



*INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES*

# **Analyse des risques et prévention des accidents majeurs (DRA-007)**

Rapport final – Opération a

**ASSURANCE**

ASSESSMENT of the Uncertainties in Risk Analysis  
of Chemical Establishments

Projet U.E. ENV4-CT97-0627

*D. HOURTOLOU*

*Direction des Risques Accidentels*

SEPTEMBRE 2002

# ASSURANCE

## ASSESSMENT OF THE UNCERTAINTIES IN RISK ANALYSIS OF CHEMICAL ESTABLISHMENTS

Rapport final – Opération a - DRA-07

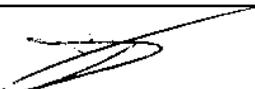
Projet U.E. ENV4-CT97-0627

**24 SEPTEMBRE 2002**

### PERSONNES AYANT PARTICIPE A L'ETUDE

D. HOURTOLOU

Ce document comporte 59 pages (hors couverture et annexes).

	<b>Rédaction</b>	<b>Vérification</b>	<b>Approbation</b>
<b>NOM</b>	David HOURTOLOU	Olivier SALVI	Didier GASTON
<b>Qualité</b>	Ingénieur à la Direction des Risques Accidentels	Responsable du projet DRA-07 Analyse des Risques	Directeur adjoint aux Risques Accidentels
<b>Visa</b>			

## TABLE DES MATIERES

<b>1. RÉSUMÉ .....</b>	<b>4</b>
<b>2. INTRODUCTION .....</b>	<b>5</b>
2.1 CONTEXTE .....	5
2.2 OBJECTIFS.....	5
2.3 DÉROULEMENT .....	6
2.4 CONTENU DU RAPPORT .....	7
<b>3. DESCRIPTION DE L'INSTALLATION DE RÉFÉRENCE.....</b>	<b>8</b>
<b>4. ANALYSE QUALITATIVE DES RISQUES.....</b>	<b>9</b>
4.1 DÉMARCHE SUIVIE PAR L'INERIS .....	9
4.1.1 <i>Méthode d'identification des dangers</i> .....	9
4.1.2 <i>Critères retenus pour la hiérarchisation des risques</i> .....	10
4.2 RÉCAPITULATIF DES MÉTHODES EMPLOYÉES PAR LES DIFFÉRENTS PARTENAIRES .....	12
4.3 ANALYSE ET COMPARAISON DES DIFFÉRENTES MÉTHODES .....	13
4.3.1 <i>Comparaison des différentes méthodes d'analyse inductive</i> .....	13
4.3.2 <i>Une méthode d'analyse déductive : l'arbre de défaillances</i> .....	14
4.3.3 <i>Comparaison de deux méthodes basées sur le jugement d'expert</i> .....	15
4.4 CRITÈRES DE CLASSIFICATION RETENUS PAR LES DIFFÉRENTS PARTENAIRES .....	17
4.4.1 <i>Comparaison des catégories de probabilités</i> .....	17
4.4.2 <i>Comparaison des catégories de conséquences</i> .....	19
4.4.3 <i>Critères de sélection des scénarios retenus pour l'analyse approfondie</i> .....	20
4.5 CHOIX DES SCÉNARIOS POUR L'ANALYSE QUANTITATIVE.....	21
4.6 CONCLUSION QUANT À L'ANALYSE QUALITATIVE DES RISQUES.....	23
<b>5. ANALYSE QUANTITATIVE DES RISQUES.....</b>	<b>24</b>
5.1 ÉVALUATION DES PROBABILITÉS .....	24
5.1.1 <i>Comparaison des méthodes de quantification employées</i> .....	24
5.1.2 <i>Comparaison des calculs de probabilité</i> .....	25
5.1.3 <i>Analyse des sources d'incertitudes</i> .....	25
5.1.4 <i>Conclusions quant aux démarches utilisées</i> .....	27
5.2 ÉVALUATION DES CONSÉQUENCES.....	27
5.2.1 <i>Distances d'effets calculées pour les 11 scénarios de référence</i> .....	27
5.2.2 <i>Sources d'incertitude liées au calcul du terme source</i> .....	28
5.2.3 <i>Sources d'incertitude liées aux modèles de dispersion atmosphérique</i> .....	29
5.2.4 <i>Sources d'incertitude liées aux seuils de toxicité utilisés</i> .....	30
5.3 ÉVALUATION DU RISQUE SOCIÉTAL ET INDIVIDUEL.....	31
5.4 CONCLUSION QUANT À L'ANALYSE QUANTITATIVE DES RISQUES .....	32
<b>6. ETUDES DE CAS.....</b>	<b>34</b>
6.1 DESCRIPTION SUCCINCTE .....	34
6.2 EXEMPLES DE RÉSULTATS OBTENUS .....	35
6.2.1 <i>Cas n°1</i> .....	35
6.2.2 <i>Cas n°2</i> .....	37
6.2.3 <i>Cas n°3</i> .....	38
6.2.4 <i>Cas n°4</i> .....	39
6.2.5 <i>Cas n°5</i> .....	41
6.2.6 <i>Cas n°6</i> .....	41
6.3 CONCLUSIONS DE L'EXERCICE .....	41

<b>7.</b>	<b>BILAN COMPARATIF DES AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS ENTRE MÉTHODES DÉTERMINISTE ET PROBABILISTE.....</b>	<b>43</b>
7.1	DÉFINITIONS .....	43
7.1.1	<i>Le concept de défense en profondeur .....</i>	43
7.1.2	<i>L'approche déterministe .....</i>	44
7.1.3	<i>L'approche probabiliste.....</i>	44
7.2	COMPARAISON DES DEUX APPROCHES DÉTERMINISTE ET PROBABILISTE DANS UN PROCESSUS COMPLET D'ANALYSE ET DE GESTION DES RISQUES .....	45
7.2.1	<i>Etape d'identification des dangers et de hiérarchisation des risques.....</i>	45
7.2.2	<i>Etape du choix des scénarios pour la phase de quantification.....</i>	46
7.2.3	<i>Quantification des scénarios choisis : calcul des probabilités.....</i>	46
7.2.4	<i>Quantification des scénarios choisis : calcul des conséquences .....</i>	47
7.2.5	<i>Critères d'acceptabilité du risque majeur présenté par le site .....</i>	48
7.2.6	<i>Etape de la gestion des risques : maîtrise de l'urbanisation, PPI , information du public.....</i>	49
7.3	AVIS DE L'INERIS.....	50
7.3.1	<i>Approche probabiliste / approche déterministe.....</i>	50
7.3.2	<i>Approche par les barrières de défense .....</i>	51
<b>8.</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>53</b>
<b>9.</b>	<b>GLOSSAIRE .....</b>	<b>56</b>
<b>10.</b>	<b>RÉFÉRENCES.....</b>	<b>57</b>
<b>11.</b>	<b>LISTE DES ANNEXES.....</b>	<b>59</b>

