qualifiée culture sécurité. Elle correspond au fonctionnement de l'entreprise au travers des pratiques réelles mises en œuvre ou perçues comme telles par les acteurs du système. Cette dimension de l'organisation est caractérisée par un second type d'outil complémentaire de l'audit : il s'agit d'un questionnaire sécurité rempli directement par un échantillon d'opérateurs et de managers intermédiaires.

4.3.1 Etat de l'art

4.3.1.1 Modèles de management

La création du modèle organisationnel a bénéficié des travaux qui ont déjà tenté de concevoir une interface entre les évaluations techniques représentées dans des arbres de causes et les aspects organisationnels, dont les représentations n'en sont encore qu'à leur début.

Ces travaux sont par exemple :

- Manager (Technica 1988)
- PRIMA (Hurst et al. 1996)
- I-Risk (Bellamy et al. 1999)
- Work Process Analysis Method (WPAM) (Davoudian et al.)

Ces méthodes cherchent toutes à mettre en relation des évaluations des systèmes de management de la sécurité qui se font par les audits et les évaluations techniques.

La conclusion de ces travaux est que la connexion nécessaire entre les paramètres issus des évaluations techniques et le modèle organisationnel n'est pas possible d'un point de vue pratique, car la complexité engendrée par ce type d'approche ne permet pas de refléter un niveau de risque qui prendrait en compte tous les paramètres. Plutôt que de connecter à l'ensemble des événements contenu dans les arbres des causes, il est possible de réduire ce travail en focalisant sur les barrières de défense du système. Ce qui réduit en principe grandement le nombre de connexions à établir entre l'analyse technique et organisationnelle.

La création du modèle organisationnel utilisé dans ARAMIS est fondée sur la maîtrise des activités liées au cycle de vie des barrières. Il s'agit donc d'un modèle orienté en processus à l'image du nouveau standard ISO 9000 version 2000. Ce modèle est notamment construit sur la confrontation des modèles d'organisation développés dans le projet européen I-Risk et le projet MIRIAM⁴.

4.3.1.2 Dimension culturelle de l'organisation

Le modèle de culture ou de climat sécurité dans l'entreprise développé dans ARAMIS est issu de l'expérience et du savoir-faire du Risoe National Laboratory acquis notamment dans les domaines maritime et hospitalier puis transposé au domaine de la prévention des accidents majeurs.

⁴ Comparison between two organisational models for major hazard prevention. J-C Le Coze, E. Plot & D. Hourtolou - INERIS, A.R Hale - Safety Science Group, TU Delft. ESREL, 2003, Maastricht.

4.3.2 Interface entre management et performance des barrières

Les fonctions de sécurité se décomposent en trois sous-fonctions (détection, diagnostic, action). Une fonction de sécurité peut être remplie de plusieurs manières suivant les objectifs de sécurité attendus notamment en ce qui concerne le temps de réponse et le niveau de confiance. Par exemple, dans le cas de l'arrêt d'une installation, il est possible de prévoir une détection associée à l'enclenchement d'un automatisme qui agit pour arrêter une partie de l'installation. Il est également possible de considérer qu'un opérateur recevra cette information et sera chargé d'enclencher une action. Cette action peut être locale, actionnée à distance ou même nécessiter une séquence d'actions ou d'opérations complexes.

Le principe de cette sous-opération a donc consisté à regrouper les barrières en une typologie selon leur mode de défaillance ou de gestion. Dans un second temps il s'est agi de décliner l'évaluation du modèle organisationnel développé selon les particularités de chaque type de barrières. La typologie des barrières retenue est présentée ci-après.

4.3.2.1 Typologie des barrières

Les barrières de défense sont soit des barrières techniques de sécurité (matériel), soit des barrières humaines soit une combinaison de ces deux types de barrières. Sommairement, les barrières sont regroupées en trois catégories pouvant se décliner en sous-catégorie suivant les combinaisons possibles. Les trois catégories de barrières sont les suivantes :

- Barrières passives : barrières en fonctionnement permanent ne demandant pas d'actions humaines, de sources d'énergie (hormis quelques exceptions : p.e. protection anti-corrosion catalytique) et de diagnostic préalablement à leur action.
- Barrières actives : ce type de barrières demande un diagnostic préalable de la situation pour une action proportionnée. Ce type de barrière demande une source d'énergie pour en assurer le fonctionnement et son fonctionnement met en œuvre du matériel (fonctionnement mécanique, électrique ou électronique).
- Barrières humaines : l'efficacité de ce type de barrière est liée aux mécanismes de l'agir humain (détection, observation, décision, réalisation d'une tâche, ...).

Les différentes combinaisons possibles de ces trois catégories sont listées ci-dessous.

	Barrière	Exemples	Détection	Diagnostic / Activation	Action
1	<i>Permanente – passive</i>	Peinture anti-corrosion, support de cuve, écran flottant, ...	-	-	Matériel
2	<i>Permanente – passive</i>	Rétention, mur coupe-feu, disque de rupture, ...	-	-	Matériel
3	<i>Temporaire – passive</i> Mis en place (ou retirée) par une personne	Barrières de protection d'une zone de travaux, casques/gants, inhibiteur dans une solution, ...	-	-	Matériel
4	<i>Permanente – active</i>	Protection anti-corrosion catalytique, système de chauffage et de refroidissement, ventilation, évent d'explosion, système d'inertage, ...	-	(peut nécessiter l'activation par un opérateur)	Matériel

	Barrière	Exemples	Détection	Diagnostic / Activation	Action
5	<i>Active – matériel fonctionnant à la demande et réutilisable</i>	Soupape de sécurité, installation de sprincklage, ...	Matériel	Matériel	Matériel
6	<i>Active – automatique</i>	Système de mise en sécurité automatique	Matériel	Matériel / logiciel	Matériel
7	<i>Active – manuelle</i> L'action humaine est déclenchée par un système de détection	Arrêt d'urgence, ajustement de paramètre sur alarme de production, évacuation ou appel service de secours sur alarme, ...	Matériel	Humain	Humain / système de régulation
8	<i>Active – avertissement passif</i> L'action humaine est conditionnée par un avertissement passif	Interdiction de fumer, panneau d'indication de danger (travaux, circulation...)	Matériel	Humain	Humain
9	<i>Active – assistée</i> Un logiciel présente un diagnostic à un opérateur	Utilisation d'un système expert	Matériel	Logiciel – humain	Humain / système de régulation
10	<i>Active – procédure</i> Observation des conditions locales par un opérateur	Procédure de démarrage ou d'installation, étalonnage d'un appareil, opération de dépotage, ...	Humain	Humain	Humain / système de régulation
11	<i>Active – situations d'urgence</i> Réponse humaine improvisée suite à l'observation des conditions locales	Réponse à une urgence non prévue, combat du feu, ...	Humain	Humain	Humain / système de régulation

Tableau 22 : Classification des barrières préalablement à l'audit

La typologie retenue et présentée ci-avant permet d'associer les activités du management qui influencent de manière commune les regroupements de barrières effectuées. Il s'agit en quelque sorte de « groupes communs », par comparaison avec les « modes communs » utilisés en sûreté de fonctionnement.

4.3.2.2 Exemple d'application

Une analyse de risque a été menée sur un réacteur de synthèse de dioxyde de chlore. Les fonctions de sécurité à assurer ainsi que les dispositions prises pour remplir ces fonctions ont été identifiées. Le tableau ci-après présente le classement des barrières identifiées au cours de l'analyse de risques suivant les fonctions de sécurité à assurer.

Type barrière	Fonction de sécurité assurée	Barrières retenues
1-Permanente – passive	Prévenir une fuite au niveau du rebouilleur	Rebouilleur en titane
2-Permanente – passive	Limiter la taille d'une flaque sur fuite process	<ul style="list-style-type: none"> • Rétention étanche dans le bâtiment process • Système de recueil des effluents (seal tank)
4-Permanente – active	<ol style="list-style-type: none"> 1. Limiter les conséquences d'une surpression dans le réacteur 2. Prévenir une montée en pression dans le réseau gaz 3. Limiter les émissions toxiques en cheminée 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Event de surpression 2. Ejecteur 3. Colonne de lavage et scrubber
5-Active – matériel fonctionnant à la demande et réutilisable	Prévenir une montée en pression dans le réacteur	Soupape sur rebouilleur et réseau vapeur
6-Active – automatique	<ol style="list-style-type: none"> 1. Prévenir une concentration haute de méthanol 2. Prévenir un sur remplissage du réacteur 3. Prévenir une montée en pression dans le réacteur 4. Limiter les émissions toxiques en cheminée 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mise en sécurité en sécurité du procédé sur concentration haute de ClO₂ (réacteur, colonne, cheminée) 2. Mise en sécurité en sécurité du procédé sur niveau haut 3. Mise en sécurité en sécurité du procédé sur pression haute 4. Mise en sécurité en sécurité du procédé sur concentration haute de ClO₂ (colonne, cheminée)
7-Active – manuelle	<ol style="list-style-type: none"> 1. Limiter la taille d'une flaque sur fuite process 2. Prévenir la présence d'impureté dans l'eau de réaction 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mise en sécurité en sécurité du procédé par arrêt d'urgence 2. Changement du filtre sur alarme
10- Active – procédure	<ol style="list-style-type: none"> 1. Prévenir une fuite au niveau du rebouilleur 2. Prévenir les agressions dans le cas de travaux à proximité 3. Prévenir fuite sur joint ou corps de pompe 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Contrôle de l'état du rebouilleur 2. Procédure d'intervention pour travaux 3. Maintenance préventive

Tableau 23 : Classification des barrières issues de l'analyse des risques

4.3.3 Evaluation de l'organisation structurelle

4.3.3.1 Principe

Le modèle organisationnel développé reconnaît les différentes activités liées au cycle de vie complet d'une installation et d'une barrière de sécurité, à savoir la conception, l'installation, l'utilisation, la maintenance, et enfin l'amélioration du système.

La maîtrise de ces cycles de vie est dans la dépendance d'activités de management qui doivent être structurées afin d'assurer la gestion des risques. Ces activités peuvent être classées selon les trois fonctions principales suivantes :

1. L'identification des risques pour toutes les phases de vie de l'installation, permettant de déterminer les fonctions de sécurité à assurer et les barrières permettant de remplir ces fonctions par rapport aux objectifs de maîtrise des risques de l'exploitant. Dans le cadre du projet ARAMIS, la réalisation de l'opération A – Identification des scénarios permet de fonder un avis quant à la réalisation de cette fonction. Toutefois, un protocole d'audit relatif à cette évaluation a été développé. Ce protocole est présenté en annexe 1.
2. L'ensemble des processus manageriaux nécessaires au bon fonctionnement des barrières dans leur cycle de vie (de la conception à la maintenance). Cette fonction correspond aux activités attendues pour assurer un niveau de performance optimum sur les barrières.
3. L'ensemble des processus manageriaux nécessaires au maintien ou à l'amélioration du niveau de sécurité de l'installation. Ainsi, des ressources doivent être définies et mises en place en vue de :
 - Maîtriser les dérives du système de management mis en place,
 - Contrôler et piloter le fonctionnement de l'entreprise en situation de changement (changement technique, conjoncturel ou organisationnel),
 - Capitaliser sur les incidents ou accidents susceptibles de survenir.

En ce qui concerne la fonction n°2 correspondant aux activités nécessaires au bon fonctionnement des barrières, le protocole d'audit est bâti suivant l'architecture présentée sur la figure ci-après.

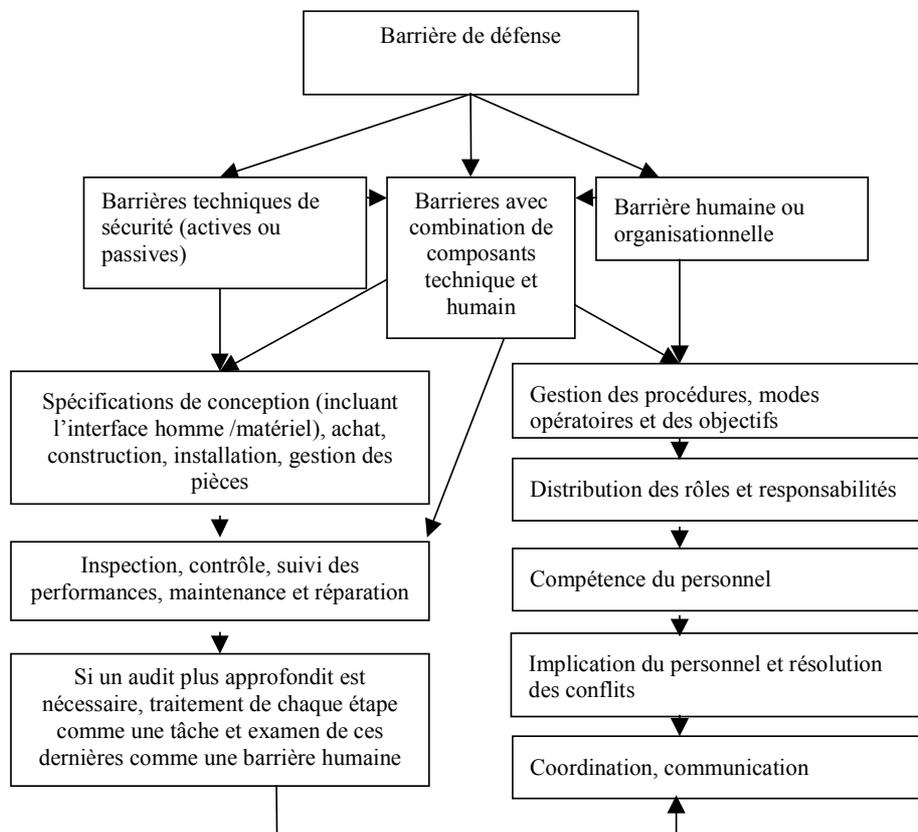


Figure 23 : Types de barrières et sous-protocoles d'audit associés

Les sous-protocoles d'audit correspondent aux processus managériaux à mettre en œuvre durant le cycle de vie d'une barrière de défense en fonction des différentes combinaisons possibles. Le type de combinaison est évalué au moment de l'audit.

Les objectifs visés par l'audit de la structure d'organisation sont :

1. D'abord de déterminer si les processus manageriaux nécessaires au bon fonctionnement des barrières sont effectifs et permettent de conserver le niveau de confiance déterminé en analyse des risques (opération A).
2. Ensuite d'évaluer la capacité d'une organisation à ne pas dériver et à s'adapter aux différents événements susceptibles de se produire. Cet objectif est fondamentalement difficile à quantifier car il consisterait à prédire le fonctionnement ou la réponse d'une organisation dans le futur en fonction de sollicitations difficilement prévisibles. Ainsi, la partie de l'audit correspondant à cet objectif et traitée de façon qualitative.

4.3.3.2 Protocole d'audit

Le protocole d'audit est reporté dans son ensemble en annexe 1. Il s'agit dans ce paragraphe de présenter les principes d'audit retenus pour l'évaluation de l'organisation structurelle. Les processus managériaux liés au cycle de vie des barrières sont les suivants :

- Pour les barrières humaines :
 1. Disponibilité du personnel : Il s'agit de s'assurer que l'on disposera du personnel nécessaire à la réalisation des différentes activités suivant les conditions de fonctionnement pouvant être rencontrées (congrés, pics d'activité...),
 2. Compétence du personnel : L'objet est ici de s'assurer que le personnel en place dispose du niveau de compétence souhaité, cela inclut notamment la sélection du personnel et sa formation,
 3. Implication du personnel et résolution des conflits : Il s'agit de s'assurer du bon comportement des acteurs face à leurs tâches, cela prend en compte notamment la façon dont les arbitrages sont effectués en vue de diminuer la charge de ces derniers,
 4. Communication et coordination : L'objet de ces activités est d'assurer d'une bonne communication entre les acteurs (par exemple en situation d'urgence) et de la bonne coordination des activités (par exemple en phase de travaux),
 5. Procédure, modes opératoires et objectifs : Il s'agit enfin de s'assurer que les règles seront suivies, cela prend en compte la vérification de l'adéquation des règles avec les activités à effectuer, la formation à ces règles et l'évaluation de ces dernières.
- Pour les barrières techniques :
 6. Détermination des spécifications de conception (incluant l'interface homme/machine), achat, construction, installation, et gestion des pièces : Cela correspond aux activités permettant d'assurer que les objectifs de sécurité seront correctement remplis,
 7. Gestion des inspections, des contrôles et de la maintenance : Il s'agit enfin de suivre dans le temps la performance des barrières, y compris leur (ré)étalonnage.

Pour chaque processus identifié ci-avant, un sous-protocole d'audit est développé. Ce sous protocole correspond au référentiel des activités de gestion à réaliser pour assurer un bon système de management des barrières (voir figure ci-dessous).

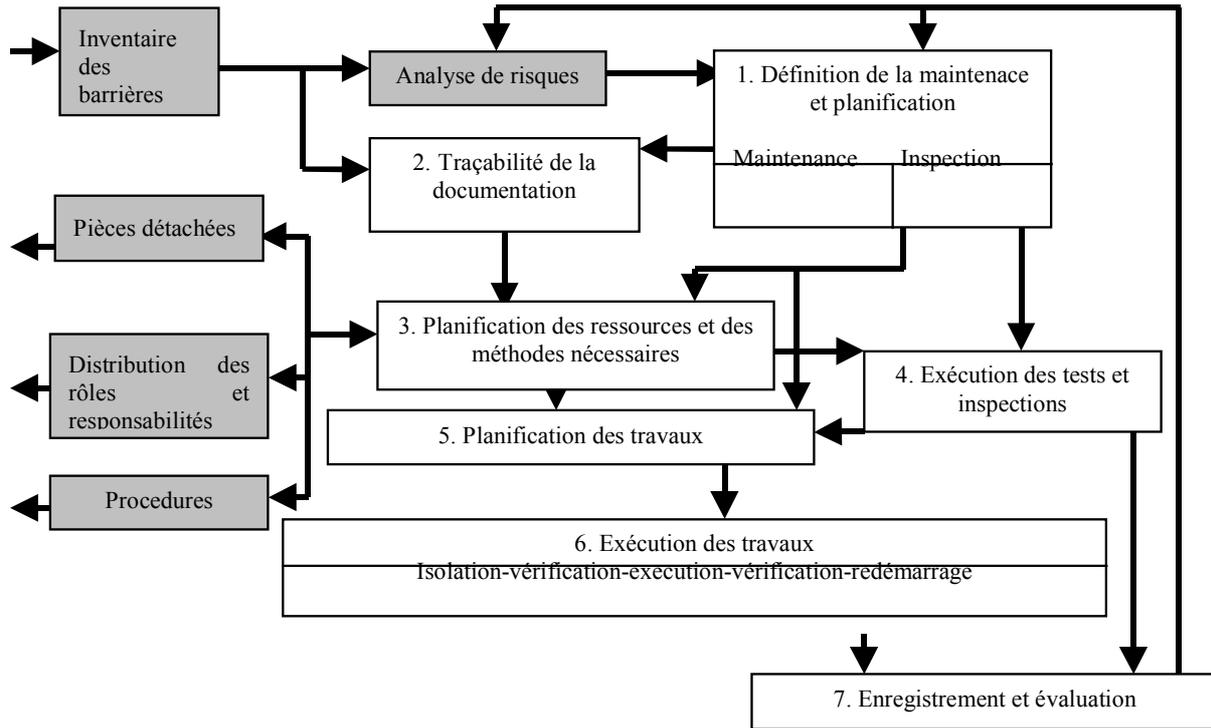


Figure 24 : Audit du processus gestion des inspections, des contrôles et de la maintenance

Les activités à réaliser pour assurer une bonne gestion du processus correspondent aux pavés numérotés. Les pavés grisés correspondent aux entrées et sorties du processus. Pour chaque activité, un référentiel d’audit est rédigé. L’évaluation est réalisée par rapport à ce référentiel.

Par ailleurs, les sous-protocoles à employer sont déterminés suivant le type de barrière audité. Par exemple, pour les barrières de type 2 (rétentions), le sous-protocole 6 (Détermination des spécifications de conception, achat, construction, installation, et gestion des pièces) sera à employer en priorité.

L’évaluation se fait selon trois notes :

- Présent, documenté et fonctionnant. Dans ce cas, le niveau de confiance optimal des barrières n’est pas modifié,
- Présent, mais avec quelques oublis dans la documentation ou le fonctionnement. Dans ce cas, le niveau de confiance des barrières est abaissé d’un niveau,
- Absence de parties significatives. Dans ce cas, le niveau de confiance des barrières est abaissé de deux niveaux.

4.3.3.3 Exemple d’application

Le tableau ci-après synthétise les résultats d’audit obtenus sur la gestion des barrières techniques actives mise en place sur un réacteur de synthèse de dioxyde de chlore. Dans ce cas, le niveau de confiance initial ne serait pas influencé.

4.3.4 Evaluation de la culture de l'organisation

4.3.4.1 Principe

Il est admis que si un système de management de la sécurité est nécessaire, cela n'est pas suffisant pour garantir une maîtrise adéquate des risques et des barrières de défense. Si les activités de gestion liées au cycle de vie des barrières doivent être effectuées, les acteurs prennent en permanence des décisions dans leur travail en intégrant d'autres paramètres que les seules exigences des procédures. Ces aspects doivent donc être évalués.

Cette ambition se trouve au cœur de la problématique de la maîtrise du risque majeur ou il n'est pas facile de mettre en place des indicateurs qui témoignent du fonctionnement optimal des dispositions de la maîtrise des risques. Il s'agit donc également d'évaluer dans ARAMIS la dimension « culturelle » ou « informelle » de l'organisation.

Pour cela les facteurs culturels pesant sur la bonne réalisation des activités de gestion d'une organisation sont interrogés au travers d'un questionnaire dans lequel les pratiques réelles mises en œuvre sur le site ou perçues comme telles par les acteurs du système sont étudiées.

4.3.4.2 Questionnaire culture sécurité

Le point de départ pour la construction du questionnaire est un modèle de la culture sécurité, développé par le Risoe (DK), suite à ses recherches dans le domaine maritime et médical.

Les facteurs évalués dans ce questionnaire sont les suivants :

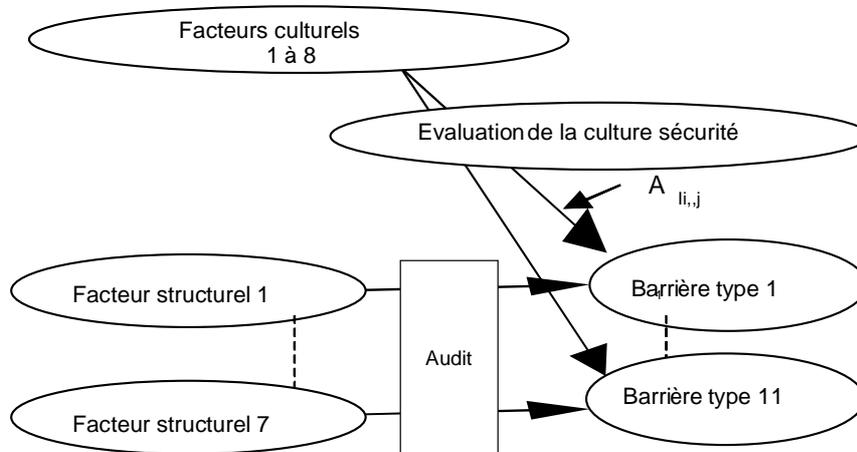
1. Apprentissage, culture du retour d'expérience : correspond à la bonne volonté dont les opérateurs font preuve pour signaler des incidents/accidents et la perception de ces derniers par rapport à l'exploitation de ce retour d'expérience,
2. Priorité de la sécurité, règles et attitudes : correspond à la perception des acteurs sur la bonne application des règles de travail et de sécurité et la façon dont la sécurité est traitée de façon prioritaire par rapport à la productivité et au confort dans le travail,
3. Participation et engagement du management : ce facteur est sondé par interrogation du management et par la perception des autres acteurs,
4. Perception des risques et de la performance humaine : correspond aux différents facteurs pesant sur la bonne réalisation d'une tâche (stress, fatigue...) et la perception des acteurs des risques liés à leur travail,
5. Responsabilité perçue : correspond à la perception des acteurs sur lesquels pèsent de réels enjeux de sécurité,
6. Confiance et équité : correspond à la confiance du management pour leurs équipes et l'équité du travail au sein de l'espace de travail,
7. Support et communication au sein de l'équipe : correspond à la perception des acteurs sur la qualité de la communication et le support reçu au sein de son équipe,
8. Motivation, implication du personnel, influence : correspond à la perception des acteurs sur l'intérêt et l'implication qu'ils portent à leur travail et leur entreprise et l'influence qu'ils ont sur le travail qu'ils effectuent (degré d'autonomie perçue).

Pour consulter l'ensemble du questionnaire, le lecteur se reportera à l'annexe 2.

L'évaluation se fait en considérant que l'ensemble des facteurs cités ci-avant pèse de façon homogène sur l'organisation et la mesure de la culture sécurité est agrégée en une seule note. La méthode d'agrégation des résultats des questionnaires est en cours d'élaboration et s'appuie sur les données recueillies lors des cinq différents cas pratiques réalisés en 2004.

4.3.5 La pondération des éléments du modèle

La figure ci-dessous montre la stratégie générale retenue pour la cotation de l'influence des aspects structurels et culturels sur le niveau de confiance de chaque type de barrière.



Les facteurs structurels sont évalués par audit en fonction du cycle de vie des différents types de barrières (des sous-protocoles d'audit sont définis par type de barrières). De plus, en vue de permettre une évaluation la plus pertinente possible, une hiérarchisation de chaque activité composant un sous-protocole d'audit est en cours de réalisation. Cette hiérarchisation est réalisée par l'exploitation des jugements d'experts (sociologues, auditeurs, industriels) issus notamment des cas de terrain.

L'évaluation de la culture sécurité se fait en considérant que l'ensemble des facteurs cités ci-avant pèse de façon homogène sur l'organisation. L'influence de cette note par type de barrière (facteur A) est en cours d'élaboration. Cette hiérarchisation est également réalisée par l'exploitation des mêmes jugements d'experts que précédemment.

L'exploitation des dires d'expert est réalisée à partir d'une procédure structurée et qui a déjà été validée dans le cadre du projet I-RISK et d'autres projets de recherche traitant de mêmes problèmes multidimensionnels. L'université de Delft (L. Goossens, R. Cooke) est en charge de cette opération délicate dans le projet ARAMIS.

4.4 DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES

La méthode d'évaluation retenue permet de mettre en lumière les facteurs de performance et les points faibles d'une organisation sur les deux dimensions qui la composent (structure formelle et culture) et suivant une typologie des barrières mises en place. Ce type d'évaluation permet de rendre plus lisible l'impact d'un mode de gestion sur le niveau de risque d'un établissement et devrait aider la communication entre les industriels et les pouvoirs publics.

De façon générale, les études de cas ont permis de bâtir la structure de la méthode dans son ensemble. La méthode finale serait à consolider par des tests supplémentaires de façon à s'assurer que les hypothèses retenues sont correctes et peuvent être généralisées à l'ensemble des organisations notamment en ce qui concerne l'option d'agrèger les résultats des questionnaires culture dans une seule note.

L'évaluation de la culture sécurité se fait en une seule note globale correspondant à l'agrégation des résultats obtenus sur un site. Puis cette note est pondérée en fonction du type de barrière en vue d'en déterminer l'impact. L'agrégation en une note permet d'avoir une vision globale de la qualité de la culture ou du climat sécurité régnant dans une organisation et permettrait de dégager des tendances si cet exercice est réalisé à plusieurs intervalles.

Toutefois, cette méthode de calcul ne permet pas de déterminer l'influence d'une partie de l'organisation (par exemple le service maintenance) sur la gestion globale du site. Dans ce cas, un mode de questionnement découpé devrait être appliqué suivant les différents services et acteurs de ces services impliqués dans la gestion des risques. La question dans ce cas est de savoir si l'échantillon au niveau d'une équipe reste suffisant pour permettre une exploitation statistique des réponses.

Le principe retenu pour évaluer l'influence des deux dimensions d'une organisation consiste à considérer que les aspects culturels influent sur le niveau de confiance des barrières de façon indépendante des aspects structurels. Chaque dimension est évaluée avec un outil différent. Dans la réalité, ces deux aspects sont liés. Parmi les facteurs culturels pris en compte dans la méthode, certains semblent peser de façon préférentielle sur différents niveaux d'une organisation (individuel, collectif de travail ou équipe, organisation globale). Par exemple, les facteurs « Perception des risques et de la performance humaine - Responsabilité perçue - Motivation, implication du personnel, influence » semblent plus adaptés au niveau individuel et le facteur « Apprentissage, culture du retour d'expérience » semble plus adapté au niveau de l'organisation globale. Ainsi les réponses aux questionnaires pourraient être employées de façon combinée avec l'audit.

Il est encore nécessaire de travailler sur l'intégration d'outils permettant une évaluation plus en adéquation avec le fonctionnement réel d'une organisation.

5. OPERATION D : INDICE V CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE DES ENJEUX

5.1 OBJECTIFS

L'opération D avait pour objet de caractériser la vulnérabilité de l'environnement d'une installation industrielle donnée. En effet, si on s'intéresse au niveau de risque global d'une installation, non seulement il est utile de connaître le potentiel de danger de celle-ci (objectif de l'indice S) mais aussi de caractériser l'atteinte potentielle des cibles et de connaître leurs sensibilités au potentiel de danger (indice V).

L'objectif de cette étape du programme consistait donc à :

- Caractériser l'environnement d'installations industrielles dangereuses;
- Estimer la vulnérabilité (ou le degré de sensibilité) de cet environnement aux risques industriels, indépendamment de l'installation dangereuse concernée.
- Développer un outil informatique utilisant un SIG qui permet d'élaborer des cartes de vulnérabilité de l'environnement d'un site.

5.2 ORGANISMES PARTICIPANT A CETTE OPERATION

<i>Organisation</i>	<i>Département</i>
Ecole des Mines d'Alès Laboratoire LGEI (France)	Responsable de l'opération D, de l'élaboration de l'indice de vulnérabilité et de son interfaçage avec les SIG MapInfo et GéoConcept
Universita di Roma Dipartimento Ingegneria Chimica (Italie)	Responsable de l'interfaçage de l'indice de vulnérabilité avec l'outil SIG ArcView.
INERIS	Coordination de l'opération et du travail de thèse à l'origine de la méthode d'évaluation de la vulnérabilité

5.3 PRINCIPAUX RESULTATS

Les travaux permettant de calculer la vulnérabilité s'inscrivaient dans ceux du groupe travaillant sur l'indice V dans le projet européen ARAMIS. S'agissant de la méthode d'évaluation de la vulnérabilité, si l'on décline les objectifs généraux énoncés ci-dessus en objectifs opérationnels, l'INERIS et ses partenaires ont procédé en quatre étapes :

- Opération D-1 : définition de la typologie des cibles nécessaires à la description de l'environnement d'un site industriel donné.
- Opération D-2 : définition des critères et de la méthode permettant de caractériser et hiérarchiser la sensibilité des cibles définies dans l'étape précédente.
- Opération D-3 : développement d'une interface permettant l'utilisation d'un système d'information géographique pour la collecte des informations et la représentation des résultats.
- Opération D-4 : travail de synthèse des opérations D-1, D-2 et D-3 afin de composer l'indice V et de construire les cartes de vulnérabilité.

Les quatre opérations décrites précédemment sont aujourd’hui finalisées. Ainsi, les travaux engagés ont permis en trois années d’écrire un guide décrivant la méthode permettant de calculer l’indice de vulnérabilité V et de développer un outil informatique permettant l’utilisation d’un système d’information géographique pour la collecte des informations, le calcul de vulnérabilité et la représentation des résultats. Ces outils informatiques ont du reste pu être testés sur les cinq sites pilotes étudiés en 2004.

Les travaux décrits dans ce chapitre sont notamment extraits des livrables suivants disponibles en anglais dans le cadre du projet ARAMIS :

- D.4.A « guide describing the methodology to calculate the spatial vulnerability index V » élaboré en février 2003.
- D.4.B « interface for using GIS for data acquisition and mapping » élaboré en février 2004.
- D.4.C « Software for determining the environmental vulnerability index based on G.I.S. informations » édité en août 2004.

5.3.1 Opérations D-1 et D-2 : résultats méthodologiques

La caractérisation de la vulnérabilité environnementale autour d’un site industriel se traduit par une démarche qui tiens en trois étapes :

- Premièrement, définir une surface d’étude compatible avec les effets physiques et leur impacts observés.
- Deuxièmement, définir l’environnement à l’aide de la typologie retenue pour les cibles, les effets retenus et les impacts générés.
- Troisièmement, développer la structure hiérarchique de notre système.

L’organisation de la structure hiérarchique caractérisant la vulnérabilité globale se représente donc par les diagrammes suivants.

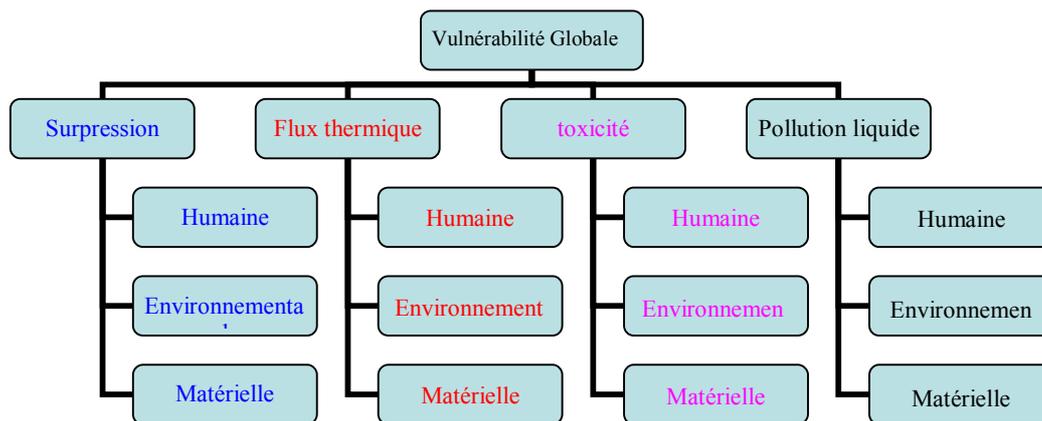


Figure 25 : Structure hiérarchique de la vulnérabilité globale

Elle se décline pour chaque branche selon le modèle suivant (exemple ci-contre de la vulnérabilité humaine vis-à-vis des effets de surpression).

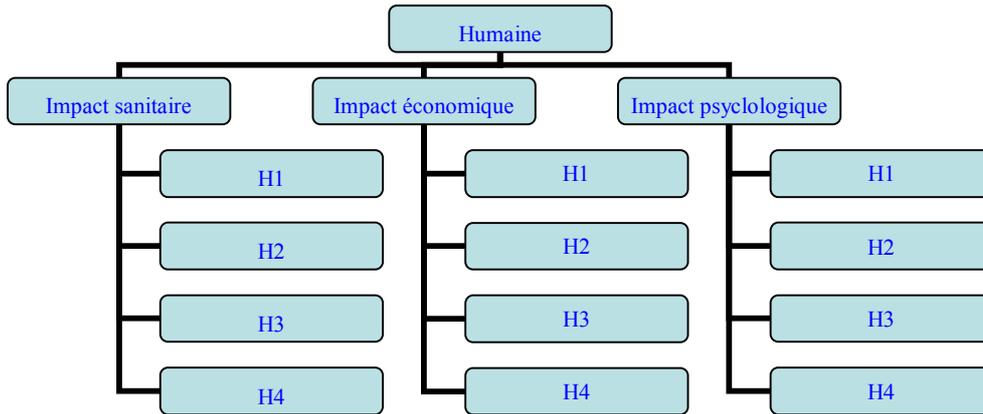


Figure 26 : Structure hiérarchique de la vulnérabilité humaine vis-à-vis de la surpression

C’est à partir de cette structure hiérarchique, que nous avons développé des formules matricielles permettant de collecter l’appréciation d’experts sur ce type de structure. L’objectif était de pondérer chaque élément caractérisant la vulnérabilité environnementale et de les comparer deux à deux.

5.3.1.1 Les fonctions de vulnérabilité et leurs pondérations

A l’aide d’une méthode multicritères d’aide à la décision (méthode AHP de L. Saaty) et selon l’architecture de la Figure 25, nous avons pu décomposer V global de la façon suivante :

$$V_{\text{globale}} = \alpha \cdot V_H + \beta \cdot V_E + \gamma \cdot V_M \quad (19)$$

Où : V_H = vulnérabilité humaine
 V_E = vulnérabilité environnementale
 V_M = vulnérabilité matérielle
 et α , β et γ sont les facteurs de pondération.

Ensuite chaque vulnérabilité a été exprimée en fonction des effets physiques :

$$V_H = \alpha_1 \cdot V_{H/surp} + \alpha_2 \cdot V_{H/ft} + \alpha_3 \cdot V_{H/tox} + \alpha_4 \cdot V_{H/poll} \quad (20)$$

$$V_E = \beta_1 \cdot V_{E/surp} + \beta_2 \cdot V_{E/ft} + \beta_3 \cdot V_{E/tox} + \beta_4 \cdot V_{E/poll} \quad (21)$$

$$V_M = \gamma_1 \cdot V_{M/surp} + \gamma_2 \cdot V_{M/ft} + \gamma_3 \cdot V_{M/tox} + \gamma_4 \cdot V_{M/poll} \quad (22)$$

Où *surp* (surpression), *ft* (flux thermique), *tox* (exposition toxique) et *poll* (pollution liquide) représentent les effets physiques.

À partir de ces résultats et pour chaque vulnérabilité, les impacts sanitaire, économique et psychologique ont été pris en compte. À titre d’exemple pour la vulnérabilité humaine, cela se décline de la façon suivante :

$$V_{H/surp} = X_{1H} \cdot V_{H/surp, san} + Y_{1H} \cdot V_{H/surp, eco} + Z_{1H} \cdot V_{H/surp, psy} \quad (23)$$

$$V_{H/ft} = X_{2H} \cdot V_{H/ft, san} + Y_{2H} \cdot V_{H/ft, eco} + Z_{2H} \cdot V_{H/ft, psy} \quad (24)$$

$$V_{H/tox} = X_{3H} \cdot V_{H/tox, san} + Y_{3H} \cdot V_{H/tox, eco} + Z_{3H} \cdot V_{H/tox, psy} \quad (25)$$

$$V_{H/poll} = X_{4H} \cdot V_{H/poll, san} + Y_{4H} \cdot V_{H/poll, eco} + Z_{4H} \cdot V_{H/poll, psy} \quad (26)$$

Ici, les X_{ij} représentent des facteurs quantitatifs. La pondération s’obtient par un jugement d’experts (cf. ci-après) et un traitement matriciel de leur appréciation.

De cette manière, nous avons défini la vulnérabilité de n’importe quelle cible autour d’un site industriel en la caractérisant selon l’impact prépondérant et selon l’effet physique considéré.

L’appréciation de l’expert a été obtenue par l’édition d’un questionnaire qui a été diffusé fin 2002 (le questionnaire type est joint en annexe 3). 38 experts européens ont déjà répondu à la consultation. La répartition de ces experts par pays est présentée sur la figure ci-dessous. Le terme expert est à prendre ici dans son acception la plus large, à savoir l’ensemble des parties prenantes concernées par la gestion des risques industriels (autorités, industriels, collectivités locales, consultants, etc.).