## 1. RESUME

---

Le projet ASSURANCE (ASSessment of the Uncertainties in Risk Analysis of Chemical Establishments) fait suite avec une dizaine d'années de recul, à un autre projet européen intitulé BEMHA : Benchmark Exercise on Major Hazards Analysis.

L'objectif d'ASSURANCE était de faire une analyse comparée des méthodes d'analyse des risques et des approches sécurité à travers l'Europe. Pour cela, le projet d'une durée de trois ans (1998-2001) a réuni neuf organismes européens experts en analyse des risques, qui ont évalué les risques d'une installation chimique réelle prise en référence.

En tirant les leçons du premier benchmark, ASSURANCE s'est attaché dans le découpage des différentes étapes du projet, à mieux cadrer le travail des experts, pour ainsi permettre la comparaison des résultats intermédiaires qui influent sur l'évaluation finale du risque. C'est ainsi qu'ont été successivement comparées les méthodes d'identification des dangers et de hiérarchisation des risques, de sélection des scénarios d'accidents à quantifier, d'évaluation des probabilités d'occurrence de ces scénarios puis de leurs conséquences.

Le présent rapport résume les principaux constats que l'INERIS dresse, en tant que partenaire, à la fin de ce projet européen.

Le facteur le plus important dans la variabilité des résultats est finalement lié au jugement d'expert, c'est-à-dire à l'expérience et à la connaissance des phénomènes par l'analyste, qui vont lui permettre de définir les hypothèses les plus réalistes dans les scénarios modélisés.

L'INERIS a ensuite voulu profiter de son expérience dans le projet ASSURANCE, pour proposer quelques points de comparaison entre les approches déterministe et probabiliste du risque. Il en ressort en substance que dans le cadre d'une démarche de gestion des risques autour des sites classés, aucune des deux approches n'est parfaitement adaptée pour baser une politique cohérente et transparente de gestion.

Une solution alternative proposée dans ce rapport, serait alors de s'appuyer sur le concept des barrières de défense et de la défense en profondeur, qui est le principe fondateur de la sécurité, dans les installations nucléaires ou industrielles en France. De l'avis de l'INERIS, l'approche par barrières de défense permet plus de transparence dans la présentation de la gestion des risques, et donc une communication mieux perçue au final par le public et les associations. Plusieurs pays européens s'orientent d'ailleurs peu à peu vers cette approche, tels que la Grande-Bretagne (HSE) et les Pays-bas (Ministère néerlandais du travail).

Le projet ASSURANCE est un réel succès et ouvre de nombreuses perspectives. A ce titre, l'INERIS propose d'organiser le même type d'exercice au plan national, par exemple entre trois ou quatre principaux tiers experts français. Un tel projet favoriserait l'échange mutuel des connaissances, et l'approche française de la sécurité en sortirait certainement enrichie.

Au niveau européen, le projet ARAMIS (Accidental Risk Assessment Methodology for IndustrieS) vient de débiter. Ce projet coordonné par l'INERIS, a pour objectif de développer une méthode harmonisée d'analyse des risques qui sache intégrer les points forts des méthodes de chaque partenaire européen. Les conclusions tirées du projet ASSURANCE seront certainement mises à profit dans un avenir proche, pour servir les objectifs très complémentaires de ce nouveau projet.

## 2. INTRODUCTION

---

### 2.1 CONTEXTE

Depuis plus d'une vingtaine d'années, les méthodes d'analyse des risques n'ont cessé d'évoluer et leurs résultats sont désormais devenus déterminants auprès des décideurs en matière de gestion du risque autour des établissements à hauts risques. L'intérêt toujours croissant d'améliorer la connaissance des risques générés par ces établissements fait en partie suite à l'occurrence de certains grands accidents industriels qui ont marqué les mémoires : Flixborough (1974), Seveso (1976), Bhopal (1984), Mexico City (1984) pour ne citer que ceux-là (cf. Khan et al. [1]).

Aujourd'hui, les outils d'analyse des risques sont utilisés pour argumenter les décisions prises concernant la délivrance des autorisations d'exploiter, la maîtrise de l'urbanisation et l'élaboration des plans de secours. Toutefois, des différences d'approche et de méthodes subsistent parmi les spécialistes, et l'incertitude dans l'évaluation finale des risques est parfois importante, qu'elle soit due aux modèles employés, à des divergences sur les paramètres choisis ou les hypothèses liées aux scénarios d'accidents considérés.

Pour mieux comprendre l'origine de ces incertitudes, le JRC<sup>1</sup> ISPRA a organisé et conduit entre 1989 et 1991, un premier projet européen de comparaison des différentes méthodes, modèles et techniques d'analyses des risques alors employés par différents experts de l'Union Européenne. Ce projet s'intitulait BEMHA : Benchmark Exercise on Major Hazards Analysis. Cet exercice a révélé une grande disparité des résultats obtenus par chaque expert sur une même installation chimique de référence, sans permettre toutefois de clairement identifier les facteurs, ni l'influence de chaque facteur dans la disparité globale.

Une dizaine d'années plus tard, l'état de l'art et les techniques d'évaluation des risques ont fortement évolué. Les phénomènes physiques (dispersion, incendie, explosion) sont mieux connus, les modèles sont plus précis, les bases de données probabilistes sont plus étoffées. En tirant les leçons du premier projet BEMHA, le RISØ<sup>2</sup> et le JRC ISPRA organisent en 1998 un second projet européen pour comparer les différentes méthodes d'analyse de risques sous l'acronyme ASSURANCE : ASSESSMENT OF THE UNCERTAINTIES IN RISK ANALYSIS OF CHEMICAL ESTABLISHMENTS.

### 2.2 OBJECTIFS

Comme lors du premier exercice de benchmark, l'objectif de ce nouveau projet était de réunir différents instituts européens experts de l'analyse des risques et de les faire travailler sur une seule installation chimique réelle prise en référence.

La différence notable avec le projet BEMHA réside dans le découpage des étapes du projet, prévu pour mieux cadrer le travail des experts, et ainsi permettre la comparaison des résultats intermédiaires qui interviennent dans l'évaluation finale du risque.

---

<sup>1</sup> JRC : Joint Research Centre

<sup>2</sup> RISØ National Laboratory : Institut de recherche danois

Les trois objectifs principaux du projet ASSURANCE sont les suivants :

- mesurer la variabilité totale des résultats obtenus par chaque partenaire,
- mesurer la contribution à la variabilité totale de chaque phase d'une analyse complète des risques (définition des scénarios, des probabilités, modélisation des conséquences, etc.),
- mesurer la contribution de chaque facteur d'incertitude identifié à la variabilité totale des résultats.

### 2.3 DEROULEMENT

Le projet ASSURANCE rassemble neuf organismes de recherche européens :

- deux coordinateurs du projet : RISØ et JRC ISPRA,
- sept partenaires réalisant les analyses de risques de l'installation de référence : DNV-TECHNICA (GB), HSE (GB), NCSR DEMOKRITOS (Grèce), TNO (P-B), DICMA-Université de Bologne (Italie), VTT (Finlande) et l'INERIS.

Le projet a débuté en 1998 pour s'achever à l'automne 2001. Les rapports finaux ont été envoyés à la commission européenne au mois de mars 2002. Le projet ASSURANCE s'est ainsi déroulé suivant cinq phases consécutives :

- **Phase 1** (durée initiale : 6 mois) : visite de l'établissement chimique pris en référence puis phase de collecte des informations et de la documentation,
- **Phase 2** (durée initiale : 6 mois) : évaluation qualitative des risques, c'est-à-dire l'identification des dangers et la hiérarchisation des risques,
- **Phase 3** (durée initiale : 6 mois) : évaluation quantitative des risques, c'est-à-dire l'évaluation des conséquences, et la quantification du risque individuel et du risque sociétal,
- **Phase 4** (durée initiale : 10 mois) : organisation de petits exercices (études de cas) sur des points spécifiques de l'évaluation des risques, afin d'étudier leur influence sur les résultats finaux,
- **Phase 5** (durée initiale : 5 mois) : évaluation des résultats, conclusions et rédaction du rapport final par le coordinateur du projet.

Les experts des neuf organismes de recherche membres du projet (cf. liste des contacts en annexe A) se sont réunis à six reprises tout au long des trois années du projet, soit au rythme d'une réunion d'avancement tous les six mois :

- la réunion de lancement du projet a eu lieu en mai 1998,
- une seconde réunion s'est tenue en novembre 1998, au sein du site chimique pris comme installation de référence. Il s'agissait du début de la phase de recueil d'informations,
- en juin 1999, la troisième réunion marquait la fin de la phase d'évaluation qualitative des risques,

- en mai 2000, la quatrième réunion marquait la fin de la phase d'évaluation quantitative des risques,
- en novembre 2000, la cinquième réunion a permis la comparaison et la discussion autour des différents cas modélisés par chaque partenaire,
- en mars 2001, les partenaires se sont réunis une dernière fois pour discuter des conclusions à tirer de l'exercice de benchmark, et du projet de rapport final.

Pour mémoire, la participation de l'INERIS a été financée par la commission européenne à hauteur de 50 %, et pour le reste par le programme DRA-07 Analyse des Risques et Prévention des Accidents Majeurs. Ce travail a constitué l'opération A de ce programme.

## **2.4 CONTENU DU RAPPORT**

Le présent rapport est rédigé dans le cadre du programme DRA-07. Il résume les principales conclusions que l'INERIS tire de sa participation à ASSURANCE. Dans ce but, ce rapport ne se veut pas exhaustif et ne représente qu'une vue partielle du projet ASSURANCE. Pour plus de détails sur le déroulement du projet et sur l'étude comparative menée de façon très complète par le RISØ et le JRC ISPRA, le lecteur est invité à se reporter sur les rapports finaux du projet, dont les références sont fournies à la fin du présent rapport [3], [4].

Après une brève description des installations ayant servi de référence tout au long du projet, ce rapport présente successivement les étapes d'analyse qualitative des risques, d'analyse quantitative puis les études de cas ciblées sur des points spécifiques. Pour chacune de ces trois parties, les approches développées par chaque partenaire sont d'abord décrites, puis comparées entre elles. Les principales différences relevées lors de la comparaison sont alors mises en lumière, en s'attachant surtout sur celles génératrices des incertitudes les plus importantes dans les résultats finaux.

Dans une dernière partie, l'INERIS propose en s'appuyant sur les résultats du projet, une comparaison entre les approches déterministe et probabiliste du risque, et tente finalement de dégager une conclusion générale sur l'ensemble de ces comparaisons puis sur l'intérêt global d'un projet de benchmark tel qu'ASSURANCE.