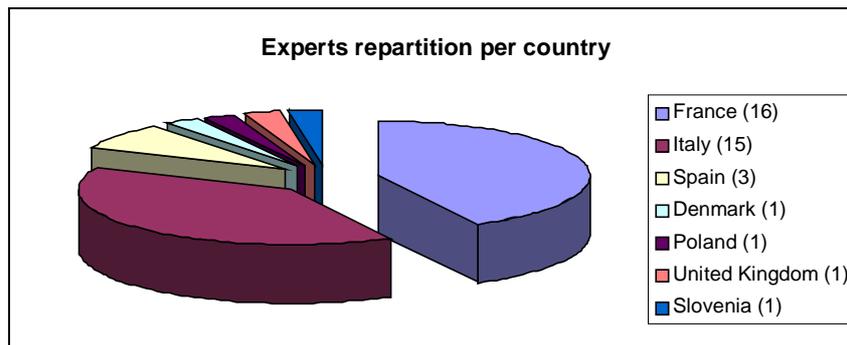


Figure 27 : La répartition par pays des experts ayant rempli le questionnaire type

Un traitement spécifique a ensuite été réalisé pour agréger les différents questionnaires recueillis et donc les appréciations des experts.

Ainsi, toutes les évaluations obtenues ont été rapportées dans des matrices constituées par l’ensemble des formules présentées ci-dessus et les facteurs de la vulnérabilité ont pu alors être évalués. Les résultats donnés ci-dessous, sont directement issus du livrable D4A et encore présentés selon le libellé anglais. Pour évaluer les facteurs de vulnérabilité de chaque fonction, les vecteurs propres des matrices ont été calculés. Les solutions correspondent aux facteurs de pondération de la vulnérabilité.

Global vulnerability

$$V_{\text{global}} = 0,75 \times V_H + 0,2 \times V_E + 0,05 \times V_M$$

Human Vulnerability

$$V_H = 0,242 \times V_H^{\text{op}} + 0,225 \times V_H^{\text{tr}} + 0,466 \times V_H^{\text{tox}} + 0,067 \times V_H^{\text{poll}}$$

Overpressure	Thermal radiation
$V_H^{\text{op}} = 0,666 \times V_H^{\text{op}}_I + 0,111 \times V_H^{\text{op}}_E + 0,222 \times V_H^{\text{op}}_P$ $V_H^{\text{op}}_I = 0,366 \times H_1 + 0,278 \times H_2 + 0,233 \times H_3 + 0,124 \times H_4$ $V_H^{\text{op}}_E = 0,404 \times H_1 + 0,340 \times H_2 + 0,139 \times H_3 + 0,117 \times H_4$ $V_H^{\text{op}}_P = 0,150 \times H_1 + 0,368 \times H_2 + 0,282 \times H_3 + 0,200 \times H_4$	$V_H^{\text{tr}} = 0,648 \times V_H^{\text{tr}}_I + 0,122 \times V_H^{\text{tr}}_E + 0,230 \times V_H^{\text{tr}}_P$ $V_H^{\text{tr}}_I = 0,354 \times H_1 + 0,354 \times H_2 + 0,161 \times H_3 + 0,131 \times H_4$ $V_H^{\text{tr}}_E = 0,409 \times H_1 + 0,350 \times H_2 + 0,158 \times H_3 + 0,082 \times H_4$ $V_H^{\text{tr}}_P = 0,167 \times H_1 + 0,333 \times H_2 + 0,333 \times H_3 + 0,167 \times H_4$

<p>Gas toxicity</p> <p>$V_H^{tox} = 0,735 X V_H^{tox}_I + 0,069 X V_H^{tox}_E + 0,196 X V_H^{tox}_P$</p> <p>$V_H^{tox}_I = 0,227 X H_1 + 0,424 X H_2 + 0,227 X H_3 + 0,122 X H_4$</p> <p>$V_H^{tox}_E = 0,351 X H_1 + 0,351 X H_2 + 0,189 X H_3 + 0,109 X H_4$</p> <p>$V_H^{tox}_P = 0,140 X H_1 + 0,456 X H_2 + 0,263 X H_3 + 0,141 X H_4$</p>	<p>Liquid pollution</p> <p>$V_H^{poll} = 0,594 X V_H^{poll}_I + 0,157 X V_H^{poll}_E + 0,249 X V_H^{poll}_P$</p> <p>$V_H^{poll}_I = 0,212 X H_1 + 0,497 X H_2 + 0,191 X H_3 + 0,100 X H_4$</p> <p>$V_H^{poll}_E = 0,283 X H_1 + 0,490 X H_2 + 0,152 X H_3 + 0,076 X H_4$</p> <p>$V_H^{poll}_P = 0,138 X H_1 + 0,479 X H_2 + 0,256 X H_3 + 0,128 X H_4$</p>
--	---

<p>Environment vulnerability</p> <p>$V_E = 0,071 X V_E^{op} + 0,148 X V_E^{tr} + 0,277 X V_E^{tox} + 0,503 X V_E^{poll}$</p>	
<p>Overpressure</p> <p>$V_E^{op} = 0,333 X V_E^{op}_I + 0,333 X V_E^{op}_E + 0,333 X V_E^{op}_P$</p> <p>$V_E^{op}_I = 0,122 X E_1 + 0,227 X E_2 + 0,424 X E_3 + 0,227 X E_4$</p> <p>$V_E^{op}_E = 0,289 X E_1 + 0,246 X E_2 + 0,289 X E_3 + 0,175 X E_4$</p> <p>$V_E^{op}_P = 0,168 X E_1 + 0,239 X E_2 + 0,395 X E_3 + 0,198 X E_4$</p>	<p>Thermal radiation</p> <p>$V_E^{tr} = 0,550 X V_E^{tr}_I + 0,240 X V_E^{tr}_E + 0,210 X V_E^{tr}_P$</p> <p>$V_E^{tr}_I = 0,195 X E_1 + 0,231 X E_2 + 0,426 X E_3 + 0,148 X E_4$</p> <p>$V_E^{tr}_E = 0,227 X E_1 + 0,227 X E_2 + 0,424 X E_3 + 0,122 X E_4$</p> <p>$V_E^{tr}_P = 0,200 X E_1 + 0,200 X E_2 + 0,400 X E_3 + 0,200 X E_4$</p>
<p>Gas toxicity</p> <p>$V_E^{tox} = 0,691 X V_E^{tox}_I + 0,160 X V_E^{tox}_E + 0,149 X V_E^{tox}_P$</p> <p>$V_E^{tox}_I = 0,286 X E_1 + 0,142 X E_2 + 0,286 X E_3 + 0,286 X E_4$</p> <p>$V_E^{tox}_E = 0,340 X E_1 + 0,140 X E_2 + 0,239 X E_3 + 0,280 X E_4$</p> <p>$V_E^{tox}_P = 0,205 X E_1 + 0,169 X E_2 + 0,338 X E_3 + 0,288 X E_4$</p>	<p>Liquid pollution</p> <p>$V_E^{poll} = 0,710 X V_E^{poll}_I + 0,155 X V_E^{poll}_E + 0,135 X V_E^{poll}_P$</p> <p>$V_E^{poll}_I = 0,227 X E_1 + 0,122 X E_2 + 0,227 X E_3 + 0,424 X E_4$</p> <p>$V_E^{poll}_E = 0,278 X E_1 + 0,123 X E_2 + 0,231 X E_3 + 0,367 X E_4$</p> <p>$V_E^{poll}_P = 0,140 X E_1 + 0,140 X E_2 + 0,262 X E_3 + 0,458 X E_4$</p>

<p>Material vulnerability</p> <p>$V_M = 0,446 X V_M^{op} + 0,410 X V_M^{tr} + 0,069 X V_M^{tox} + 0,075 X V_M^{poll}$</p>	
<p>Overpressure</p> <p>$V_M^{op} = 0,571 X V_M^{op}_I + 0,286 X V_M^{op}_E + 0,143 X V_M^{op}_P$</p> <p>$V_M^{op}_I = 0,200 X M_1 + 0,400 X M_2 + 0,200 X M_3 + 0,200 X M_4$</p> <p>$V_M^{op}_E = 0,288 X M_1 + 0,338 X M_2 + 0,169 X M_3 + 0,205 X M_4$</p> <p>$V_M^{op}_P = 0,143 X M_1 + 0,286 X M_2 + 0,286 X M_3 + 0,286 X M_4$</p>	<p>Thermal radiation</p> <p>$V_M^{tr} = 0,443 X V_M^{tr}_I + 0,387 X V_M^{tr}_E + 0,169 X V_M^{tr}_P$</p> <p>$V_M^{tr}_I = 0,246 X M_1 + 0,298 X M_2 + 0,210 X M_3 + 0,246 X M_4$</p> <p>$V_M^{tr}_E = 0,400 X M_1 + 0,200 X M_2 + 0,200 X M_3 + 0,200 X M_4$</p> <p>$V_M^{tr}_P = 0,143 X M_1 + 0,286 X M_2 + 0,286 X M_3 + 0,286 X M_4$</p>
<p>Gas toxicity</p> <p>$V_M^{tox} = 0,200 X V_M^{tox}_I + 0,400 X V_M^{tox}_E + 0,400 X V_M^{tox}_P$</p> <p>$V_M^{tox}_I = 0,142 X M_1 + 0,286 X M_2 + 0,286 X M_3 + 0,286 X M_4$</p> <p>$V_M^{tox}_E = 0,204 X M_1 + 0,347 X M_2 + 0,204 X M_3 + 0,246 X M_4$</p> <p>$V_M^{tox}_P = 0,100 X M_1 + 0,300 X M_2 + 0,300 X M_3 + 0,300 X M_4$</p>	<p>Liquid pollution</p> <p>$V_M^{poll} = 0,260 X V_M^{poll}_I + 0,413 X V_M^{poll}_E + 0,327 X V_M^{poll}_P$</p> <p>$V_M^{poll}_I = 0,127 X M_1 + 0,313 X M_2 + 0,280 X M_3 + 0,280 X M_4$</p> <p>$V_M^{poll}_E = 0,204 X M_1 + 0,347 X M_2 + 0,204 X M_3 + 0,246 X M_4$</p> <p>$V_M^{poll}_P = 0,127 X M_1 + 0,280 X M_2 + 0,313 X M_3 + 0,280 X M_4$</p>

L'analyse des résultats obtenus montre par exemple que selon le panel d'expert :

- La fonction de la vulnérabilité globale est en grande majorité composée par la vulnérabilité humaine (environ 75%). Le facteur de vulnérabilité des cibles environnementales représente 20%, alors que la vulnérabilité matérielle représente 5% de la vulnérabilité globale.

- Pour les cibles humaines, l'effet principal est le toxique (47%). Les effets de surpression et de rayonnement thermique ont une importance à peu près identique (respectivement 24% et 23%). A contrario, l'effet d'une la pollution liquide a une influence faible sur les cibles humaines (seulement 7%).
- Pour les cibles humaines et quelques soient les effets considérés, l'impact sanitaire est l'impact dominant (environ 65%). L'impact psychologique représente environ 20-25%, l'impact économique représente seulement 7 à 15%.

5.3.1.2 Les facteurs quantitatifs

Pour compléter les fonctions de vulnérabilité, la forme des facteurs quantitatifs de chaque type de cibles a été déterminée. Ils sont définis dans le paragraphe suivant :

Les facteurs quantitatifs permettent de quantifier la présence de cibles environnementales dans le secteur d'étude. Dans le cadre de ce projet, un facteur quantitatif a été défini comme une variable adimensionnée dont la valeur est comprise entre 0 et 1 (la valeur 0 indique l'absence de la cible et la valeur 1 indique que la quantité de cette cible dans ce secteur atteint son maximum).

Pour chaque type de cible (H1-H4, E1-E4 et M1-M4) et selon ce principe, les facteurs quantitatifs ont été déterminés.

$$H_i = \frac{N_i}{N_{\max_i}} \quad (27)$$

Avec N_i qui est égal au nombre total de personnes présentes sur la surface d'étude unitaire et N_{\max_i} qui correspond au maximum de personnes que l'on peut trouver sur cette même surface.

Que l'on parle du personnel du site (H1), de la population locale (H2), de la population fréquentant les ERP (H3) ou bien alors des usagers des voies de communication (H4), cette définition nous a contraint à définir pour chaque catégorie de cible la valeur de N_{\max_i} .

Ainsi, nous avons fait l'hypothèse que pour :

- le personnel du site $N_{\max_1} = 2\ 000$,
- les populations locales $N_{\max_2} = PD_{\max_2} \cdot A$ (avec PD_{\max_2} correspondant à plus forte densité de population connus dans la région et A surface d'étude unitaire),
- les populations fréquentant les ERP $N_{\max_3} = 30\ 000$
- les usagers des voies de communication $N_{\max_4} = Pd_{\max_4} \cdot A$ (avec Pd_{\max_4} correspondant à plus forte densité de trafic connus dans la région et A surface d'étude unitaire)

Par contre concernant les N_i nous avons supposé que l'on puisse les obtenir soit à l'aide de bases de données statistiques telles que celles de l'INSEE, ou bien alors par une légère enquête de terrain.

Pour ce qui est des facteurs quantitatifs relatifs aux cibles environnementales (E_i) pour une surface d'étude unitaire les E_i s'écrivent de la façon suivante :

Avec A_i qui correspond à la surface couverte par la cible E_i et A surface d'étude unitaire.

$$E_i = \frac{A_i}{A} \quad (28)$$

Toutes les cibles environnementales (telles qu'elles ont été définies dans le projet) peuvent être extraites de la bases de donnée CORINE LAND COVER. Les SIG permettent quant à eux de déterminer les A_i .

Enfin, concernant les facteurs quantitatifs relatifs aux cibles matérielles pour une surface d'étude unitaire les M_i s'écrivent de la façon suivante :

Avec A_i qui correspond à la surface couverte par la cible M_i et A surface d'étude unitaire.

$$M_i = \frac{A_i}{A} \quad (29)$$

5.3.2 Opération D-2 : Interfaçage SIG

Afin de calculer l'indice de vulnérabilité avec un système d'information géographique, les fonctionnalités de l'outil SIG ont été définies de la façon suivante :

1. diviser en maille la surface d'étude (400 km² centré sur le site objet de l'étude),
2. identifier les cibles présentes sur chaque maille,
3. quantifier ces cibles,
4. calculer la vulnérabilité de chaque maille selon les formules présentées précédemment,
5. agréger ces vulnérabilités élémentaires,
6. afficher les cartes de vulnérabilité.

L'interface entre la méthode de calcul de l'indice V et la représentation à l'aide d'un SIG est développée sous trois logiciels, qui permettent de couvrir la majeure partie de l'Europe quant à la disponibilité des données SIG. Il s'agit des logiciels ArcView, Geoconcept et MapInfo.

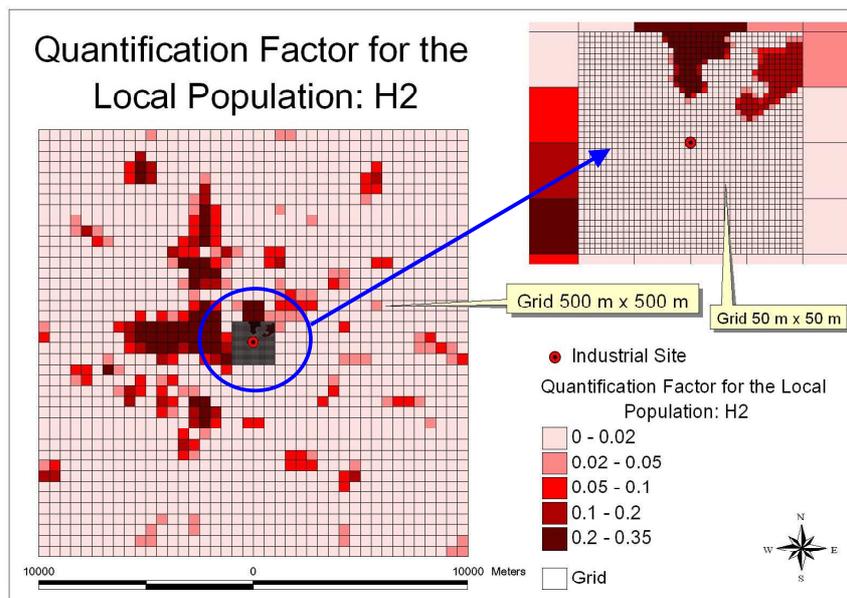


Figure 28 : Exemple de carte de vulnérabilité humaine quantifiée à l'aide d'un SIG

S'agissant de réaliser des cartes de l'environnement d'un site industriel, trois grandes possibilités sont offertes :

- cartographier la vulnérabilité globale,
- cartographier la vulnérabilité par type de cibles (Humaines, Environnementales, Matérielles),
- cartographier la vulnérabilité par type d'effet (ou phénomène) et par type de cible.

Le diagramme suivant synthétise la méthode développée pour calculer la vulnérabilité de l'environnement d'un site classé.

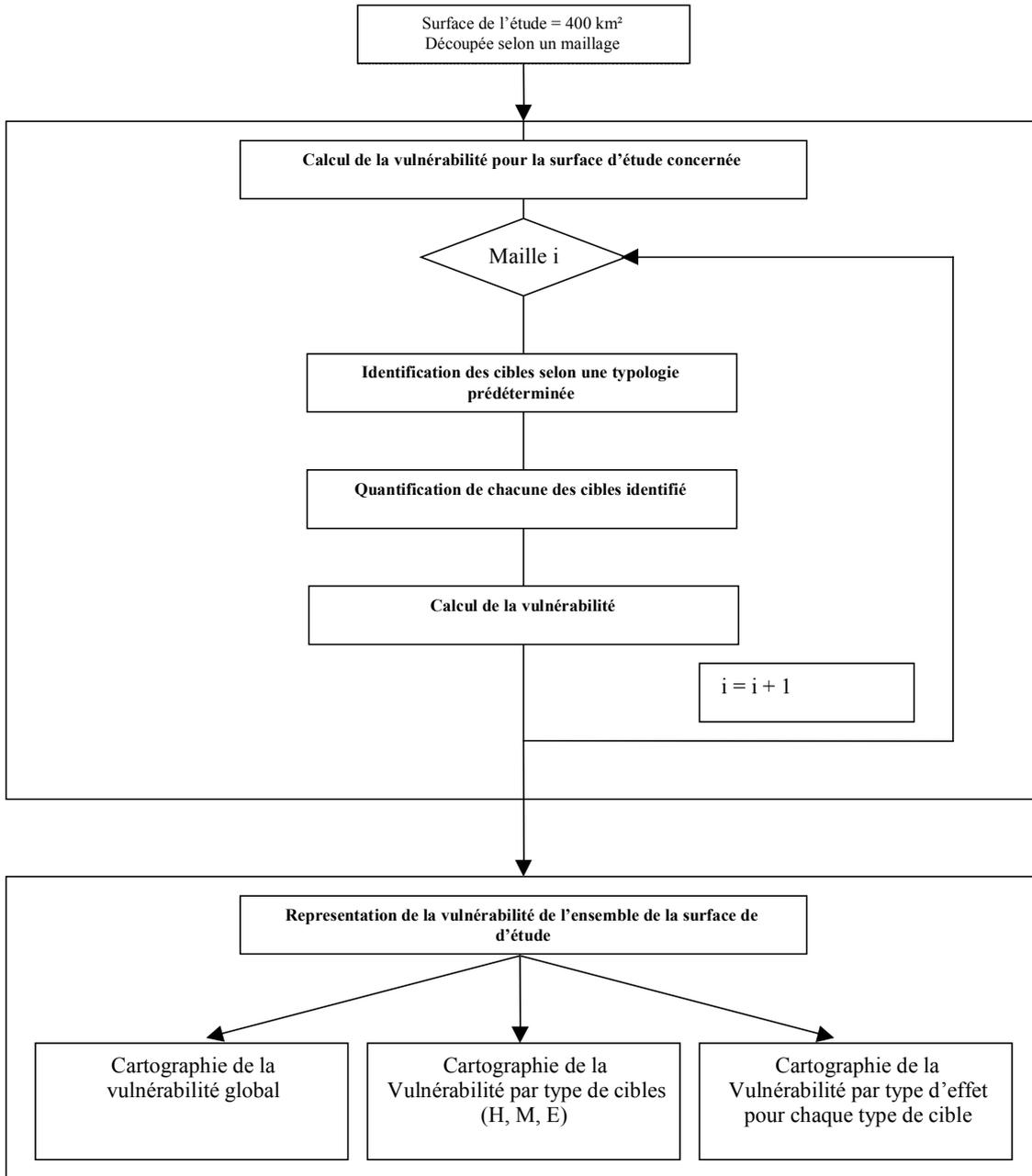


Figure 29 : Synthèse de la méthode permettant de calculer la vulnérabilité d'un site

5.3.3 Opération D-4 : Validation par l'expérimentation

Afin de valider la méthodologie et l'outil permettant de calculer la vulnérabilité autour d'un site industriel, l'ensemble des produits présentés ci-dessous ont été appliqués sur cinq études de cas différentes à travers l'Europe (opération E).