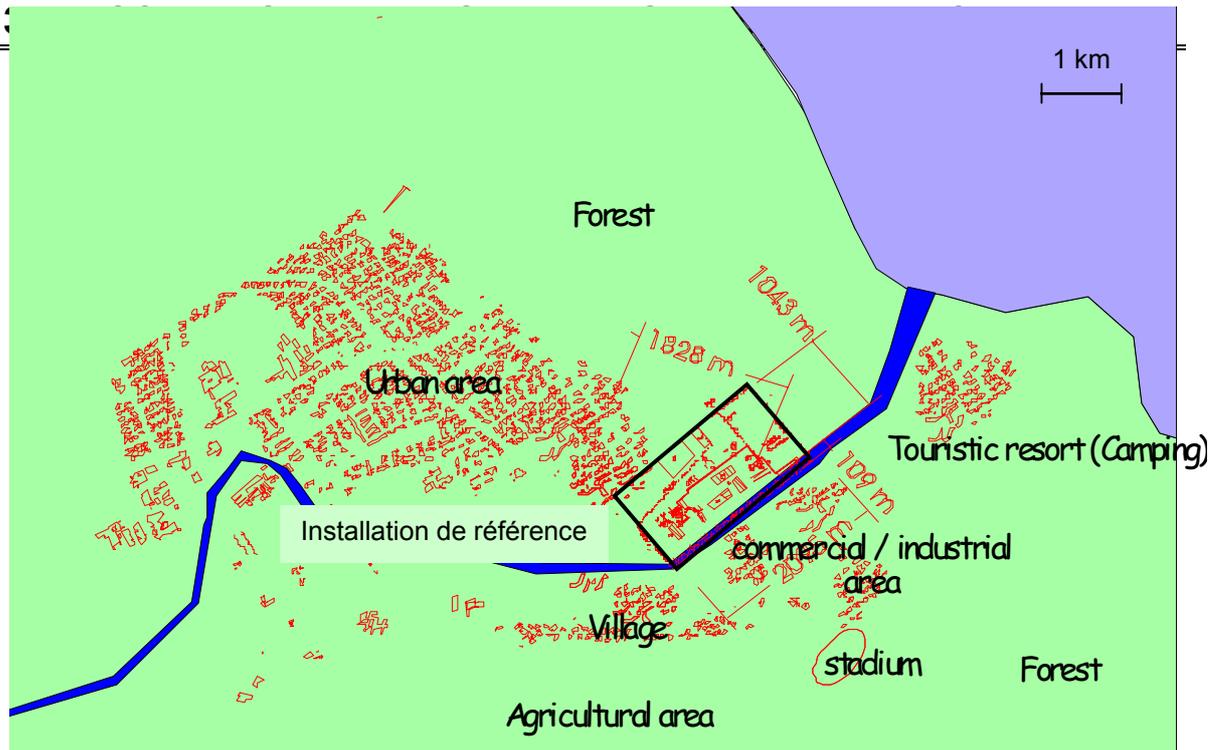


Figure 1 : l'installation prise en référence dans son environnement

L'installation industrielle prise en référence pour le projet ASSURANCE est une usine de réception, de stockage et d'utilisation d'ammoniac anhydre pour la fabrication d'engrais.

Le site multi-exploitants comprend environ 3 000 salariés. Il est situé aux abords d'une grande ville touristique, avec un accès important sur le port de cette ville. A l'ouest de l'établissement (cf. Figure 1 ci-dessus), se situe le plus fort de la zone urbanisée avec une densité de population de 500 habitants au km<sup>2</sup>. Au sud-ouest des installations, se situe un village avec une densité de population de 200 habitants au km<sup>2</sup>. Sont également à signaler dans le voisinage de l'établissement, une zone naturelle protégée, des plages et une station touristique pouvant recevoir des milliers de touristes durant les mois d'été.

Au sein de cet établissement de référence, le champ des analyses de risques menées par chacun des partenaires a été délimité aux installations suivantes :

- le terminal d'une canalisation de transfert d'ammoniac reliant deux établissements producteurs et utilisateurs d'ammoniac, distants de quelque 70 km entre eux,
- un parc de stockage d'ammoniac sous pression constitué de 10 réservoirs horizontaux parallèles de 100 tonnes chacun,
- un réservoir cryogénique d'une capacité de 15 000 tonnes sous  $-33^{\circ}\text{C}$ ,
- une installation de chargement / déchargement de bateaux transportant l'ammoniac cryogénique,
- une installation de chargement / déchargement de camions transportant l'ammoniac liquéfié sous pression,
- le réseau de canalisations reliant ces différentes installations entre elles.

## 4. ANALYSE QUALITATIVE DES RISQUES

---

L'analyse qualitative des risques constitue la première phase d'une évaluation complète des risques. Elle consiste à identifier l'ensemble des situations dangereuses susceptibles de survenir dans un établissement, puis de coter ces événements en Gravité et en Fréquence afin de les hiérarchiser dans une matrice des risques.

Il s'agit alors de fixer des critères permettant de décider quels événements ou scénarios seront ensuite quantifiés en termes de conséquences et de probabilités d'occurrence dans la seconde phase du projet : l'évaluation quantitative des risques.

### 4.1 DEMARCHE SUIVIE PAR L'INERIS

#### 4.1.1 Méthode d'identification des dangers

Pour cette première phase du projet ASSURANCE, l'INERIS a choisi de mettre en œuvre une Analyse Préliminaire des Risques (APR). L'APR est une méthode d'usage très général couramment utilisée pour l'identification des risques au stade préliminaire et à un niveau global. Cette méthode non exhaustive est basée sur l'étude des situations dangereuses liées aux produits et aux équipements mis en œuvre dans l'installation étudiée ; elle permet ensuite d'identifier leurs causes et leurs conséquences.

Il convient de signaler tout de suite que la méthode proposée par l'INERIS dans ce projet est expérimentale, notamment concernant la phase de cotation et de hiérarchisation des risques. Elle est en fait à replacer dans le contexte de sa mise en œuvre, soit en 1998, au début du projet d'ASSURANCE. L'approche proposée dans ce rapport ne reflète donc plus nécessairement le savoir-faire et les méthodes actuels de l'INERIS.

L'APR peut s'inscrire dans le processus de conception d'une installation nouvelle, au moment du choix des concepts de sécurité. Dans ce cas précis, l'intérêt de l'APR, par rapport aux autres méthodes telles que l'AMDEC, l'HAZOP, est de pouvoir être utilisée au début de la conception d'une installation, avant la définition précise des équipements et des schémas de circulation des fluides. Elle fournit une première analyse de sécurité se traduisant par des éléments constituant une ébauche des futures consignes d'exploitation et de sécurité. Elle permet également de choisir les équipements les mieux adaptés.

Mais elle est aussi fréquemment utilisée dans le cadre d'une démarche d'Analyse Quantitative des Risques dont l'objectif est d'aider à la maîtrise des risques d'une installation, en aboutissant à un plan d'actions visant à réduire les risques jugés inacceptables. Elle permet dans ce cas, de prescrire des actions préventives et correctives pour améliorer la maîtrise des risques.

Avant de mettre en œuvre l'Analyse Préliminaire des Risques, l'INERIS procède en préalable à une description fonctionnelle de l'installation étudiée. Cette description est réalisée à partir des documents décrivant l'installation et a pour objectif le découpage de l'installation en fonctions principales et par zone géographique, auxquelles sont associées des équipements et des produits. Un recensement rapide des moyens de prévention, de protection et d'intervention disponibles a également été effectué à ce stade de l'analyse.

Pour compléter et enrichir son APR, l'INERIS a ensuite procédé à une analyse des accidents passés sur des installations comparables utilisant de l'ammoniac liquéfié sous pression ou cryogénique. Cet exercice permet aussi de fournir des informations déterminantes dans la cotation de la probabilité d'occurrence des événements identifiés dans l'APR, et dans l'adéquation des dispositifs de sécurité existants.

Qu'il s'agisse d'HAZOP, d'AMDEC ou même d'une APR, le point commun de toutes ces méthodes est de vouloir organiser la réflexion des spécialistes de l'installation (ingénieurs procédés, maintenance, instrumentation...) sur les risques particuliers que peuvent engendrer les substances ou équipements de ladite installation. Ces méthodes d'analyse des risques n'ont donc de sens que si elles sont menées en groupes de travail. L'INERIS, en tant qu'animateur du groupe, se cantonne alors dans le rôle de garant de la méthode.

Bien évidemment, compte tenu de la difficulté de mobiliser le personnel du site pour un tel exercice dans le cadre du projet ASSURANCE, l'APR dont les résultats sont présentés ci-après n'a pas donné lieu à un groupe de travail sur site. Cela apporte nécessairement un premier biais important dans les résultats de cet exercice. Néanmoins, dans un souci de cohérence et de crédibilité, l'APR est tout de même le fruit de la réflexion d'un groupe de travail interne à l'INERIS, constitué de trois ingénieurs pendant deux jours.

Les résultats de la réflexion du groupe sont consignés dans un tableau de synthèse, dont la trame générale est présentée dans le paragraphe 4.3.1 suivant.

#### 4.1.2 Critères retenus pour la hiérarchisation des risques

Une fois la méthode d'analyse des risques déroulée, il est essentiel de coter qualitativement chaque situation dangereuse identifiée, à la fois par rapport à la gravité de ses conséquences et par rapport à sa fréquence ou sa probabilité d'occurrence.

Le but de cet exercice de hiérarchisation des risques est double. D'abord, il permet à l'exploitant de pouvoir juger rapidement de "l'acceptabilité" de ses risques, puis éventuellement de hiérarchiser ses priorités d'amélioration des dispositifs ou dispositions de sécurité en regard des situations classées comme plus critiques. En second lieu, l'exercice doit permettre de recenser l'ensemble des scénarios qui sera retenu pour l'évaluation quantitative, comme représentatif des risques majeurs de ladite installation.

Compte tenu du risque principalement toxique de l'ammoniac, l'INERIS a choisi de caractériser la gravité des pertes de confinement identifiées dans l'APR, exclusivement en termes de distances d'effets toxiques. Les seuils d'effets retenus ont été définis en termes de toxicité accidentelle sur les personnes (cf. document SEI de 1998, [6]). Pour un autre produit (inflammable par exemple), la même approche aurait pu être développée en termes d'effets sur les structures (effets dominos ou de pollution sur l'environnement).

Classes de Gravité	Seuil des effets létaux	Seuil des effets irréversibles
Gravité 1	Distance aux effets létaux à l'intérieur du site	Distance aux effets irréversibles à l'intérieur du site
Gravité 2	Distance aux effets létaux à l'intérieur du site	Distance aux effets irréversibles à l'extérieur du site
Gravité 3	Distance aux effets létaux à l'extérieur du site	Distance aux effets irréversibles à l'extérieur du site

Tableau 1 : Classes de gravité proposées par l'INERIS dans le cadre de l'exercice

S'agissant de caractériser la probabilité d'occurrence de l'événement recensé en APR, l'INERIS a pris le parti pour cet exercice, d'évaluer la probabilité en fonction du nombre d'événements ou de défaillances élémentaires indépendants nécessaires pour engendrer l'événement redouté. Quatre classes de fréquence ou de probabilité ont ainsi été définies :

**Fréquence 1** : un seul événement est suffisant pour déclencher l'occurrence de l'événement redouté : défaillance d'équipement, erreur humaine, etc ;

**Fréquence 2** : la combinaison de deux événements indépendants est nécessaire pour déclencher l'occurrence de l'événement redouté ;

**Fréquence 3** : la combinaison de trois événements indépendants est nécessaire pour initier l'événement redouté ;

**Fréquence 4** : l'occurrence de l'événement redouté requiert la combinaison de plus de trois événements indépendants ;

Au regard des classes de gravité / probabilité qu'il a définies pour cette exercice, l'INERIS a proposé également une matrice d'acceptabilité des risques, alternative entre les méthodes probabiliste pure et déterministe pure, et fondée sur la "robustesse" des barrières de défense en place face aux événements redoutés.

Suite au classement des événements redoutés en gravité / probabilité, la matrice ci-après propose (à l'instar de la courbe de Farmer) la définition de trois zones de risque :

- **une zone autorisée** sans spécification particulière ;
- **une zone dite acceptable en hachuré** dans laquelle le risque est toléré ;
- **une zone critique en grisé** dans laquelle le risque est qualifié d'inacceptable.