A titre d'illustration et de discussion, seuls sont présentés dans ce chapitre quelques résultats issus de l'expérimentation effectuée en France.

5.3.3.1 Présentation de l'environnement du site

L'étude de cas réalisée en France concerne une usine de production de pâte à papier implantée sur les bords de la Seine, à une quinzaine de kilomètres de Rouen. Le site, d'une largeur moyenne de 700 m, est placé sur la rive droite de la Seine et borde ce fleuve sur quasiment toute sa longueur. La superficie du site est d'environ 100 ha.

L'usine est au fond de la vallée qui est bordée au nord par une falaise d'environ 80 m de haut et au sud par une colline boisée s'élevant à 130 m. Elle est construite au cœur d'une zone industrielle, c'est à dire sur des terrains en grande partie construits ou étanchéifiés.

Les environs proches du site sont principalement composés de champs ouverts, plutôt boisés au Nord et en plaine alluviale au Sud jusqu'à la Seine. Il n'existe pas de site inscrit ou classé, ni de Zone d'Importance Communautaire pour les Oiseaux (ZICO) dans le voisinage immédiat du site. En revanche, la commune d'implantation est entourée de nombreuses Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique (ZNIEFF) de Type I et II. La ZNIEFF la plus proche se trouve à plus d'un kilomètre.

L'environnement humain immédiat du site est composé de villages de faible densité (inférieure à 1000 hab/km²). Seulement 20 % du territoire présente une densité de population comprise entre 1000 et 2000 hab/km² (cf. les cartes ci-après qui présentent la densité de population autour du site et l'occupation du sol qui en est faite).

A l'aide du logiciel développé, nous avons caractérisé cet environnement de la papeterie à travers 2 grilles :

- Une grille principale de 400 km² découpée selon un pas de 500 m.
- Une grille plus fine centrée sur l'usine de 4 km² et découpée selon un pas de 50 m.

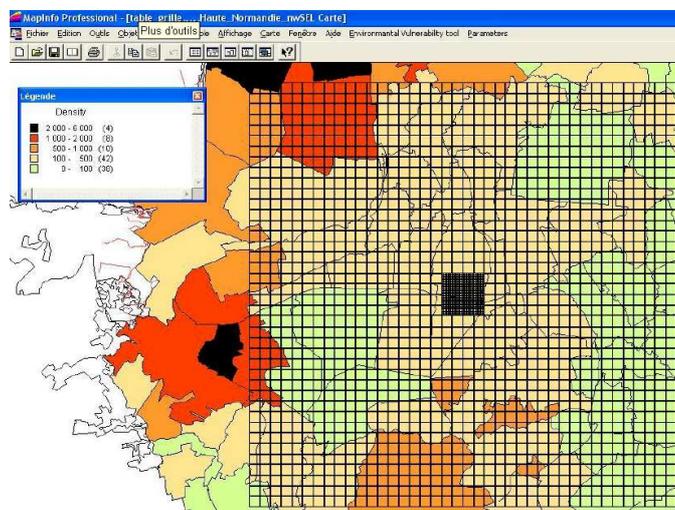


Figure 30 : Carte SIG de données brutes relatives à la densité de population

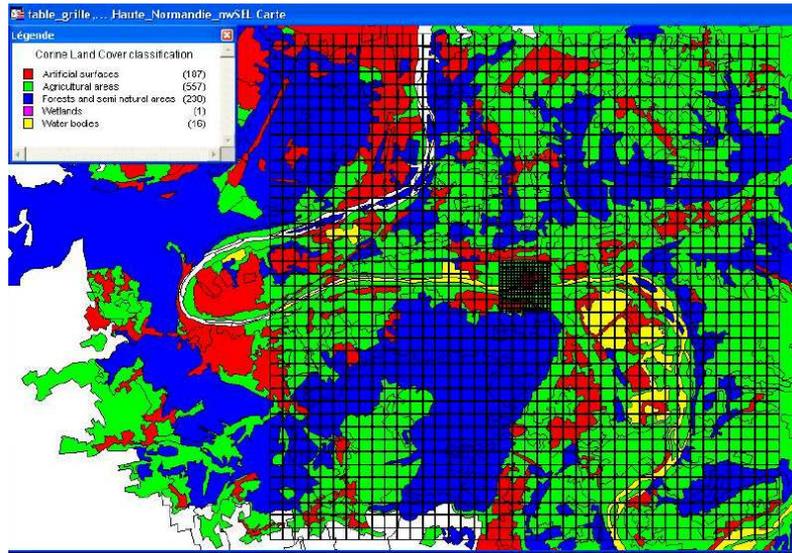


Figure 31 : Données brutes SIG relatives à l'occupation du sol

5.3.3.2 Présentation des résultats

Deux types de résultats ont été obtenus lors de l'expérimentation :

- les cartes de vulnérabilités associées à chaque type de cibles (humaines, environnementale et matérielles),
- les cartes de vulnérabilité vis-à-vis de chaque type d'effets (surpression, flux thermique, toxique et pollution liquide).

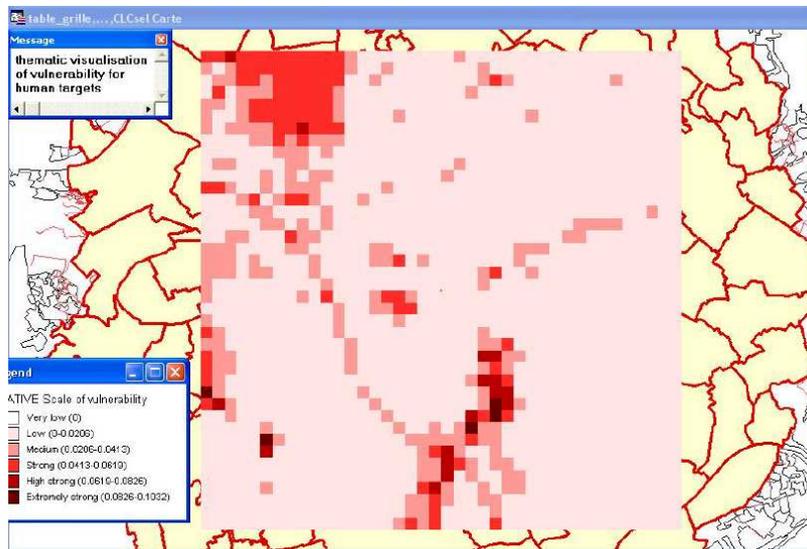


Figure 32 : Vulnérabilité humaine autour du site pilote

Cette carte nous montre que d'après la méthode utilisée, la vulnérabilité humaine autour du site pilote est considérée comme très faible. Elle est comprise entre 0.0206 et 0.1032.

Les zone géographique où elle se concentre essentiellement est située au Nord-Ouest du site ce qui correspond à l'agglomération rouennaise et au sud où on trouve une agglomération de plus faible importance.

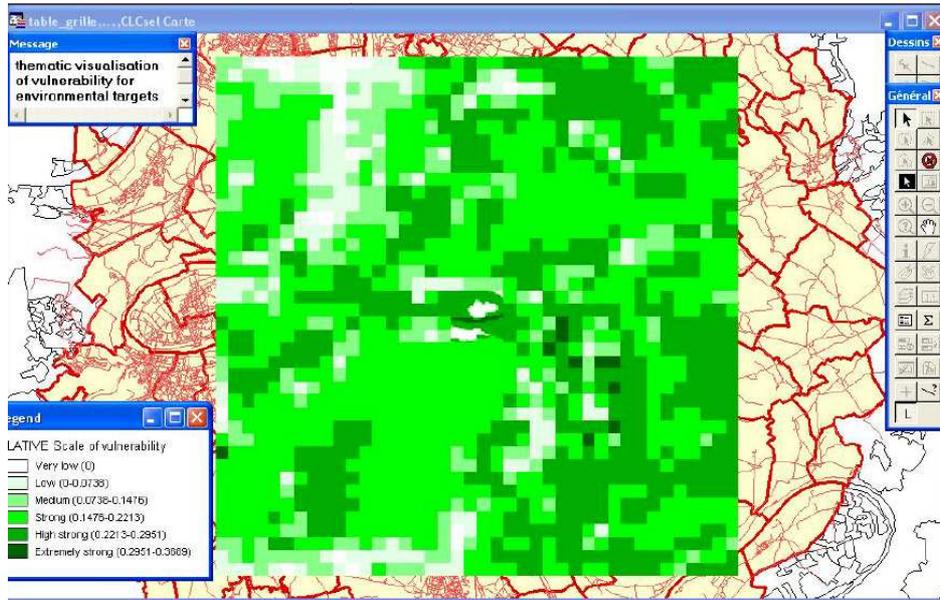


Figure 33 : Vulnérabilité environnementale autour du site pilote

En ce qui concerne la vulnérabilité environnementale, on voit que celle-ci présente une valeur moyenne sur la quasi-totalité du site (comprise entre 0.2 et 0.3). On trouve toutefois au Nord-Ouest du site une zone avec une valeur nulle correspondant à l'agglomération Rouennaise.

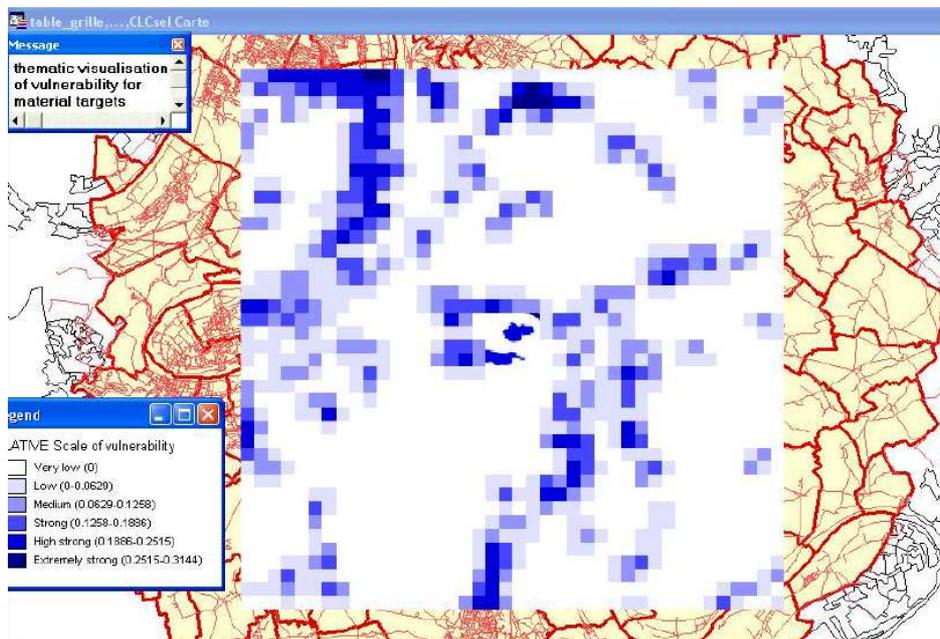


Figure 34 : Vulnérabilité matérielle autour du site pilote

Sur la précédente carte, on s'aperçoit que la vulnérabilité matérielle fait ressortir essentiellement les zones habitées et que globalement sur ces zones, cette vulnérabilité reste moyenne (valeur comprise entre 0.2515 et 0.3144).

Lorsque l'on compare ces trois cartes (Vulnérabilité humaine, environnementale et matérielle), on s'aperçoit que la localisation spatiale des vulnérabilités humaines et matérielles est complémentaire de celle de la vulnérabilité environnementale.

De plus, en valeur absolue la vulnérabilité humaine reste de loin la plus faible. Cela semble tout-de-même surprenant bien que situé en zone péri-urbaine, le site papetier reste néanmoins caractérisé par un espace agricole et forestier fort.

La carte de vulnérabilité globale est présentée ci-après.

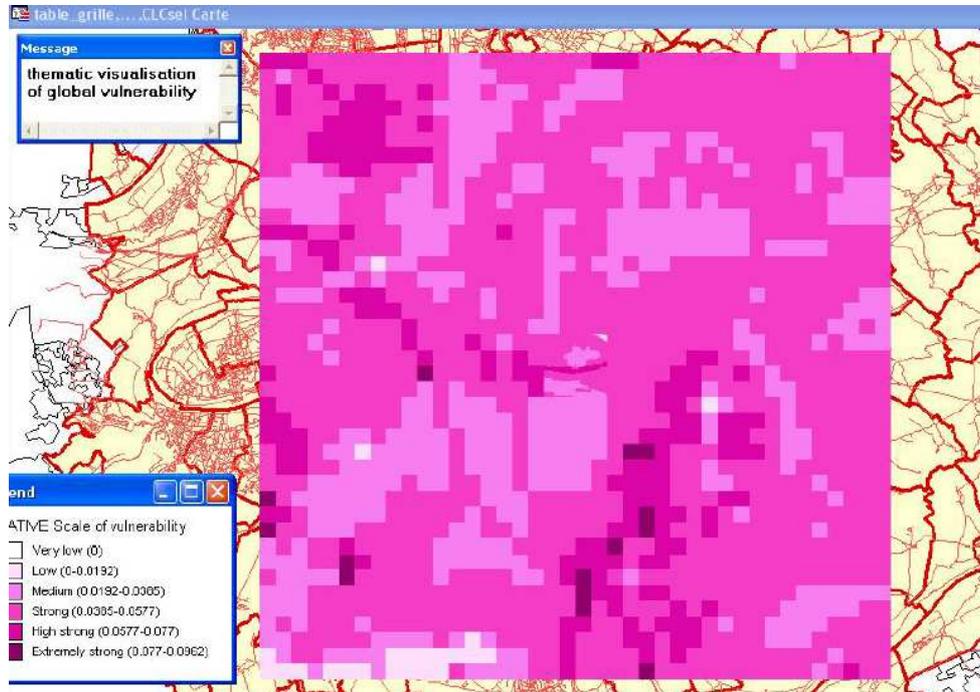


Figure 35 : Vulnérabilité Globale autour du site pilote

Dans l'absolu, la vulnérabilité globale de l'environnement proche du site pilote est faible, mais elle n'est pas homogène pour autant. Ainsi, bien qu'en valeur absolue la vulnérabilité humaine soit la plus faible, ce sont les zones où celle-ci se concentre qui font apparaître la vulnérabilité globale la plus élevée.

5.4 DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES

L'indice de vulnérabilité globale V est composé de la somme des indices de vulnérabilités humaine, environnementale et matérielle pris en compte dans la méthode. On classe ainsi trois types de cibles qui sont ensuite pondérées entre elles par un jugement d'expert et selon des questionnaires diffusés à l'échelle européenne auprès des différents acteurs de la gestion des risques. Chacune de ces cibles est déclinée et hiérarchisée selon sa vulnérabilité économique, sanitaire/environnementale et psychologique.

Les expérimentations nous ont permis de vérifier que les cartes de vulnérabilité élaborées sont plutôt facilement interprétables et que les résultats sont pertinents. Néanmoins des questions subsistent.

Aux vues des résultats obtenus lors des études de cas, nous pouvons formuler comme première autocritique que le « calcul » de l'indice reste incomplet car il occulte partiellement la notion de territoire et les interactions spatiales qui rentrent en jeu dans la caractérisation des vulnérabilités. Ainsi, dans le cas du territoire où est implanté notre site, le calcul de l'indice ne prend pas en compte que la plupart des employés du site sont aussi riverains et que cette société investit énormément dans l'information du public. Ceci rend a priori la vulnérabilité de ce territoire bien plus faible qu'elle ne l'est calculée.

En outre, les aspects plus sociaux et qualitatifs sont peu considérés. L'interface SIG ne peut que refléter ces lacunes puisque qu'elle totalement dépendante des bases de données choisies.

Pour répondre partiellement à cette critique, le gros avantage de la méthode ARAMIS est de fonder l'étude de vulnérabilité sur le jugement d'expert qui définit les priorités. A l'avenir, le questionnaire de la méthode Saaty pourrait être utilisé localement à l'échelle du territoire afin d'élaborer des cartes reflétant la perception réelle des risques par les riverains. En cela, l'outil SIG et le questionnaire sont parfaitement flexibles et adaptables contextuellement. Il n'a toutefois pas été possible de procéder à une étude de sensibilité dans le cadre du projet, afin de mettre en valeur ces différences culturelles ou locales potentielles.

L'interprétation des cartes obtenues fait également apparaître un second problème, celui de l'échelle de vulnérabilité calculée. Il est en effet légitime de se demander pourquoi la vulnérabilité environnementale ou matérielle apparaît plus importante que la vulnérabilité humaine. Les facteurs de normalisation utilisés pour chaque type de cible semblent ici à remettre en cause en particulier pour les cibles humaines, alors qu'ils semblent plus adéquats pour les autres types de cibles. Le cas des ERP (paragraphe 5.3.1.2) est révélateur avec un facteur de normalisation à 30 000 qui écrase le poids de cette valeur. Pour mémoire, 30 000 est estimée comme le nombre maximal de personnes présentes simultanément dans un ERP, en l'occurrence le cas d'un stade.

En conclusion bien que toutes ces remarques soient fondamentales et préparent la suite de ce travail, elles ne remettent pas en cause, selon nous, l'intérêt de l'architecture ni la méthode qui fonde l'indice de vulnérabilité. En effet, bien que la pondération actuelle soit critiquable, que certains aspects sociaux soient occultés, la forme actuelle donnée à l'indice permet un maximum de flexibilité et d'évolution en fonction des améliorations futures. L'intégration de cette architecture dans les outils SIG a également été pensée pour être flexible et évolutive. Ainsi dans un menu d'utilisateur avancé, les facteurs de pondération peuvent être modifiés manuellement, l'échelle de valeurs/couleurs est modulable ainsi que la taille de la maille et de la carte.

La principale perspective de recherche consiste maintenant à améliorer la robustesse des facteurs de pondération, à la fois par une analyse locale de la perception des riverains pour certains facteurs et par une analyse spatiale plus approfondie du territoire pour d'autres facteurs moins subjectifs.

6. OPERATION E : AGREGATION DES RESULTATS ET TESTS SUR LE TERRAIN

6.1 OBJECTIFS

L'objectif premier d'ARAMIS est de développer une nouvelle méthode qui permettra d'évaluer le risque d'une installation industrielle, en tenant compte de l'efficacité des mesures et de l'organisation de la sécurité destinée à prévenir les risques d'accidents majeurs. En cela, le projet est bâti pour proposer une solution alternative aux approches purement déterministes ou probabilistes qui sont actuellement utilisées en Europe. A son terme, le projet pourrait aboutir à un outil harmonisé au niveau européen, utilisé par les experts de la gestion du risque industriel, aussi bien par l'industrie que par les autorités de contrôle.

Dans ce contexte, le chemin critique du projet était en particulier la confrontation des développements théoriques avec le terrain, qui seul permettra de juger de l'applicabilité la méthode et de son adéquation aux attentes des utilisateurs.

L'objet de cette opération est de préparer les études de cas sur le terrain puis d'assurer ensuite l'intégration des retours d'expérience afin de consolider la nouvelle méthode ARAMIS.

6.2 PRINCIPAUX RESULTATS

D'un point de vue général quant à l'organisation du projet, les développements théoriques (opérations A à D) se sont déroulés jusqu'en février 2004, et le reste de l'année 2004 a été consacrée à la réalisation des études de cas et l'intégration des retours d'expérience.

Hormis le choix et la réalisation des différentes études de cas, cette opération avait également pour mission de réfléchir à l'agrégation des quatre premières opérations entre elles et donc à la forme finale des résultats d'ARAMIS, à partir de la caractérisation des indices S, M et V.

6.2.1 Forme finale des résultats issus d'ARAMIS

Par construction, les indices S, M et V sont déjà à leur niveau des indices composés et multidimensionnels, qui impliquent déjà pour le décideur un fort niveau de simplification de la réalité donc corrolairement, une perte importante d'information.

L'indice V par exemple, n'a de sens de par sa construction que s'il est représenté sous la forme d'une carte des environs de l'établissement concerné. Intégrer l'ensemble des valeurs V calculées en fonction de l'éloignement par rapport au site serait réalisable et donnerait une valeur unique de V par site. Cependant, un tel résultat ne représente pas une aide à la décision efficace pour un décideur ou un industriel, qui préfère savoir où se situent les zones les plus sensibles et pour quelles raisons.

Après concertation avec l'ensemble des partenaires, il a été décidé que le résultat final d'ARAMIS prendrait la forme d'une double carte de risque, dont les valeurs en chaque maille i seraient composées de :

- Une valeur V calculée par quantification des différentes cibles pour la maille i ,
- Une valeur S (Sévérité) ou F (Fréquence), calculée par combinaison des différents scénarios de référence affectant la maille i , et choisis selon les critères de l'opération A.

L'élaboration d'une telle carte de risque requiert la superposition d'une carte de vulnérabilité et d'une carte de sévérité, selon des échelles de valeurs qui doivent être comparables et interprétables.

Cette décision a été prise en évaluant quelles sont les informations nécessaires ou indispensables dont doit disposer un gestionnaire des risques à la lecture d'une étude des dangers qui appliquerait la méthode ARAMIS. La forme choisie doit permettre une meilleure communication sur les résultats d'une analyse des risques, aussi facilement vulgarisable vers un public non technique de riverains ou de représentants de collectivités locales.

6.2.2 Etudes de cas

Compte tenu de la volonté d'harmonisation dans les objectifs d'ARAMIS, le choix des sites industriels sur lesquels a été testée la méthode était primordial. Nous nous sommes ainsi assurés que parmi les études de cas, seraient représentés des pays de culture probabiliste, des pays de culture déterministe, et des pays en pré-accession à l'union européenne, afin d'avoir un panel représentatif des différentes problématiques de gestion des risques industriels en Europe. Ont ainsi été retenus :

- Une papeterie non loin de Rouen (France), site Seveso II seuil haut, et notamment son installation de production de bioxyde de chlore, à partir de chlorate de soude, d'acide sulfurique et de méthanol.
- Plusieurs unités du complexe chimique G.E. PLASTICS aux Pays-Bas, site Seveso II seuil haut, et notamment les installations de réception et de stockage de chlore et de phosgène.
- Plusieurs unités de la raffinerie STATOIL au Danemark, site Seveso II seuil haut.
- Un dépôt d'hydrocarbures liquides CEPRO en République Tchèque, site Seveso II seuil haut.
- 1 petit site chimique PETROCHEM en Slovénie, site Seveso II seuil haut pour son unité de production de formaldéhydes.

Différentes équipes multidisciplinaires ont été essayées pour tester l'applicabilité de la méthode ARAMIS. Ainsi, une équipe de 3 personnes de l'INERIS (2 ingénieurs + un sociologue) et une personne de l'université de Catalogne ont mené l'étude pilote en France. Les sites pilotes du Danemark et des Pays-Bas ont été réalisés par 2 ingénieurs de la Faculté de Mons (responsables de l'opération A) accompagnés par des spécialistes en sciences humaines du Risoe au Danemark et de l'université de Delft aux Pays-Bas.

Les études de cas tchèque et slovène ont chacune été menées par une équipe du partenaire local du projet. L'objectif était de faire tester la méthode par un utilisateur parfaitement étranger au développement de la méthode et qu'il a donc fallu former à l'esprit puis aux outils fournis dans ARAMIS.

6.3 DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES

Les résultats purement techniques de test et d'application de la méthode ont déjà été intégrés dans chacune des quatre opérations décrites précédemment.

Au-delà donc de ce retour d'expérience technique, les études de cas nous ont enseignés d'autres points d'importance qu'il convient de signaler également ici.

ARAMIS est avant tout une méthode pédagogique d'évaluation des risques. Elle est très bien comprise par le public étudiant (nombre des partenaires du projet sont des universitaires) ainsi que par les industriels qui en cernent rapidement les principes et y voit un formidable moyen de communication tant en interne vers la hiérarchie de nos interlocuteurs, qu'en externe vers des non-spécialistes. Sont appréciées en particulier l'approche simplifiée d'évaluation de la performance des barrières et la représentation en nœud papillon.

S'agissant de la mise en pratique de la méthode, ARAMIS est une méthode **intégrée** d'évaluation des risques. A ce titre, elle recourt aux enseignements de différentes disciplines, et requiert donc plusieurs compétences pour être mises en œuvre :

- Une compétence en analyse technique des risques,
- Une connaissance du facteur humain et des systèmes de management,
- Une compétence en modélisation des phénomènes,
- Une connaissance des systèmes d'information géographiques.

Certes, toutes ses compétences sont nécessaires à la réalisation d'une étude des dangers réglementaire actuelle. Cependant la nécessité de recourir à une telle équipe multi-disciplinaire peut être perçue comme un frein et une lourdeur pour certains utilisateurs, car le temps d'apprentissage du travail en équipe est non négligeable (équivalent à environ une année dans le cadre du projet ARAMIS).

Cette multi-compétence nécessaire met également en avant un avertissement par rapport à ceux qui verraient dans ARAMIS, une méthode faussement simplifiée et extrêmement didactique. L'intégration des partenaires tchèque et slovène dans l'équipe nous ont prouvé que les besoins en formation sont importants avant une mise en œuvre cohérente de la méthode.

Le principal enseignement de cette opération, et donc un axe de travail et de valorisation particulièrement important pour la suite du projet sera de monter un programme de formation à la méthode ARAMIS, afin d'informer, entraîner et corriger les idées reçues des personnes potentiellement concernées par la réalisation ou l'évaluation d'une étude des dangers.

7. OPERATIONS F, G : VALORISATION DES RESULTATS ET ORGANISATION D'UN COMITE DE SUIVI

7.1 OBJECTIFS

L'originalité de l'approche proposée par ARAMIS réside dans l'intégration des trois indices S, M et V pour caractériser le niveau de risque d'un site. Même s'il s'agit d'un projet de recherche, l'approche est suffisamment novatrice pour nécessiter des échanges réguliers avec les utilisateurs potentiels de la méthode, tout au long de son développement.

Ces échanges doivent permettre une meilleure prise en compte des problèmes et besoins de ces utilisateurs, recadrer si nécessaire les axes de la recherche et favoriser en fin de compte l'adoption de la démarche.

7.2 PRINCIPAUX RESULTATS

L'opération F est exclusivement destinée à la dissémination et à la valorisation des résultats de la recherche. L'opération G consiste à organiser un comité de suivi du projet ARAMIS, comité de suivi constitué d'utilisateurs potentiels influents en Europe, à savoir des représentants des autorités compétentes de chaque état membre et des pays en voie d'accession, des représentants d'associations d'industriels.

7.2.1 Opération F

Concernant la valorisation de la recherche, la première étape réalisée dans cette opération a été de développer un site internet dédié à la méthode ARAMIS (<http://aramis.jrc.it>) qui permet de partager des nouvelles régulières sur l'avancement du projet et de garder un contact permanent avec des utilisateurs potentiels ou toute autre personne intéressée.

L'avancement du projet fait également l'objet de communications régulières lors de comités des Autorités Compétentes ou de conférences traitant d'analyse des risques et de sécurité industrielle. La liste actualisée des publications issues du projet est donnée dans le chapitre suivant. Citons en particulier pour cette année les sessions spéciales ARAMIS, organisées en juin 2004, au sein de la conférence internationale LOSS PREVENTION, à Prague, et en novembre 2004 au sein de la conférence annuelle SRA-E à Paris.

En conclusion du projet, il est enfin prévu d'organiser en début d'année 2005 un numéro spécial du Journal of Hazardous Material autour des résultats du projet ARAMIS, et plus largement sur le contexte et les évolutions de la sécurité industrielle en Europe. La table des matières de ce numéro spécial est aujourd'hui finalisée et l'écriture des articles est en cours.

7.2.2 Opération G

Le comité de suivi du projet a été constitué de quinze personnalités européennes, dont les noms et les fonctions respectives sont rappelées dans le tableau suivant.

AUTORITES COMPETENTES U.E.		
	Institution	Personne
1	European Commission Environment Directorate-General Unit ENV.E.1	M. Juergen WETTIG, Chairman of the Committee of the EU Competent Authorities for Directive 96/82/EC
2	Umweltbundesamt FG III.1.2 Anlagensicherheit, Störfallvorsorge, Umgang mit umweltgefährdenden Stoffen	Dr Jochen UTH
3	Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable - Direction de la Prevention des Pollutions et des Risques	M. Alain PAPON
4	Ministerie van Tewerkstellingen Arbeid - Directie Chemische Risico's	M. Peter VANSINA
5	RIVM - National Institute for Public Health and the Environment	Dr Jos G. POST
6	Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen - Fachbereich 84 - Anlagensicherheit	M. Axel WOLTER
7	Dirección General de Protección Civil - Ministerio de Interior	M. Francisco José RUIZ BOADA
8	Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten - Abteilung III/6 a	M. Michael STRUCKL
9	Health and Safety Authority - Process Industries Unit	M. Pat CONNEELY
10	Swedish Rescue Services Agency - Risk Management Section	M. Peter ALBERTSSON
11	Ministry of Environment and Spatial Planning - Office of Environment - Sector for Industrial Pollution and Environmental Risks	Mme Jasmina KARBA
12	Hungarian National Directorate for Disaster Management, Department for Prevention and Authoritative Affairs	M. Lajos KÁTAI-URBÁN
INDUSTRIE		
13	EPSC - European Process Safety Centre	Dr Jacques CALZIA Head of EPSC
CONSULTANTS EN RISQUE		
14	Swiss Institute of Safety & Security	M. Pablo LERENA
ORGANISATIONS INTERNATIONALES		
15	United Nation Environment Programme – UNEP - Division Technology, Industry and Economics - APELL	Mme Ruth Coutto

Tableau 24 : Comité de suivi du projet ARAMIS

Ce comité de suivi s'est réuni quatre fois au cours des trois dernières années avec un rythme environ semestriel.

Le 14 octobre 2002, lors de la première réunion, ont été présentés et discutés les objectifs du projet, ainsi que l'avancement des opérations A (identification des scénarios) et D (indice V).

Le 7 juillet 2003, lors de la seconde réunion, ont été présentés et discutés les premiers résultats issus des opérations B (indice S) et C (indice M).

Le 11 février 2004, lors de la troisième réunion, les membres du comité de suivi ont pu exprimer leur avis sur les développements théoriques finaux de la méthode. Cette réunion intervenait juste avant le lancement officiel des études de cas, et donc de la confrontation des partenaires avec les difficultés du terrain.

Ces réunions du comité de suivi donnent lieu à de comptes-rendus où les commentaires de chaque participant sont recueillis par écrit et auxquels il est répondu individuellement. A la marge des réunions, les discussions sont ensuite suivies d'échanges de courriers et courriers électroniques afin de maintenir un contact régulier et de faire évoluer la recherche. En parfaite transparence, la plupart de ces échanges est communiquée sur la partie publique du site internet du projet, dans la rubrique « Frequently Asked Questions ».

La dernière réunion du comité s'est tenu le 2 septembre 2004. Il s'agissait de présenter les premiers résultats concrets issus des études pilotes et d'échanger sur le caractère pratique et applicable de la méthode.

Bien que les commentaires soient aujourd'hui en cours de formalisation, il est à signaler qu'une compilation des avis du comité sera disponible d'ici deux mois sous la forme des principales recommandations et limites observées par des utilisateurs potentiels de la méthode. Ce document de synthèse sera ensuite joint au guide final d'utilisation de la méthode ARAMIS. Ces deux documents seront téléchargeables gratuitement sur le site internet du projet.

8. LISTE DES PRINCIPALES PUBLICATIONS

8.1 JOURNAUX SPECIALISES

Auteurs	Date	Titre	Journal	Référence
Duijm N. J., Hourtolou D.	Dec. 2004	New stakes and opportunities in the control of major accident hazards: outputs from the ARAMIS Project.	Numéro spécial du Journal of Hazardous Materials <u>15 articles en préparation</u>	Elsevier Science
Hourtolou D., Bouchet S. Salvi O.	Dec. 2003	Mieux démontrer la maîtrise des risques industriels : un outil innovant développé dans le cadre d'ARAMIS.	Phoebus, la revue de la sûreté de fonctionnement, France	N°27, pp. 31-43
Hourtolou, D. Salvi, O.	Mai-juin 2003	ARAMIS - Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the framework of SEVESO II directive.	Journal Préventique, France	N°69
Tixier J., Dusserre G., Salvi O., Gaston D.	2002	Review of sixty-two risk analysis methodologies.	Journal of Loss Prevention in the process industries	N°15. pp. 291-303
Kirchsteiger C.	2002	Towards harmonising risk-informed decision making: the ARAMIS and COMPASS projects.	Journal of Loss Prevention in the process industries	N°15. pp. 199-203

8.2 CONFERENCES, CONGRES

Auteurs	Date	Titre	Evénement / Référence	Type
Hourtolou D., Salvi O.	2004, 15-17 nov.	Discussion about the outputs of the ARAMIS projects. 5 presentations in a dedicated workshop	SRA-Europe 2004 Paris, France, 15 - 17 novembre 2004	Article + Prés.
Hourtolou D., Debray B., Salvi O.	2004, 31 mai, 3 juin	ARAMIS Project: Achievement of the integrated methodology and discussion about its usability from the case studies carried out on real sites	Loss Prevention 2004 Prague, Rép. Tchèque, 31 mai – 3 juin 2004	Article + Prés.
Delvosalle C., Fiévez C., Pipart A., Londiche H., Debray B.		ARAMIS Project: Effect of safety systems on the definition of Reference Accident Scenarios in SEVESO establishments		Article + Prés.
Planas E., Casal Fàbrega J.		ARAMIS project: application of the Severity Index		Article + Prés.
Duijm N.J., Madsen M., Andersen H.B., Goossens L., Hale A., Hourtolou D.		ARAMIS project: Effect of safety management's structural and cultural factors on barrier performance		Article + Prés.
Tixier J., Dandrieux A., Dusserre G., Bubbico R., Luccone L.G., Mazzarotta B., Silvetti B., Rodrigues N.		Vulnerability of the environment in the proximity of an industrial site		Article + Prés.

Auteurs	Date	Titre	Evénement / Référence	Type
Debray B., Delvosalle C., Fiévez C., Pipart A., Londiche H., Hubert E.	2004, 14 juin	Defining safety functions and safety barriers from fault and event trees analysis of major industrial hazards	ESREL'04 / PSAM 7 Berlin, Allemagne, 14-18 juin 2004	Article + Prés.
Duijm N.J., Hale A., Bernuchon E.		Evaluating and managing safety barriers in major hazard plants		Article + Prés.
Hourtoulou D., Salvi O.	2003, 5 Dec.	Vers une gestion européenne des risques et des crises ?	Forum GERI 2003, Sophia-Antipolis (F)	Prés.
Hourtoulou D.	2003, 9 oct.	Aramis project: development of an integrated accidental risk assessment methodology for industries	EU-PHARE twinning workshop & intern ^l conf. Cracovie, Pologne, 8-10 octobre 2003	Résumé + Prés.
Bernuchon E.	2003, 17 sept	Implémentation de la 61511, une méthode pratique développée dans le cadre du projet européen ARAMIS..	SIPI 61508 Conference, Paris, France	Prés.
Hourtoulou D.	2003, 23 juin	Aramis project: development of an integrated accidental risk assessment methodology in the framework of Seveso 2 directive.	SRA-Society for Risk Analysis, World Congress on Risk Bruxelles, Belgique, 22- 25 juin 2003	Article + Prés.
Hourtoulou D., Salvi O.	2003, 17 juin	Aramis project: development of an integrated accidental risk assessment methodology in the framework of the Seveso 2 directive.	ESREL 2003 Maastricht, Pays-Bas, 16-18 juin 2003	Article + Prés.
Delvosalle C. Fiévez C., Pipart A., Casal Fàbrega J., Planas E., Christou, M., Mushtaq F.		ARAMIS Project: Identification of Reference Accident Scenarios in SEVESO establishments.		Article + Prés.
Casal Fàbrega J., Planas E., Delvosalle, C., Fiévez C.		ARAMIS project: the severity index		Article + Prés.
Duijm N.J., Madsen M., Andersen H.B., Goossens L., Hale A., Hourtoulou D.		Assessing the effect of safety management efficiency on industrial risk		Article + Prés.
Tixier J., Dusserre G., Dandrieux A., Bubbico R., Luccone L.G., Mazzarotta B., Silvetti B., Hubert E., Rodrigues N., Salvi O.		Assessment of the environment vulnerability in the surroundings of an industrial site		Article + Prés.
Hourtoulou D., Rodrigues N.	2003, 26 mai	Harmonisation of vulnerability assessment around major-hazard sites : proposals from the ARAMIS project	EU-MEDIN Forum on Disaster Research Salonique, Grèce, 26-27 mai 2003	Article + Prés.
Hourtoulou D., Salvi O.	2002, 19 nov.	Aramis project: develop-ment of an accidental risk assessment methodology in the context of the Seveso 2 directive.	ESReDA 23 rd Semi-nar on Decision Ana-lysis: Methodology and Applications for Safety of Transporta-tion and Process Industries Delft, Pays-Bas, 18-19 nov. 2002	Article + Prés.

Auteurs	Date	Titre	Evénement / Référence	Type
Salvi O.	2002, 22 juil.	ARAMIS PROJECT - Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the frame-work of SEVESO II directive	SRA Europe Berlin, Allemagne 21-24 Juillet 2002	Article + Prés.
Salvi O., Hourtolou D.	2002, 19 juin	Industrial Safety: trends and issues	GDIN Conference Rome, 19-21 juin 2002	Article + Prés.
Salvi O., Kirchsteiger C., Delvosalle C., Duijm N.J., Casal Fàbrega J., Goossens L., Mazzarotta B., Lebecki K., Wybo J.L., Dusserre G., Londiche H., Calzia J.	2002 février	ARAMIS - Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the framework of SEVESO II directive	Comité des Autorités Compétentes : Urbanisa- tion et prévention des accidents majeurs Lille, France, fév. 2002	Article + Prés.
Salvi O., Kirchsteiger C., Delvosalle C., Duijm N.J., Casal Fàbrega J., Goossens L., Mazzarotta B., Lebecki K. Wybo J.L., Dusserre G., Londiche H., Calzia J.	2001, 10 oct.	ARAMIS - Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the framework of SEVESO II directive	Comité des Autorités Compétentes : Progress in European research on major accident hazards Anvers, 10 oct. 2001	Article + Prés.