<b>Probabilité</b> <b>Gravité</b>	<i>Fréquence 4</i> <i>Plus de 3 barrières indépendantes</i>	<i>Fréquence 3</i> <i>3 barrières indépendantes</i>	<i>Fréquence 2</i> <i>2 barrières indépendantes</i>	<i>Fréquence 1</i> <i>1 seule barrière</i>
Distances aux effets létaux à l'extérieur du site				
Distances aux effets irréversibles à l'extérieur du site				
Distances aux effets irréversibles à l'intérieur du site				

Tableau 2 : Matrice d'acceptabilité des risques proposée par l'INERIS

#### 4.2 RECAPITULATIF DES METHODES EMPLOYEES PAR LES DIFFERENTS PARTENAIRES

Plusieurs types de méthodes ont été utilisés par les partenaires lors de la phase d'analyse qualitative des risques. Parmi les méthodes les plus connues, on peut citer l'HAZOP, l'APR, la méthode What-if ou bien encore l'arbre des défaillances. Ces méthodes ont chacune leurs particularités, mais ont également beaucoup de similitudes. On peut en tout cas aisément les classer suivant trois catégories :

- Les méthodes d'analyse inductive (la majorité des méthodes employées) sont basées sur une analyse descendante de la séquence accidentelle (des causes vers les conséquences). Il s'agit alors à partir des événements initiateurs d'identifier les combinaisons et enchaînements d'événements pouvant mener jusqu'à l'accident.
- Les méthodes d'analyse déductive sont basées sur une analyse ascendante de la séquence accidentelle (des conséquences vers les causes). Il s'agit alors à partir de l'événement majeur d'identifier les combinaisons et enchaînements successifs d'événements pour remonter jusqu'aux événements initiateurs.
- Les méthodes fondées sur l'identification systématique des causes de rejets, construites sur la base du jugement d'expert et du retour d'expérience, et principalement supportées par l'usage de checklists ou grilles d'audit.

		Partenaire 1	Partenaire 2	Partenaire 3	Partenaire 4	Partenaire 5	Partenaire 6	Partenaire 7
Méthodes selon standards nationaux			X				X	X
Méthodes d'analyse inductive	HAZSCAN			X				
	SWIFT					X		
	HAZOP	X						
	APR						X	
Méthodes d'analyse déductive	Arbre des défaillances				X			
Jugement d'expert	Guide national		X					
	Grille d'audit							X

Tableau 3 : Méthodes d'identification des dangers employées par les différents partenaires

La méthode appliquée par l'INERIS dans cette étude a été classée à la fois dans les méthodes d'analyse inductive de par l'APR qui a été mise en œuvre, mais également dans les méthodes liées à des standards nationaux, car l'INERIS s'est effectivement inspiré en fin d'analyse du Guide de Maîtrise de l'Urbanisation français pour le choix de ses scénarios (cf. paragraphe 4.5).

### 4.3 ANALYSE ET COMPARAISON DES DIFFERENTES METHODES

#### 4.3.1 Comparaison des différentes méthodes d'analyse inductive

- Méthode HAZOP telle qu'employée par le partenaire 1

Nœud	Dérive envisagée	Cause	Conséquence	Alarmes existantes	Moyens de protection	Événement redouté	Gravité	Fréquence

- Méthode HAZSCAN telle qu'employée par le partenaire 3

Situations dangereuses	Conséquences	Classement			Mesures de protection existantes et actions proposées	Commentaires et incertitudes
		P*	M**	T***		

\* Probabilité de l'événement considéré

\*\* Débit massique caractérisant le terme source de l'événement considéré

\*\*\* Durée du rejet caractérisant le terme source de l'événement considéré

- Méthode SWIFT (Structured What-IF Technique) telle qu'employée par le partenaire 5

Code	What if	Catégorie*	Dangers	Conséquences	Classement		
					Probabilité	Gravité	Risque = P x G

\* Catégories utilisées lors de l'application de la méthode SWIFT

- Material Problems (MP)
- External Effects or Influence (EE / I)
- Operating Error and other Human Factors (OE / HF)
- Analytical or Sampling Errors (A / SE)
- Equipment / Instrumentation Malfunction (E / IM)
- Process Upsets of Unspecified Origin (PUUO)
- Utility Failures (UF)
- Integrity Failure or Loss of Containment (IF / LOC)
- Emergency Operations (EO)
- Environmental Release (ER)

- Méthode APR telle qu'employée par le partenaire 6

N°	Produit ou équipement	Situation dangereuse	Causes	Conséquences	Gravité	Mesures existantes	Fréquence	Remarques

### 4.3.2 Une méthode d'analyse déductive : l'arbre de défaillances

Le partenaire 4 est le seul à avoir réalisé son identification des dangers à partir d'une méthode d'analyse descendante ou déductive, du type "arbre des causes".

Le principe d'analyse est relativement simple. Tout d'abord, le partenaire procède à un découpage des installations, basé à la fois sur une logique fonctionnelle et géographique. Le principe est de caractériser les différentes localisations de fuite envisageables.

Pour chaque partie de l'installation qu'il a identifiée, le partenaire considère ensuite sept causes génériques pouvant conduire à la perte de confinement d'une installation :

- une surpression,
- une dépression,
- la corrosion,
- l'érosion,
- une agression extérieure, un impact mécanique dû à une explosion ou un projectile,
- une montée en température due à une agression thermique,
- un excès de vibration.

Pour chaque partie de l'installation et chacune des causes génériques, le partenaire 4 déroule une démarche arborescente pour déterminer l'ensemble des événements initiateurs imaginables, et ainsi de suite jusqu'à parvenir à l'événement élémentaire déclenchant (défaillance élémentaire ou événement extérieur au système).

Le principal objectif d'une telle démarche à ce stade là de l'analyse des risques, est de gagner du temps sur la phase suivante de quantification des risques, et notamment de quantification des probabilités d'occurrence. Cette approche, très intéressante par le gain de temps qu'elle procure à l'analyste, repose néanmoins sur un pré-requis non négligeable : le jugement d'expert.

Ce jugement d'expert intervient en l'occurrence sur la détermination a priori des localisations de fuites possibles sur l'installation, puis sur les causes génériques pouvant conduire à la perte de confinement, limitées ici à sept grandes familles.