9. BIBLIOGRAPHIE

9.1 OPERATION A

9.1.1 Méthode MIMAH

- Bellamy L., Van Der Schaff J. 2000. Major Hazard Management: Technical-Management Links and the AVRIM2 Method. *Seveso 2000 – Risk Management in the European Union of 2000 : The Challenge of Implementing Council Directive Seveso II, November 10-12, 1999. Athens.* Ed. by the European Commission, Joint Research Centre, Major Accident Hazard Bureau.
- Bernuchon E., Salvi O., Descourrière S., Delvosalle C. 2001. Improvement of the hazard identification and assessment in application of the Seveso II Directive. *Safety & Reliability – ESREL 2001 – Towards a safer world, 16-20 Sept. 2001, Torino, Italy.* Ed. E. Zio, M. Demichela, N. Piccinini, 2nd Volume, pp. 1249-1256
- Center for Chemical Process Safety (CCPS). 1993. Guidelines for Engineering Design for Process Safety. *American Institute of Chemical Engineers (AIChE), New York.*
- Delvosalle C., Benjelloun F., Fiévez C. 1998. Méthodologie, Guide d'application et Annexe technique pour l'Etude des Effets Domino. Major Risk Research Centre de la Faculté Polytechnique de Mons, juillet 1998.
- Delvosalle C., Fiévez C., Pipart A. 2003. MIMAH, Methodology for the Identification of Major Accident Hazards. Projet ARAMIS, deliverable D1A, July 2003.
- Goossens L.H.J., Cooke R.M. 1997. Application of some risk assessment techniques: formal expert judgement and accident sequence precursors. *Safety Science Vol. 26, N°1/2, pp. 35-47, 1997.*
- Guide de Maîtrise de l'Urbanisation, 1990. Maîtrise de l'Urbanisation autour des sites industriels à haut risque – Guide, Ed. Secrétariat d'Etat auprès du Premier Ministre chargé de l'Environnement et de la Prévention des risques technologiques et naturels majeurs – DEPPR- Service de l'Environnement Industriel
- Guide ISO/CEI 51. 1999. Aspects liés à la sécurité – Principes directeurs pour les inclure dans les normes.
- Lees F.P. 1986. Loss prevention in the process industry. *London, Butterworths.*
- Lees F.P. 1996. Loss Prevention in the Process Industries, hazard identification, assessment and control. *Second edition, Butterworth-Heinemann*
- Norme NF X60-500. 1988. Terminologie relative à la Fiabilité – Maintenabilité – Disponibilité.
- Projet de Guide ISO 73. 2001. Gestion du risque – Vocabulaire – Principes directeurs pour l'utilisation dans les normes.
- MARS database (Major Accident Reporting System).
<http://mahbsrv.jrc.it/mars/MARS-Technical-Guideline-February-2001.pdf>
- MHIDAS, Major Hazard Incident Data Service. *OHS_ROM, Reference Manual, April 2001.*

- TNO. 1997. “Yellow Book”, Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases). *CPR 14E, third edition, 1997*.
- Van der Mark R. 1996. Generic fault trees and the modeling of management and organisation, Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid (The Netherlands) and TUD (Delft University of Technology), Department of safety science.
- Vilchez J.A., Sevilla S., Montiel H., Casal J. 1995. Historical analysis of accidents in chemical plants and in the transportation of hazardous materials. *J. Loss Prev. Process Ind., Vol. 8, N°2, pp.87-96, 1995*
- Villemeur A. 1988. Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. *Paris: Eyrolles, 1988. 798 p.*

9.1.2 Barrières de sécurité

- Administration of labour safety, Technical inspectorate, Chemical Risks Directorate. 2001. Process safety study, Practical guideline for analysing and managing chemical process risks.
- Dennis C. Hendershot. Inherently safer design. *Journal of Loss Prevention in the process industry, vol 10, n°3, pp.151-157.*
- Dos Santos J., Lesbats M. et Perilhon P. 1993. Contribution à l’élaboration d’une science du danger. Actes des Assises Intern. des formations universitaires et avancées dans le domaine des sciences et techniques du danger. *Bordeaux: Ed. Inforisk, 1993.*
- Goossens L., Hale A., Lecoze J.C. 2002. Major Hazards Management in relation to Scenario Development, TUD/TBM/Safety Science Group.
- Harms-Ringdahl, L. 1998. Safety barriers and safety functions - a comparison of different applications. *Proceedings Society for Risk Analysis - Europe. The 1998 annual conference: Risk analysis: Opening the process. Paris, October 11-14.*
- Harms-Ringdahl, L. 1999. On the modelling and characterisation of safety functions. *Proceedings of ESREL'99 Conference. A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 1459-1462.*
- INSAG (International Nuclear Safety Advisory Group). 1996. Defence in depth in nuclear safety. *International Atomic Energy Agency, Vienna, 1996.*
- Perilhon, P. 2000. Eléments méthodiques. *Phoebus, 2000, n°12, p31-49*
- Project I-Risk. 1999. Development of an Integrated Technical and Management Risk Control and monitoring Methodology for Managing and Quantifying On-Site and Off-Site Risks. *May 1999.*
- Svenson, O. 1991 The accident Evolution and Barrier Function (AEB). Model Applied to Incident Analysis in the Processing Industries. *Risk Analysis, Vol. 11, No 3, 1991.*
- Uijt de Haag P.A.M., Laheij G.M.H., Post J.G., Ale B.J.M., Bellamy L.J. 2001. A method to judge the internal risk of establishments with dangerous substances. *RIVM, Bilthoven, 2001.*

9.2 OPERATION B

9.2.1 Indices de risque

- AJT. BCN. 1997. Ordenança de condicions de protecció contra incendis. Ajuntament de Barcelona.
- American Association of Cost Engineers. 1989. Cost Engineers' Notebook. Morgantown, WV: AACE.
- Binetti F. et al. 1990. *Metodo indicizzato per l'analisi e la valutazione del rischio di determinate attività industriali*. Tech. Report ISPESL.
- Carol, S., Vilchez, J. A., Casal, J. 2001. *Updating the economic cost of large-scale industrial accidents. Application to the historical analysis of accidents*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 13, 49-55.
- Cave S.R. and Edwards. D.W. 1997. Chemical Process Route Selection Based On Assessment of Inherent Environmental Hazard. *Computers chem. Engng, Vol. 21, Suppl., pp. S965-S970*.
- CEPREVEN. 1988. Evaluación del riesgo de incendio mediante el índice Gretener. CEPREVEN, Madrid.
- Chen-Shan Kao, Yih-Shing Duh. Chemical Runaway Reaction Hazard Index and Risk Assessment. Center for Industrial Safety and Health Technology, Industrial Technology Research Institute, Hsinchu, Taiwan.
- Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 31/3/1989. Applicazione dell'art. 12 del decreto del Presidente della Repubblica 17 maggio 1988, n. 175, concernente rischi rilevanti connessi a determinate attività industriali. Suppl. Gazzetta Ufficiale n. 93, 21/4/1989.
- DGPC. 1990. Métodos cualitativos para el análisis de riesgos. Guía técnica. Dirección General de Protección Civil. Ministerio de Justicia e Interior. Madrid.
- Díaz, D. 1991. Teoría de la Protección. Mapfre. Madrid.
- Dow Chemical Company. 1987. Corporate Safety and Loss Prevention, Fire and Explosion Index: hazard classification guide, 6th Edition.
- Edwards D.W., Lawrence D. 1993. Assessing the Inherent Safety of Chemical Process. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Vol. 71B, pp. 252-8*.
- Faisal I., Khan A.C., and Abbasi, S.A. 1998. Multivariate Hazard Identification and Ranking System. *Process Safety Progress, Vol.17, n°3, pp 157-170*.
- Fine, W. 1975. Evaluación matemática para control de riesgos. *Centro nacional de Información y Documentación. Barcelona*.
- INSHT. 1995. Indices de riesgo de procesos químicos. *INHST. Barcelona*.
- Lees F.P. 1996. Loss Prevention in the Process Industries, hazard identification, assessment and control. *Second edition, Butterworth-Heinemann*
- Levert J.M., Delvosalle C., Benjelloun F., Brognon F., Minguet P. 1994. Méthodes et outils pour la quantification des conséquences dans l'industrie chimique. *Ministère de l'Emploi et du Travail, Administration de la Sécurité du Travail, Inspection Technique, Faculté Polytechnique de Mons*.

- Lewis D.Y. 1979. The application of the Mond Index to plant layout and spacing. *Proceedings of the AIChE Loss Prevention Symposium, Houston, Texas, 1-5.*
- Lewis D.Y. 1979. The Mond Fire, Explosion and Toxicity Index – A development of the Dow Index technical manual for Mond Fire, Explosion and Toxicity Index, *Proceedings of the AIChE Loss Prevention Symposium, Houston, Texas, 1-5.*
- Mackay D., Paterson S. 1990. Fugacity Models in Karcher, W. & Devillers, J. (ed.). Practical Applications of Quantitative Structure-Activity Relationships (QSAR) in Environmental Chemistry and Toxicology, Kluwer, London.
- Mackay D., Paterson S. 1981. Calculating Fugacity. *Environ. Sci.Technol. 15(9) 1006-1014.*
- Mahoney D. 1995. Large property damage losses in hydrocarbon.chemical industries. A thirty-year review (16th ed.). USA: Marsh-McLennan Protection Consultants.
- Martínez, F. 1990. Sistema de evaluación y propuesta de tratamiento de riesgos SEPTRI. *Gerencia de riesgos, 19-28. Madrid.*
- Moniteur Belge. 1991. Indexation des dangers. Ministère de l'Emploi et du Travail.
- Munday, G., Philips, H., Singh, J., Windebank, C. S. 1980. Instantaneous fractional annual loss (IFAL). A measure of the hazard of an industrial operation. Basilea.
- Pintelon, L., Van Puyvelde, F. 1997. Estimating plant construction costs. *Chemical Engineering, 104, 98-104.*
- Purt, G. 1975. Sistema de evaluación del riesgo de incendio que puede servir de base para el proyecto de instalaciones automáticas de protección contra incendios. Euroalarm. Madrid.
- Roca, S., Pons, B. 1986. *La evaluación del riesgo potencial de incendio y explosión y su aplicación a un establecimiento industrial de proceso químico.* INSHT. Barcelona.
- Romano A., Rossini V., Servida A. 1992. *Industrial plant risk indices.* In "Environmental Impact Assessment", ed. by A. G. Colombo. Kluwer academic Publishers. Dordrecht,.
- Sarrat, P., Clutzer, D. 1979. Evaluation du risc d'incendie par le calcul. Paris.
- Scott, Asa, 1998. Environment-accident index: validation of a model. *Journal of Hazardous Materials 61 (1998) 305-312.*
- Steel, C. 1990. Risk estimation. *The Safety and Health Practitioner, june, 20.*
- Suarez A., Kirchsteiger C. 1998. A qualitative model to evaluate the risk potential of major hazardous industrial plants. Joint Research Centre, Institute for Systems, Informatics and Safety Major Accident Hazards Bureau (MAHB), Ispra, Italy.
- Tyler, B.Y. 1985. Using the Mond Index to measure inherent hazards. *Plant/Operations Progress, vol. 4, n°3, pp. 172-175.*
- Vílchez, J. A., Casal, J. 1990. Hazard index for runaway reactions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 4, 125-127.*
- Villanueva, J. L. 1995. NTP 100: evaluación del riesgo de incendio. *Método de Gustav Purt. INSHT. Barcelona.*

- Wantiez, P. 2000. Présentation et application de la "Méthode Kinney". Evaluation des risques industriels et justification des investissements de protection. *Faculté Polytechnique de Mons*.
- Whitehouse, H.B. 1985. IFAL – A new risk analysis tool. The Assessment and Control of Major Hazards. *Inst. Chem. Eng*, p. 309.

9.2.2 Terme source

- Arnaldos J., Casal J., Montiel H., Sanchez-Carricondo M., Vilchez J.A. 1998. Design of a computer tool for the evaluation of the consequences of accidental natural releases in distribution pipes. *Journal of Loss Prev. in the Process Industries*, 11, p. 135-148
- Bettis R.J., Nolan P.F. and Moodie K. 1987. *Two Phase Flashing Releases Following Rapid Depressurization Due to Vessel Failure*, Hazards from Pressure, I. Chem. E. Symp. Series, N°102, Instn Chem Engrs, p. 247-263.
- Brighton P.W.M. 1987. *Evaporation from a plane liquid surface into a turbulent boundary layer*, SRD/HSE report R375
- Cavanaugh T.A. 1994. *Simulation of vapor emission from liquid spills*, Journal of Hazardous Materials, 38, p. 41-63
- Deaves D.M., Gilham S., Mitchell B.H., Woodburn P. Shepherd A.M. 2001. *Modelling of catastrophic flashing releases*, Journal of Hazardous Materials A88, pp.1-32
- DIERS project: <http://www.aiche.org/diers>
- Duiser J.A. 1991. *Escape of liquefied gases from broken pipes*, TNO Division of technology for society, Departement of Industrial Safety, Apeldoorn, The Netherlands. Document transmis par G. Van Malder. See also "Methods for the calculation of physical effects" CPR 14 - Yellow Book - TNO - 2d edition.
- Gilham S., Mitchell B.H., Woodburn P., Deaves D.M. 1999. *Modelling of catastrophic flashing releases of liquid*, HSE, Contract Research Report CRR 250/1999, HSE Books
- Faculté Polytechnique de Mons, Région Wallonne, *SOURCE version 4.0, Guide théorique et manuel de l'utilisateur*, 1995
- Fannelöp T.K. 1994. *Fluid mechanics for industrial safety and environmental protection*, Industrial safety series, volume 3, Elsevier
- Fauske H.K. and Epstein M. 1988. *Source term considerations in connection with chemical accidents and vapour cloud modelling*, J. Loss Prev. Process Ind., Vol. 1, p. 75-83, April 1988
- Fauske H.K. and Epstein M. 1989. *Hazardous Vapor Clouds: Release Type, Aerosol Formation and Mitigation*, Presentation at the 6th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion, June 1989, Oslo, Norway, pp. 69-1 à 69-15.
- Fisher H.G. 1991. *An overview of emergency relief system design practice*, Plant/Op. Progress, Vol. 7, n° 3, July 1991, P. 153-158
- Giot M. 1994. *Two-phase releases*, J. Loss Prevention Process Ind., Vol. 7, n°2, p. 77
- Hardee H.C. and Lee D.O. 1975. *Expansion of clouds from pressurised liquids*, Accid. Anal. Prev. 7, pp.91-102

- Hess K., Hoffmann W. and Stoeckel A. 1974. *Propagation processes after the bursting of tanks filled with liquid propane – Experiments and mathematical model*, Loss Prevention and Safety Promotion , p.227
- Hougen O.A., Watson K.M. and Ragatz R.A. 1959. *Chemical Process Principles, Part II: Thermodynamics*, Second Edition, John Wiley & sons, Inc., New York, Chapman & Hall, Limited, London
- Ianello V., Rothe P.H., Wallis G.B., Diener R., Schreiber S. 1989. *Improved Source Term Definition for Modeling the Ambient Impact Release of Hazardous Liquids*, Presentation at the 6th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion, June 1989, Oslo, Norway, pp 58-1 à 58-30.
- Kawamura P.I. and McKay D. 1987. *The evaporation of volatile liquids*, Journal of Hazardous Materials, 15, p. 343-364
- Lantzy R.J. 1992. *Vapour cloud modelling workshops chairman's report*, Plant/Op. Progress, Vol.11, n°1, 1992, p. 41-45
- Leonelli P., Stramigioli C., Spadoni G. 1994. *The modelling of pool vaporization*, J. Loss Prev. Process Ind., Vol. 7, n)6, p. 443-450
- Leung J.C. and Grolmes M.A. 1987. *The discharge of two-phase flashing flow in a horizontal duct*, AIChE Journal, Vol.33, n°3, p. 524
- Maurer B., Hess R., Giesbrecht H. ad Leukel W. 1977. *Modelling of vapour cloud dispersion and deflagration after bursting of tanks filled with liquefied gas*, 2nd International Symposium on Loss Prevention, Heidelberg, September 1977
- McCabe W.L., Smith J.C., Hariott P. 1993. *Unit operations of chemical engineering*, Fifth Edition, McGraw-Hill Chemical Engineering Series
- McKay D., Matsugu R.S. 1973. *Evaporation rates of liquid hydrocarbon spills on land and water*, The canadian journal of chemical engineering, Vol. 51, p. 434-439
- Mikesell J.L., Buckland A.C., Diaz V., Kives J.J. 1990. *Evaporation of contained spills of multicomponent non-ideal solutions*, Proceedings of the international conference and workshop on modelling and mitigating the consequences of accidental releases of hazardous materials, New Orleans, USA
- Montiel H., Vilchez J.A., Casal J., Arnaldos J. 1998. *Mathematical modelling of accidental gas releases*, Journal of Hazardous Materials, 59, p. 211-233
- Roberts A.F. 1981/82. *Thermal radiation hazards from releases of LPG from pressurised storage*, Fire Safety Journal, 4(3), 197
- Sallet D.W. 1990. *Subcooled and saturated liquid flow through valves and nozzles*, J. of Hazardous Materials, 25, 1990, 2, p. 181-191
- Schmidli J., Banerjee S. and Yadigaroglu G. 1990. *Experiments on vapour/aerosol and pool formation on rupture of vessels containing superheated liquids*, J. Loss Prev. Process ind. 3, pp. 104-111
- Shaw P. and Briscoe F. 1978. *Evaporation from spills of hazardous liquids on land and water*, Safety and Reliability Directorate (SRD R100), United Kingdom Atomic Energy Authority
- Streeter V.L. and Wylie E.B. 1975. *Fluid Mechanics*, Sixth Edition, International Student Edition, McGraw-Hill Kogakusha Ltd

- Studer D.W., Cooper B.A., Doelp L.C. 1988. *Vaporization and dispersion modeling of contained refrigerated liquid spills*, plant Operations Progress Vol. 7, n)2, p. 127-135
- SuperChems 4.0 – A detailed consequence modelling package, A.D. Little, Inc; Cambridge, Massachusetts, USA
- Tilton J.N. and Farley C.W. 1990. *Predicting liquid jet break up and aerosol formation during the accidental release of pressurized hydrogen fluoride*, Plant / Operation Progress 9/2, p. 120-124
- TNO 1997. *Yellow Book, Methods for the calculation of physical effects*, CPR 14E, Editors: C.J.H. Van Den Bosch, R.A.P.M. Weterings, Committee for the prevention of disasters, The Hague
- Wallis G.B. 1969. *One-Dimensional Two-Phase Flow*, Mc Graw-Hill Book Co, NY, p 246.
- Webber D.M. 1990. *Model for pool spreading and vaporization and its implementation in the computer code GASP*, SRD/HSE report R507
- Wheatley C.J. 1986. *Factors Affecting Cloud Formation from Releases of Liquefied Gases*, I.Chem.E. Symposium on " Refinement of Estimates of the Consequences of Heavy Toxic Vapor Releases", Jan. 1986.
- Wheatley C.J. 1987. Discharge of liquid ammonia to moist atmospheres. Survey of experimental data and model for estimating initial conditions for dispersion calculations, SRD/HSE/R410, United Kingdom Atomic Energy, April 1987
- Woodward J.L. 1990. An integrated model for discharge rate, pool spread, and dispersion from punctured vessels. *J. Loss Prev. Process Ind., Vol.3*

9.2.3 Dispersion atmosphérique

- Abbott, M.B., Basco, D.R. 1989. Computational fluid dynamics. *Longman, Harlow*.
- Andronopoulos S.; Bartzis J.G.; Würtz J.; Asimakopoulos, D. 1994. Modelling the effects of obstacles on the dispersion of denser-than air gases. *J. Haz. Mater. Vol. 37, 327-352, 1994*.
- Beychok, M. R. 1995. Fundamentals of stack gas dispersion. *ISBN 0 9644 5880 2, 3rd Edition, 1995*.
- Bierly, E.W.; Hewson, E. W. 1962. Some restrictive meteorological conditions to be considered in the design of stacks. *Journal of Applied Meteorology. 1, pp. 383-390*.
- Bosanquet, C.H. and Pearson, J.L. 1936. The spread of smokes and gases from chimneys. *Trans. Faraday Soc. 32, 1249-1264, 1936*.
- Bricard, P; Friedel, L. 1998. Two-phase jet dispersion. *Journal of Hazardous Materials. 29, pp. 287-310, 1998*.
- Briggs, G.A; Britter, R.E.; Hanna, S.R.; Havens, J.A.; Robins, A.G.; Snyder, W.H. 2001. Dense gas vertical diffusion over rough surfaces: results of wind tunnel studies. *Atmospheric Environment, 35, 2265-2284, 2001*.
- Britter R.E. 1989. Atmospheric dispersion of dense gases. *Ann. Rev. Fluid Mech. 21, 317-344, 1989*.
- Casal, J.; Montiel, H.; Planas, E.; Vilchez, J.A. 1999. Análisis del riesgo en instalaciones industriales. *Edicions UPC, Barcelona, Spain, 1999*.

- Chan, S.T. 1992. Numerical simulations of LNG vapor dispersion from a fenced storage area. *J. Haz. Mater*, 30, 195-224, 1992.
- Cleaver, R.P.; Cooper, M.G.; Halford, A.R. 1995. Further development of a model for dense gas dispersion over real terrain. *Journal of Haz. Mat.*, vol. 40, pp. 85-108, 1995.
- Cleaver, R.P.; Edwards, P.D. 1990. Comparison of an integral model for predicting the dispersion of a turbulent jet in a crossflow with experimental data. *J. Loss Prev. Process Ind. Vol. 3*, pp. 91-96, 1990.
- Davidson, M.J.; Mylne, K.R.; Jones, C.D.; Phillips, J.C.; Perkins, R.J.; Fung, J.C.H.; Hunt, J.C.R. 1995. Plume dispersion through large groups of obstacles – A field investigation. *Atmospheric Environment, Vol. 29, No. 22*, pp. 3245-3256, 1995.
- Doury, A. 1988. A design basis for the operational modelling of atmospheric dispersion. *J. Loss Prev. Process Ind., Vol. 1*, pp. 156-163, 1988.
- Duijm, N.J.; Carissimo, B. 2002. Evaluation methodologies for dense gas dispersion models. In *"The Handbook of Hazardous Materials Spills Technology"*, ed. by M. Fingas. McGraw-Hill. New York, 2002.
- Duijm, N.J.; Carissimo, B.; Mercer, A.; Bartholome, C.; Giesbrecht, H. 1997. Development and test of an evaluation protocol for heavy gas dispersion models. *Journal of Hazardous Materials, vol 56*, pp. 273-285, 1997.
- Duijm, N.J.; Webber, D.M. 1994. Dispersion in the presence of buildings. *J. Loss Prev. Process Ind., Vol. 7, No. 2*, pp. 118-123, 1994.
- Epstein M., Fauske H.K., Hauser G.M. 1990. A model of the dilution of a forced two-phase chemical plume in a horizontal wind. *Journal Loss Prevention Process Industry 3*, pp. 280-290, 1990.
- Ermak, D.L., S.T. Chan, D.L. Morgan Jr., Morris, L.K. 1982. A Comparison of Dense Gas Dispersion Model Simulations with Burro Series LNG Spill Test Results. *J. Haz. Mater. 6*, 129-160, 1982.
- Fay, J.A. and Zemba, S.G. 1985. Dispersion of initially compact dense gas clouds. *Atmospheric Environmment, vol. 19*, 1257-1261, 1985.
- Fay, J.A. and Zemba, S.G. 1986. Integral model of dense gas plume dispersion. *Atmospheric Environment, vol. 20, No. 7*, 1347-1354, 1986.
- Fischer, H.B. 1966. Longitudinal dispersion in laboratory and natural streams. *Rep. No. KH-R-12, California Institute of Technology, Pasadena. 1966.*
- Germeles, A.E. and E.M. Drake. 1975. Gravity spreading and atmospheric dispersion of LNG vapor clouds. *Proc. 4th Int'l.Symp.on Transport of Hazardous Cargoes by Sea and Inland Waterways. Jacksonville, FL*, 519-539, 1975.
- Griffiths, R.F., Kaiser, G.D. 1982. Production of dense gas mixtures from ammonia releases. *J. Haz. Mater. 6*: 197-212, 1982.
- Hall, D.J.; Walker, S. 1997. Scaling rules for reduced-scale field releases of hydrogen fluoride. *Journal of Hazardous Materials. Vol. 54*, pp. 89-111, 1997.
- Hanna, S.R. 1979. Some statistics of Lagrangian and Eulerian Wind Fluctuations. *Journal of Applied Meteorology, Vol. 18*, pp. 518-525, 1979.
- Harden, T.O., Shen, H.T. 1979. Numerical simulation of mixing in natural rivers. *Am. Soc. Civ. Engin., 105 (HY4)*, 393-408. 1979.

- Havens J. A. 1982. A Description and Computational Assessment of the SIGMET LNG Vapor Dispersion Model. *Journal of Hazardous Materials*, 6, 1982.
- Havens J. 1992. Review of dense gas dispersion field experiments. *J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 5, No. 1, pp. 28-41, 1992.
- Havens J.A.; Spicer, T.O. 1985. Development of an atmospheric dispersion model for heavier-than-air mixtures. *US Coast Guard Report CG-D-22-85, vol. I-II-III. 1985.*
- Kunsch, J.P. and Webber, D.M. 2000. Simple box model for dense-gas dispersion in a straight sloping channel. *J. Haz. Mater. A75, 29-46, 2000.*
- Lamb, R.G. 1978. A numerical simulation of dispersion from an elevated point source in the convective planetary boundary layer. *Atmospheric Environment, Vol. 12, pp. 1297-1304, 1978.*
- Lau, Y.L., Krishnappan, B.G. 1981. Modelling transverse mixing in natural streams. *Am Soc. Civ. Engin.*, 107 (HY2), 209-226. 1981.
- Lines, I.G.; Deaves, D.M.; Atkins, W.S. 1997. Practical modelling of gas dispersion in low wind speed conditions, for application in risk assessment. *Journal of Hazardous Materials. Vol. 54, pp. 201-226, 1997.*
- Luk, G.K.Y., Lau, Y.L., Watt, W.E. 1990. Two-dimensional mixing in rivers with unsteady pollutant source. *J. Environ. Engin.*, 116, 125-143. 1990.
- Manju Mohan; Panwar, T.S.; Singh, P.M. 1995. Development of dense gas dispersion model for emergency preparedness. *Atmospheric Environment, Vol. 29, No. 16.*
- Manju Mohan; Siddiqui, T.A. 1998. Analysis of various schemes for the estimation of atmospheric stability classification. *Atmospheric Environment, vol. 32, No. 21, pp. 3775-3781, 1998.*
- McNulty, A.J. 1983. Dispersion of a continuous pollutant source in open channel. *PhD Thesis, University of Canterbury, Christchurch. 1983.*
- Ministerio de Industria y Energía. Manual de cálculo de altura de chimeneas industriales. *Madrid, 1981.*
- Monin, A.S.; Obukhov, A.M. 1954. Basic laws of turbulence mixing in the ground layer of the atmosphere. *Traus. Geophys. Inst. Akad. Nauk. SSSR, 24 (151), 163, 1954.*
- Montiel, H. 1997. Contribució a l'estudi de fuites accidentals en canonades de distribució de gas natural a mitjana pressió. *Ph.D. Tesis, UPC, 1997.*
- Moodie, K.; Ewan, B.C.R.: Jets discharging to atmosphere. *J. Loss Prev. Process Ind. Vol. 3, pp. 68- 76.*
- Muralidhar, R.; Jersey, G.R.; Krambeck, F.J.; Sundaresan, S. 1995. A two-phase release model for quantifying risk reduction for modified HF alkylation catalysts. *Journal of Hazardous Materials, 44, pp. 141-183, 1995.*
- Nielsen, M. and Ott, S. 1999. Heat transfer in large-scale heavy-gas dispersion. *Journal of Hazardous Materials, A67, pp. 41-58, 1999.*
- Nielsen, M. 2002. Spreading of cold dense clouds. In "The Handbook of Hazardous Materials Spills Technology", ed. by M. Fingas. *McGraw-Hill. New York, 2002.*
- Nokes, R.I. 1986. Problems in turbulent dispersion. *PhD Thesis, University of Canterbury, Christchurch. 1986.*

- Pasquill, F. 1961. The estimation of the dispersion of windborne material. *Meteorol. Mag.*, 90 (1063), 33-49, 1961.
- Pasquill, F. 1974. Atmospheric Diffusion. *Ellis Horwood Ltd., Chichester, 1974.*
- Pereira, J.C.F.; Chen, X.Q. 1996. Numerical calculations of unsteady heavy gas dispersion. *Journal of Hazardous Materials*, 46, 253-272, 1996.
- Puttock, J.S.; McFarlane, K; Prothero, A.; Rees, F.J; Roberts, P.T; Witlox, H.W.; Blewitt, D.N. 1991. Dispersion models and hydrogen fluoride predictions. *J. Loss Prev. Process Ind.*, 4, 16-28, 1991.
- Ramsdell, J.V. 1990. Diffusion in building wakes for ground-level releases. *Atm. Environment*, vol. 24B, No. 3, pp. 377-388, 1990.
- Ramsdell, J.V.; Fosmire, C.J. 1998. Estimating concentrations in plumes released in the vicinity of buildings: model development. *Atmospheric Environment*, vol. 32, No. 10, pp. 1663-1677, 1998.
- Runca, E. and Sardei, F. 1975. Numerical treatment of time dependent advection and diffusion of air pollutants. *Atmospheric Environment*, Vol. 9, pp. 69-80, 1975.
- Rutherford, J.C. 1994. River mixing. *Ed. John Wiley & Sons. 1994.*
- Sayma, A.I. and Betts, P.L. 1997. A finite element model for the simulation of dense gas dispersion in the atmosphere. *Int. J. Numer. Methods Fluids*, vol. 24, pp. 291-317, 1997.
- Schreurs, P. and Mewis, J. 1987. Development of a transport phenomena model for accidental releases of heavy gases in an industrial environment. *Atmospheric Environment*, vol. 21, No. 4, 765-776, 1987.
- Seinfeld, J.H. 1975. Air pollution – Physical and Chemical Fundamentals. New York: McGraw-Hill, 1975.
- Sharan, M.; Anil Kumar Yadav; Singh, M.P.; Agarwal, P.; Nigam, S. 1996. A mathematical model for the dispersion of air pollutants in low wind conditions. *Atmospheric Environment*, vol. 10, No. 8, pp. 1209-1220, 1996.
- Simpson, J.E.; Britter, R.E. 1982. Gravity currents in the laboratory, atmosphere, and ocean. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 14, 213-234, 1982.
- Slade, D.H. (ed). Meteorology and Atomic Energy 1968 (report). *Office of Inf. Services, Atom. Energy Comm., Wahington, DC. 1968.*
- Sutton, O.G. 1947a. A theoretical distribution of airborne pollution from factory chimneys. *Quart. J. Roy. Met. Roc.* 73, 426-436, 1947.
- Sutton, O.G. 1947b. The problem of diffusion in the lower atmosphere. *Quart. J. Roy. Met. Roc.* 73, 257-281, 1947.
- Sutton, O.G. 1953. *Micrometeorology*, McGraw-Hill, New York, 1953.
- Takeno, K.; Ichinose, T.; Tohuda, K.; Ohba, R.; Yoshida, K; Ogura, K. 1996. Effects of high expansion foam dispersed onto leaked LNG on the atmospheric diffusion of vaporized gas. *J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 9, No. 2, pp. 125-133, 1996.
- TNO – CPR 16. 1992. Methods for the determination of possible damage. First edition.
- TNO, Bureau for Industrial Safety. Methods for the calculation of the physical effects of the escape of dangerous material. *Gravenhage, 1979.*

- Turner, D.B. 1994. Workbook of atmospheric dispersion estimates an introduction to dispersion modeling. *Boca Raton [etc.] Lewis cop. 1994*
- Turner, J.S. 1986. Turbulent entrainment: the development of the entrainment assumption, and its application to geophysical flows. *J. Fluid Mech. 173, 431-471, 1986.*
- Van Ulden, A.P. 1992. A surface-layer similarity model for the dispersion of a skewed passive puff near the ground. *Atm. Environment, vol. 26A, No. 4, 681-692, 1992.*
- Vandroux-Koenig, S.; Berthoud, G. 1997. Modelling of a two-phase momentum jet close to the breach, in the containment vessel of a liquefied gas. *J. Loss Prev. Process Ind. Vol. 10, No. 1. -pp. 17-29, 1997.*
- Webber. D.M. 1991. Source terms. *J. Loss Prev. Process Ind., Vol. 4, pp. 5-15, 1991.*
- Webber, D.M.; Jones, S.J.; Martin, D. 1993. A model of the motion of heavy gas cloud released on a uniform slope. *J. Haz. Mater, 33, 101-122, 1993.*
- Webber, D.M.; Kukkonen, J.S. 1990. Modelling two-phase jets for hazard analysis. *Journal of Hazardous Materials. 23, 167-182, 1990.*
- Webber, D.M.; Mercer, A.; Jones, S.J. 1994. Hydrogen fluoride source terms and dispersion. *J. Loss Prev. Process Ind., Vol.7, No. 2, pp. 94-105, 1994.*
- Witlox, H.W.M. 1994a. The HEGADAS model for ground-level heavy-gas dispersion –I. Steady-state model. *Atm. Environment, vol. 28, No. 18, 2932-2917, 1994.*
- Witlox, H.W.M. 1994b. The HEGADAS model for ground-level heavy-gas dispersion –II. Time-dependent model. *Atm. Environment, vol. 28, No. 18, 2932-2917, 1994.*
- Woodward, J.L. 1993. Expansion zone modeling of two-phase and gas discharges. *Journal of Hazardous Materials, 33, pp. 307-318, 1993.*
- Woodward, J.L.; Papadourakis, A. 1995. Reassessment and reevaluation of rainout and drop size correlation for an aerosol jet. *J. Hazard. Mater. 44, pp. 209-230, 1995.*
- Yotsukura, N. and Cobb, E.D. 1972. Transverse diffusion of solutes in natural streams. *US Geol. Surv. Prof. Pap. No. 582-C. 1972.*
- Zannetti, P.: Air Pollution Modelling. 1990. Theories, Computational Methods and Available Software. *Computational Mechanics publications, 1990.*

9.2.4 BLEVE – Boule de feu

- Appleyard, R.D. 1980. Testing and Evaluation of the Explosafe System as a Method of Controlling the BLEVE. *Report TP2740, Transportation Development Centre, Montreal, Canada.*
- ASTM STP 825. 1983. A Guide to the Safe Handling of Hazardous Materials Accidents. *American Society of Testing and Materials, Philadelphia, PA.*
- Bagster, D.F. and Pitblado, R.M. 1989. Thermal Hazards in the Process Industry. *Chem. Eng. Prog., pp. 69-75.*
- Baum, M.R. 1982. *ASME J. Pressure Vessel Technol.*, 104, pp. 253-261.
- Baum, M.R. 1988. *ASME J. Pressure Vessel Technol.*, 110, pp. 168-176.

- Baum, M.R. 1999. Failure of a Horizontal Pressure Vessel Containing a High Temperature Liquid: the Velocity of End-cap and Rocket Missiles. *J. Loss Prev. Process Ind.*, 12, pp. 137-145.
- Baum, M.R. 2001. The velocity of large missiles resulting from axial rupture of gas pressurised cylindrical vessels. *J. Loss Prev. In Process Ind.*, 14, pp. 199-203.
- Bestratén, M. and Turmo, E. 1991a. Explosiones BLEVE (I): Evaluación de la Radiación Térmica. *Notas técnica de prevención NTP-293, Inst. Nac. Seg. Hig. Trab.*, Barcelona, Spain,.
- Bestratén, M. and Turmo, E. 1991b. Explosiones BLEVE (II): Medidas Preventivas. *Notas técnica de prevención NTP-294, Inst. Nac. Seg. Hig. Trab.*, Barcelona, Spain.
- Birk, A.M. 1995. Scale Effects with Fire Exposure of Pressure-Liquefied Gas Tanks. *J. Loss Prev. Process Ind.*, 8, pp. 275-290,.
- Birk, A.M. 1996. Hazards from Propane BLEVEs: An Update and Proposal for Emergency Responders. *J. Loss. Prev. Process Ind.*, 9, 173-181.
- Birk, A.M. and Cunningham, M.H. 1996. Liquid Temperature Stratification and its Effects on BLEVEs and their Hazards. *J. Haz. Mat.*, 48, pp. 219-237.
- Calpe, J. and Casal, J. 1989. BLEVE-Bola de Foc. Estudi Comparatiu de Models de Predicció d'Efectes. Proceedings of the *Conferència sobre seguretat ambiental*, pp. 389-404, Reus, Spain.
- Capdevila, J. 1994. Programa de càlcul per a l'estimació d'efectes i conseqüències de l'accident BLEVE/bola de foc. *Internal Report, CERTEC, Barcelona, Spain.*
- Casal, J.; Montiel, H.; Planas, E. and Vilchez, J.A., 1999. Análisis del Riesgo en Instalaciones Industriales. Edicions UPC, Barcelona, Spain,.
- Casal, J.; Arnaldos, J.; Montiel, H.; Vilchez, J.A., Planas, E., 2001. Modelling and understanding BLEVE. Handbook of Hazardous Materials Spills Technology, pp. 22.1-22.27, McGraw-Hill, Toronto,.
- CCPS, Center for Chemical Process Safety. 1994. Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapour Cloud Explosions, Flash Fires and BLEVEs. *AIChE, New York.*
- Fay, J.A. and Lewis, D.H., 1977. Unsteady Burning of Unconfined Fuel Vapor Clouds. *16th Int. Symp. Combustion*, pp. 1397-1405,.
- Hasegawa, K. and Kato, K. 1978. Study of the Fireball Following Steam Explosion of n-pentane", *2nd. Int. Symp. Loss Prevention*, pp. 297-305, Heidelberg.
- Holden, P.L. and Reeves, A.B. 1985. Fragment Hazards from Failures of Pressurized Liquefied Gas Vessels", *Chem. Eng. Symp. Ser.*, N° 93, pp. 205-217.
- Kayes, P.J. 1985. Manual of Industrial Hazard Assessment Techniques", *Technica*, pp. 70-75, Londres.
- Kletz, T. 1977. Protect Pressure Vessels from Fire. *Hydrocarbon Proc.*, pp. 98-102.
- Lees F.P. 1986. Loss Prevention in the Process Industries. *1*, pp. 519-528, Butterworth
- Lefin, Y., Mavrothalassitis, G., and Pineau, J.P. 1993. Knowledge Gained from Hazard Studies on Accident Investigations. *Chemical Industry and Environment*, 1, pp. 93-106 (J. Casal, ed.), Girona.