A titre de remarque, la démarche utilisée par le partenaire 4 dans cet exercice, correspond dans l'esprit à celle employée par l'INERIS dans ses analyses critiques d'études des dangers. Pour un problème de temps, l'expert ne peut en effet se permettre de mener de nouveau une méthode d'analyse inductive complète du type HAZOP ou AMDEC.

De plus, une méthode de type déductive s'adapte bien à l'esprit de la tierce expertise, en ce sens qu'elle est parfaitement complémentaire d'une méthode d'analyse inductive, type de méthode qui est maintenant nécessairement menée dans le cadre de l'étude des dangers.

Par ailleurs, et pour conforter ce propos, dans la deuxième étape du projet ASSURANCE (évaluation quantitative des risques), l'INERIS a complété son APR par une analyse par arbre des défaillances, pour quatre événements jugés particulièrement critiques, après hiérarchisation des risques :

- perte de confinement de l'enveloppe primaire du réservoir cryogénique,
- ouverture instantanée de l'un des dix réservoirs de stockage sous pression,
- brèche ou fuite majeure sur une canalisation de transfert sur le site,
- fuite majeure sur le bras de déchargement des bateaux en phase liquide.

### 4.3.3 Comparaison de deux méthodes basées sur le jugement d'expert

Les méthodes employées par les partenaires 2 et 7 sont toutes deux basées sur l'identification systématique de toutes les pertes de confinement possibles.

Cette identification systématique est rendue possible grâce à l'emploi de check-lists construites essentiellement sur la base du jugement d'expert. Le jugement d'expert est étayé grâce à l'analyse des accidents passés et aux connaissances propres de l'organisme, puis il est combiné avec l'emploi de règles systématiques, pour permettre d'identifier rapidement les sources potentielles de fuite et les équipements nécessitant une analyse plus détaillée.

#### 4.3.3.1 Le partenaire 7

L'approche développée par le partenaire 7 est appelée HIAA pour Hazard Identification by Area Audit. L'objet de cette méthode est de permettre rapidement la sélection des risques potentiellement majorants pour l'environnement extérieur du site.

Pratiquement, on procède d'abord à un découpage de l'installation en sections cohérentes à la fois fonctionnellement et géographiquement. L'information recueillie grâce aux grilles d'audit utilisées pendant la visite des installations est ensuite traitée pour aboutir à un jeu de scénarios jugés représentatifs de chaque section, et qui seront évalués quantitativement dans la seconde phase du projet.

1. Causes potentielles d'un rejet initial d'ammoniac depuis le stockage cryogénique		
1.1	Perte de confinement en fonctionnement normal due à une faiblesse du matériau	
	Défaut inhérent depuis mise en place, maintenance, etc (matériel, conception...)	Petites fuites possibles sur le réservoir, piquages, joints, vannes, etc.
	Dégradation en service (corrosion, érosion, fatigue, vibration, etc.)	Petites fuites possibles sur le réservoir, piquages, joints, vannes, etc.
1.2	Perte de confinement suite à un fonctionnement anormal	
	Déviations d'un paramètre en dessus des limites de sécurité : pression, température.	Petites fuites possibles sur le réservoir, piquages, joints, vannes, etc. Rupture catastrophique possible sous conditions de surpression extrêmes.
	Déviations d'un paramètre au-dessous des limites de sécurité : pression, température.	Rupture catastrophique possible sous conditions de dépression extrêmes dans l'enceinte cryo.
1.3	Perte de confinement suite à une agression extérieure	
	Impact mécanique (collision, chute d'objets, projectiles, malveillance, etc.)	(a) La double enceinte en béton protège le réservoir de la plupart des agressions externes. L'impact d'un avion ou projectile similaire pourrait percer les deux enceintes, avec une très forte probabilité d'inflammation. (b) L'accumulation de vapeurs, sous le réservoir, ou dans l'espace annulaire entre les deux enceintes pourrait, si inflammation, causer de gros dégâts. (c) Chute de charges possible provenant de grues utilisées pour la maintenance du réservoir cryo. (d) Pièces tournantes à proximité (compresseurs) ?
	Problèmes de fondations (subsidence, tassements différentiels, etc.)	...
	Conditions environnementales extrêmes (foudre, inondation, séisme, etc.)	...
	Perte des utilités : air, électricité, etc.	...

Tableau 4 : Exemple de la méthode d'audit HIAA utilisée par le partenaire 7 (1/2)

1.4	Rejet d'ammoniac par une voie normale d'échappement	
	Opération ou équipement défaillant (soupape mal tarée, etc.)	...
	Erreur opératoire (surremplissage, rollover, etc.)	...
1.5	Rejet d'ammoniac suite à défaillance d'une connexion provisoire.	
	Mauvaise connexion	...
	Déconnexion prématurée	...
	Défaillance dans l'accouplement	...
2. Causes potentielles d'un futur rejet d'ammoniac (effet domino)		
2.1	Autre rejet provenant d'un accident sur installation voisine.	
	Impacts de fragments sur autres réservoirs	...
	Feu torche impactant autre installation	...
	Feu de nappe à côté d'autres stockages	...
	Explosion impactant autre installation	...
	Impact sur systèmes de contrôle ou personnel clé d'autres installations	...

Tableau 5 : Exemple de la méthode d'audit HIAA utilisée par le partenaire 7 (2/2)

Section de l'installation :	Scénario d'accident retenu :
B. Réservoir cryogénique	B1 : Petit trou dans enveloppe primaire vers espace annulaire. B2 : Brèche majeure ou rupture guillotine dans enveloppe primaire. B3 : Rupture catastrophique de l'enveloppe primaire et de l'enceinte béton. B4 : Montée en pression et rejet gazeux par les soupapes. B5 : Montée en pression, défaillance soupape, ruine enveloppe primaire.

Tableau 6 : Scénarios retenus suite à l'HIAA – Stockage cryogénique

#### 4.3.3.2 Le partenaire 2

A l'instar de l'ensemble des partenaires, le partenaire 2 commence par séparer l'installation en unités ou sections indépendantes. Ensuite et comme le partenaire précédent, on procède à une identification systématique des scénarios d'accidents envisageables, section par section, en suivant les recommandations du guide du Purple Book [5].