- Lewis D. 1991. Crescent City, Illinois: 21 June 1970. *Loss Prev. Bull.* 101, pp. 23-32
- Lihou, D.A. and Maunde, J.K. 1982. *Inst. Chem. Eng. Symp. Ser.*, n°71, pp. 191-224.
- Londiche, H. and Guillemet, R. 1991. Comparison of Three Protective Devices for BLEVE Prevention. *Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*, 1, pp. 551-564.
- Maddison, T.E. 1989. The Fire Protection of LPG Storage Vessels. The Design of Water Spray Systems. *LPGITA Seminar*, UK.
- Mañas, J.L. 1984. BLEVES, Their Nature and Prevention. *Fire*, June, pp. 27-39.
- Mcdevitt, C.A., Chan, C.K., Steward, F.R., and Tennankore, K.N. 1990. Initiation Step of Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions. *J. Haz. Mat.*, 25, pp.169-180.
- Nazario, F.N. 1988. Preventing or Surviving Explosions. *Chem. Eng.* pp. 102-109.
- Pietersen, C.M. and Cendejas, S. 1985. Analysis of the LPG Accident in San Juan Ixhuatepec, Mexico City. *TNO, Report 85-0222, Den Hage.*
- Planas-Cuchi, E., Casal, J., Lancia, A. And Bordignon, L. 1996. Protection of Equipment Engulfed in a Pool Fire. *J. Loss Prev. Process Ind.*, 9, pp. 231-240.
- Prugh, R.W. 1991. Quantify BLEVE Hazards. *Chem. Eng. Progr.*, pp. 66-72.
- Reid, R.C. 1976. Superheated Liquids. *Amer. Scientist*, 64, pp. 146-156.
- Reid, R.C. 1979. Possible Mechanism for Pressurized-Liquid Tank Explosions or BLEVES. *Science*, 203, pp. 1263-1265.
- Roberts, A.F. 1982. *J. Fire Safety Studies*, Vol. 4, p. 197.
- Satyanarayana, K., Borah, M. and Rao, P.G. 1991. Prediction of Thermal Hazards from Fireballs", *J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 4, pp. 344-347.
- Shebeko, Y.N., Shevchuck, A.P. and Smolin, I.M. 1996. BLEVE Prevention Using Vent Devices. *J. Haz. Mat.*, 50, pp. 227-238.
- Shield, S.1993. A model to predict radiant heat and blast hazards from LPG BLEVE. *AIChE Symposium, Series Heat Transfer, Atlanta.*
- Shield, S. 1995a. Fireball and explosion modelling. Safe handling of pressure liquefied gases, London.
- Shield, S. 1995b. The modelling of BLEVE fireball transients. Major Hazards Onshore -Offshore II, IChemE Symp. Series, 139.
- Sigalés, B. and Trujillo, A. 1990. Modelado de Estallido de Recipientes. *Ingeniería Química*, pp. 465-473.
- Townsend, W.; Anderson, C.; Zook, J. and Cowgill, G. 1974. Comparison of Thermally Coated and Uninsulated Rail Tank Cars Filled with LPG Subjected to a Fire Environment. *U.S. Department of Transport, Report N° FRA-OR8D, 75-32, Washington DC.*
- Van den Berg, A.C.and Lannoy, A. 1993. Methods for Vapor Cloud Explosion Blast Modelling. *J. Haz. Mat.*, 34, pp. 151-171.
- Venart, J.E.S. 2001. BLEVES: The Causes and Consequences – Recent Evidence. *Handbook of Haz. Mat. Spills Technology*, pp. 21.1-21.15, McGraw-Hill, Toronto.

- Vilchez, J.A., Planas-Cuchi, E. and Casal, J. 1993. Safety Measures in LPG Storage Design. *Proceedings of the 6th Mediterranean Congress on Chemical Engineering*, Vol. 1, pp. 353-354, Ed. Fira Barcelona, Barcelona, Spain.

9.2.5 Incendie et explosion (gaz, poussières, solides)

- Abrahams G R and Lindberg H E, 1976. Peak Load-Impulse Characteristics of Critical Pulse Loads in Structural Diagrams. *Nuclear Engineering and Design* 37, 35-46.
- Advisory Committee on Major Hazards. 1979. 2nd Report, Chapter 5, HMSO.
- Alkidas A. Study of Hazards from Burning Apparel and the Relation of Hazards to Test Methods. Second Final Report, Georgia Institute of Technology 31-12-72 NTIS:COM-73-10956.
- Baker W.E., Cox P.A., Kulescz J.J., Strehlow R.A. 1983. Explosion hazards and evaluation. Elsevier, New-York, USA.
- Baker, W E et al. 1975. Workbook for Predicting Pressure Wave and Fragment Effects of Exploding Propellant Tanks and Gas Storage Vessels. NASA CR-134906, NASA Lewis Research Centre.
- Baum, M R. 1987. Disruptive Failure of Pressure vessels: Preliminary Design Guide Lines for Fragment Velocity and the Extent of the Hazard Zone. CEGB Berkeley Nuclear Laboratories, CCSD/SIWP/(86) 41(P).
- Bessey, R L. 1974. Fragment Velocities from Exploding Liquid Propellant Tanks. *The Shock and Vibration Bulletin*, Bulletin 44.
- Bessey R., Land Kulesz, J.J. 1976. Fragment Velocities from Bursting Cylindrical and Spherical Pressure Vessels. *The Shock and Vibration Bulletin*, Bulletin 46.
- Bowles, P., Oswald, C.J. Building Debris Hazard Prediction Model. 24th Department of Defense Explosives Safety Board Seminary, pp. 2177- 2225.
- Bowman F. et al. 1984. Joint Australian / UK stack Fragmentation Trials, Phase I report, 21st Department of Defense Explosives Safety Board Seminar pp. 1461.
- Brasie, W., Cand Wimpson, D.W. 1968A. I Chem E Symposium on Loss Prevention, Vol 1.
- Bulletin of the Faculty of Engineering. 1982. 31, 185, Uehara Y, et al.
- Canvey. 1981. A Second Report, HMSO.
- Chan C, Moen I. O, and Lee J.H.S. 1983. Combustion and Flame 49, 27.
- Classton S and Donal P.J. 1977. The Effects of Nuclear Weapons. US Dept of Defence, Third Edition.
- Considine M. Thermal Radiation Hazard Ranges from Large Hydrocarbon Pool Fires. SRF Report N° 297.
- Crescent City Incident 21/06/70 SRD MHIDAS Database Printout.
- Davenport J A. 1977. A I Chem E Loss Prevention Symposium, Houston.
- Duplantier, C. 1996. Les phénomènes d'explosion résultant de la combustion de gaz de vapeurs et de brouillards dans des appareils clos. *Rapport Scientifique et Technique de l'INERIS, publication INERIS, RST04, nov. 96.*

- Factors Controlling Burning Time for Non-mixed Clouds of Fuel Gas. 1986. *IChemE Symposium Series N° 97. Manchester.*
- Flaring of Natural Gas from Inclined VentStacks. 1987. Presented at I Chem E North Western Branch Symposium of Hazards from Pressure UMIST Manchester.
- Grant R L, Murphy J N and Bowser M L. 1967. Bureau of Mines Report of Investigation 6921.
- Hardy J. 1947. Clin Invest 26, 1152.
- Hardy, J. 1953. Apply Physiol. 12, 725.
- Hazards Chemical Rockets and Propellants Handbook. 1972. Vol 1, AD889763.
- Holden, P.L. 1988. Assessment of Missile Hazards: Review of Incident Experience Relevant to Major Hazard Plant. SRD/HSE/R477.
- Hopkinson B. 1915. British Ordnance Board Minutes 13565.
- Hymes I. 1983. Physiological and Pathological Effects of Thermal Radiation, SRD Report No 2375.
- Hymes I. 1985. Brownson Nebraska Incident, 4/02/78, Loss Prevention Bulletin N° 61.
- Hymes I. 1985. Spectators and Other Vulnerable Exposed to Major Accident Hazards: An Emergency Services Headache ?, Loss Prevention Bulletin N° 61.
- Jarrett D.E. 1988. Amn NY Acad of Science 152, 18.
- Kingey C N and Pannil B.F. 1964. Peak Overpressure versus Scaled Distance for TNT Surface Bursts (Hemispherical Charges). Ballistics Research Laboratory memorandum Report Nr 1518.
- Kingman Arizona Incident, 05/07/73, SRD MHIDAS Database Printout.
- Kinney G.F. 1962. Explosive Shocks in Air, MacMillan, New York.
- Kletz T.A. 1977. A I Chem E Loss Prevention Symposium, Houston.
- Lees F.P. 1980. Loss Prevention in the process Industries, Vol. I and II, Butterworth.
- Lowell Gas Incident (Reviewed in Reference 10).
- Marshall, V.C. 1979. Disaster at Flixborough. Wheaton.
- Mavrothalassitis, G. 1989. Analyse critique du guide de l'USCIP pour l'élaboration des études de dangers. Document INERIS ref EXP-GMv/AD F42k/4 bis, 19/04/1989.
- Meldrim Georgia Incident, (Reviewed in Reference 9). SRD MHIDAS Printout.
- Mitzner G.A., Eyra J.A. 1982. *IChemE Symposium Series 71, p147.*
- Moorehouse J, Pritchard M.J. 1983. Thermal Radiation hazards from Large Pool Fires and Fireballs-Literature Review, I Chem E, Symposium Series No. 71 Manchester.
- NASA. 1965. Size and Duration of Fireballs from Propellant Explosions. TMA-53314.
- Neisser U. Temperature thresholds for Cutaneous Pain.
- Nijmegen Incident, 18/12/78, SRD MHIDAS Database Printout.
- Reed J.W. 1973. Distance Blast Predictions for Explosions. *Minutes of the Fifteenth Explosive Safety Seminary, Department of defence Explosive Safety Board, Washington DC, Volume 11, pp 1403-1424.*

- Roberts A.F. 1952. Thermal Radiation Hazards from Release of LPG from Pressurised Storage. *Fire Safety Journal*, 4, pp. 197-212.
- Spanish Campsite Incident, (reference 12).
- Stoll A.M., Quanta M.A. 1969. Heat Transfer Through Fabrics as Related to Thermal Injury., *Aerospace Medicine* 40, (11), 1232-1238.
- Strehlow R.A. and Baker W.E. 1976. *Prog Energy Combust Sci* 2, 27.
- Unsteady Burning of Unconfined Fuel Vapour Clouds. Sixteenth Symposium on Combustion. 1977.
- Walker F.W. 1969. Estimating Production and Repair Effort in Blast - Damaged Petroleum Refineries, SRI Project MV 6350-6.
- Wenzel H.G., Spitzer H. 1955. Glass als Schutz Stoff Gegen Warmstrahlung: Stahl und Eisen; No 4, 230-232.
- Wulff, W. et al. 1973. Ignition of Fabrics Under Radiative Heating. *Comb. Sci. Technol.*, 921-334.
- Zabetakis M.C. 1965. Bureau of Mines Bulletin 627.
- Zeuve J.P., Van Wingarden C.J.M and Daure R.M. 1983. I Chem E Symposium Series N°80, D20, Harrogate.

9.2.6 Boil-over

- Broekmann, B., Schecker, H. G. 1992. Boilover effects in burning oil-tanks. *7th Intern. Symp. on Loss Prev. and Safety Promotion in the Process Ind.. Taormina, Italy, 1992.*
- Chatris, J. M., Planas, E., Arnaldos, J., Casal, J. 2001. Effects of thin-layer boilover on hydrocarbon pool fires. *Combustion Science and Technology*, 171, 141-161.
- Garo, J. P., Vantelon, J. P. 1999. Thin layer boilover of pure and multicomponent fuels. *Prevention of hazardous Fires and Explosions*, 167-182.
- Michaelis P., Mavrothalassitis G., Hodin A. Boilover. Rapport interne TOTAL-EDF.

9.3 OPERATION C

- Bouchet S. 2001. Présentation des méthodes d'inspection TRAM, NIVRIM et AVRIM2 – Rapport INERIS, Programme Analyse des risques et prévention des accidents majeurs (DRA-07).
- Commission Electrotechnique Internationale. 1998. IEC 61508, Functional safety of electrical, electronic and programmable electronic safety-related systems, parts 1-7, Geneva.
- Commission Electrotechnique Internationale. 2001. IEC 61511, Functional safety instrumented systems for the process industry sector, parts 1-3, Geneva.
- CCPS. 2001. Layer of Protection Analysis: Simplified Process Risk Assessment. *American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety, New York, 2001.*
- Clément E. & Lacoursière J.P. 2000. Performance Indicators for Chemical Accidents Prevention, Preparedness and Response : The Canadian Stakeholders view, Dept of environment - University of Sherbrooke, Quebec, Canada.

- Committee for the Prevention of Disasters. 1999. Guidelines For Quantitative Risk Assessment – Purple Book. First Edition 1999.
- Dreher, H. 2000. The worldwide integrated Safety and Environment Audit Program of a Major Chemical Company, BASF AG Ludwigshafen, Germany. *Proc. Seveso 2000. Les terrains de la transposition, Bordeaux. 22-23 Juin 2000. Ed. Univ. Bordeaux 1.*
- Faé E. & Durka J.L. 2001. Conception et Evaluation de la sécurité fonctionnelle des systèmes instrumentés de process industriels. Rapport INERIS.
- Fulleringer D. 2001. Dispositifs de Sécurité Limitant les Risques d'émission accidentelle de gaz toxiques. Rapport DES n°438. Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, Département d'Evaluation de Sûreté.
- Gerard I., Zwetsloot J.M. 2001. Perspectives for the encouragement of inherently safer production in industrial firms, TNO Work & Employment, Netherlands. *In Proceedings Seminar on Progress in European Research on Major Accident Hazards, Antwerp, Belgium. 10 Octobre 2001. Ed. Federal Ministry of Employment and Labour.*
- Grenier B., Jacobsson A., Jennings K. and Schulberg F. 2001. Safety Performance Indicators – The OECD project
- Leroy A. 1998. Etude sur les indicateurs de sécurité des installations industrielles présentant des risques majeurs, MATE & Gan Industrie Services, France.
- Maddison T. 2000. Technical Risk Audit Method (TRAM). Development and application to the auditing of major hazard sites. Health And Safety Executive, UK.
- Malmén Y. and Schabel J. 2001. How SPASE assists small plants to identify their major accident hazards, VTT Automation / Risk Management, Finland. *In Proceedings Seminar on Progress in European Research on Major Accident Hazards, Antwerp, Belgium. 10 Octobre 2001. Ed. Federal Ministry of Employment and Labour.*
- Ministère Belge de l'Emploi et du Travail, 1997. Système d'Evaluation Métatechnique, Un système d'évaluation pour le management de la sécurité dans les industries de process. Version 1.0.
- Ministère des Affaires Sociales et de l'Emploi Néerlandais. 1999. NIVRIM – Une méthodologie pour les entreprises ne devant pas réaliser de rapport de sécurité dans le cadre de la réglementation BRZO 1999. Development and application to the auditing of major hazard sites - Rapport final n°135
- Oh J. et al. 2000. I-RISK : A quantified integrated technical and management risk control and monitoring methodology. European Commission. EUR 19320.
- Papadakis G.A. 2001. Safety Management Systems for Major Accident Hazards in Small and Medium Enterprises (SMMARTEN), Dpt of Prod. Eng. and Management, Tech. Univ. of Crete, Greece. *Proc. Sem. on Progress in European Research on Major Accident Hazards, Antwerp. 10 Oct. 2001. Ed. Fed. Ministry of Empl. and Labour.*
- Périlhion P. 2000. Du Risque à l'analyse de risques. Développement d'une méthode MOSAR : Méthode Organisée et Systématique d'Analyse de Risques.
- Plot, E., Lecoze, J.C. 2002. MIRIAM : an integrated approach to organise major risk control in hazardous chemical establishments. *ESREDA 23rd Seminar, Delft, The Netherlands. 18th November 2002.*
- Van Der Mark R. 1996. Generic Fault Trees and the Modeling of Management and Organisation. Ministère des Affaires Sociales et de l'Emploi Néerlandais

9.4 OPERATION D

- ARPAT, 2000. Analisi del rischio per l'area di Livorno e strategie di intervento. *Mossa Verre Ed., Firenze.*
- Bubbico R., Conforti M., Di Cave S., Mazzarotta B. 2001. Accuracy of territorial information in transportation risk analysis. *In proceedings Safety reliability ESREL 2001, Towards a safer world. 16-20 Septembre 2001.*
- Bubbico R., Di Cave S., Guerrieri A., Mazzarotta B. 2000. Best Routing for hazardous substances transportation. *Journal of Loss Prevention in process industries, sept. 2000.*
- Bubbico R., Ferrari C., Mazzarotta B. 2000. Risk analysis of LPG transport by Road and Rail. *Journal of Loss Prevention in process industries.*
- Egidi D., Foraboschi F., Spadoni G., Amendola A. 1995. The ARIPAR project: analysis of the major accident risks connected with industrial and transportation activities in the Ravenna area. *Rel. Eng. and System Safety. 75-89.*
- ESRI. 2000. ArcView, 2000 GIS, 3.2a for Windows.
- Evaluation des Risques issus des sites pollués. Pratiques des 16 pays européens.
- Fabiano B., Plazzi E., Curro F., Pastorino R. 2000. Risk assesment and decision making strategies in dangerous good transport. From an Italian case study to a general framework. *Journal of Loss Prevention in process industries, septembre 2000.*
- Guidi G., Ludovisi G., Mazzarotta B. 2001. Methodological approach for the evaluation, in economic terms, of the risk from industrial plants subject to council directive 96/82/CE (Seveso II). *In proceedings Safety reliability ESREL 2001, Towards a safer world. 16-20 Septembre 2001.*
- IFEN. 2002. Corine Land Cover cartographical databases, <http://www.ifen.fr>
- INSEE. 1999. CDROM Populations légales recensement de la population de 1999, <http://www.insee.fr>
- ISTAT. 1992. 13° Censimento generale della popolazione e delle abitazioni, Roma.
- Lacroix D., Cassini P., Hall R., Saccomanno F. 1999. Transport of dangerous goods through road tunnels : an integrated EQR model developed under the joint OECD/PIARC project ERS2. *International ESReDA Seminar Safety and Reliability in Transport. Oslo, 19-21 mai 1999.*
- Leonneli P., Spadoni G. 2001. Assesing risks to people and environment in road transport of flammable liquids. *In proceedings Safety reliability ESREL 2001, Towards a safer world. 16-20 Septembre 2001.*
- Lisi R., Milazzo M.F., Maschio G., Leoneli P., Bonvicini S., Spadoni G. 1999. Risk analysis of transportation of hazardous materials : an application of TRAT2 software to Messina. *Journal of Loss Prevention in process industries, septembre 1999.*
- Mazziani M., Barlettani M., Conti S., Volta G. 2001. HARIA-2. A computer supported approach to emergency planning and responses. *In proceedings Safety reliability ESREL 2001, Towards a safer world. 16-20 Septembre 2001.*
- Norme ISO 14001 : Système de management environnemental, Spécifications et grandes lignes directrices pour l'utilisation.

- Norme ISO 14004 : Systèmes de management environnemental, Lignes directrices générales concernant les principes, systèmes et techniques de mises en œuvre.
- Saaty T.L. 1984. Décider face à la complexité. *Les éditions ESF*.
- TeleAtlas B.V. 1996. Roadnet.

10. LISTE DES ANNEXES

- ANNEXE 1 : Protocoles d'audit développés pour évaluer la structure de management d'une organisation sécurité
- ANNEXE 2 : Questionnaire de culture sécurité développé pour recueillir les pratiques réelles et informelles d'une organisation sécurité
- ANNEXE 3 : Questionnaire type utilisé pour collecter les avis d'experts dans l'évaluation des priorités en terme de vulnérabilité de l'environnement.

ANNEXE 1 :

**PROTOCOLES D'AUDIT DEVELOPPES POUR EVALUER LA STRUCTURE
DE MANAGEMENT D'UNE ORGANISATION SECURITE**

ANNEXE 2 :

**QUESTIONNAIRE DE CULTURE SECURITE DEVELOPPE POUR
RECUEILLIR LES PRATIQUES REELLES ET INFORMELLES
D'UNE ORGANISATION SECURITE**

ANNEXE 3 :

**QUESTIONNAIRE TYPE UTILISE POUR COLLECTER LES AVIS
D'EXPERTS DANS L'EVALUATION DES PRIORITES EN TERME DE
VULNERABILITE DE L'ENVIRONNEMENT**