A la manière du HIAA, la méthode du partenaire 2 permet pour une section donnée, de recenser systématiquement l'ensemble des causes pouvant être à l'origine d'une perte de confinement (LOC : Loss Of Containment), puis d'en déduire en fonction des spécificités et mesures existantes sur l'installation, les scénarios d'accidents à retenir comme représentatifs pour l'étape suivante de la quantification.

La liste des causes génériques analysées de cette façon est fournie à titre indicatif ci-après :

##### Causes génériques reliées au procédé

- Corrosion
- Erosion
- Impact mécanique
- Surpression / dépression
- Vibration
- Température (trop haute / trop basse)
- Erreur d'équipement
- Erreur opératoire

##### Causes génériques externes au procédé

- Collision
- Effet domino extérieur au site
- Chute d'aéronefs
- Tremblement de terre
- Inondation
- Malveillance

#### 4.4 CRITERES DE CLASSIFICATION RETENUS PAR LES DIFFERENTS PARTENAIRES

##### 4.4.1 Comparaison des catégories de probabilités

Tous les partenaires à l'exception de l'INERIS (dont la démarche a été exposée ci-avant) et du partenaire 4 (pas de hiérarchisation qualitative des événements identifiés), ont utilisé des classes de probabilités en  $10^{-n}$  /an pour coter la fréquence estimée des événements recensés suite à la phase d'identification des dangers.

Le graphique ci-après propose à ce titre une comparaison de ces différentes catégories, en utilisant un code couleur qui tente d'harmoniser le vocabulaire de chaque partenaire.

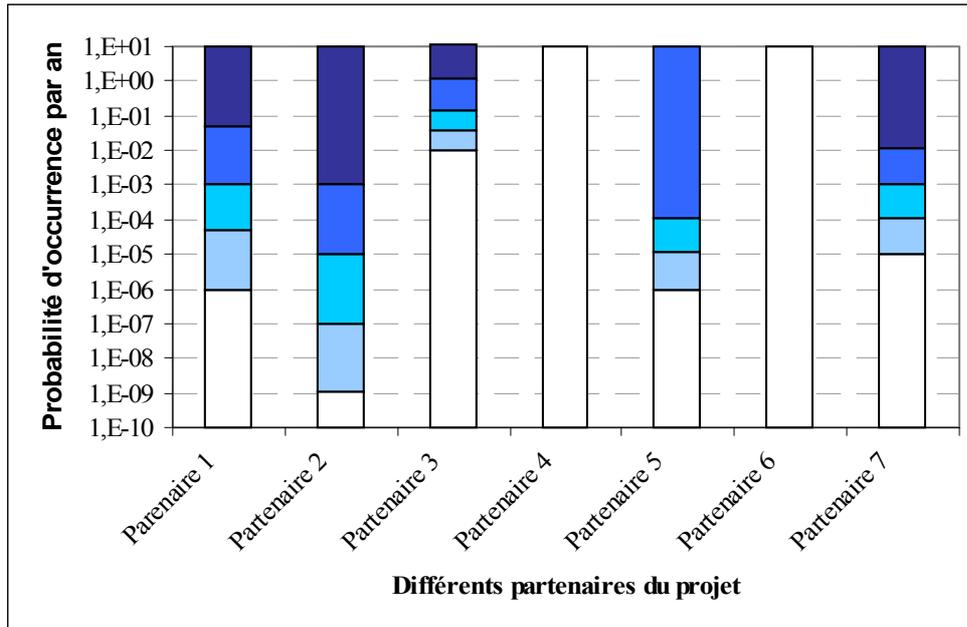


Figure 2 : Comparaison des catégories de probabilités des événements

Pour le partenaire 1, chacune des catégories signifie respectivement :

- Extrêmement improbable
- Très improbable
- Possible mais peu probable dans la durée de vie de l'installation
- Probable dans la durée de vie de l'installation

Pour le partenaire 2, chacune des catégories signifie respectivement :

- Très improbable
- Improbable
- Probable
- Très probable

Pour le partenaire 3, chacune des catégories signifie respectivement :

	1 fois tous les 100 ans
	entre 1 / 100 ans et 1 / 30 ans
	entre 1 / 30 ans et 1 / 10 ans
	entre 1 / 10 ans et 1 / an
	Plus d'une fois par an

Pour le partenaire 5, chacune des catégories signifie respectivement :

	Très faible
	Faible
	Moyenne
	Grande

Pour le partenaire 7, chacune des catégories signifie respectivement :

	Extrêmement improbable dans la durée de vie de l'installation
	Très improbable dans la durée de vie de l'installation
	Improbable dans la durée de vie de l'installation
	Possible dans la durée de vie de l'installation
	Probable dans la durée de vie de l'installation

A titre de simple comparaison, l'INERIS a repris ci-dessous les quatre catégories de probabilité utilisées pour classer les événements redoutés dans le domaine français du nucléaire [7] :

- $> 1$  /an : Permanent ou fréquent. Situations normales d'exploitation.
- Entre 1 et  $10^{-2}$  /an : Incidents fréquents.
- Entre  $10^{-2}$  et  $10^{-4}$  /an : Accidents peu probables.
- Entre  $10^{-4}$  et  $10^{-6}$  /an : Accidents importants mais hypothétiques.

A l'analyse de cette grille, il apparaît que le partenaire 1 est celui dont l'approche qualitative des probabilités est la plus comparable de celle proposée par le nucléaire français (cf. Figure 2). On notera seulement en comparaison, que le partenaire 2 définit les classes de probabilité les plus pessimistes : la notion d'improbable est définie entre  $10^{-7}$  et  $10^{-9}$  /an. Le partenaire 3 définit quant à lui les classes de probabilité les plus optimistes : la classe de probabilité la plus faible identifiée est  $< 10^{-2}$  /an ; aucune notion qualificative (« improbable ») n'est toutefois attachée à cette classe.

#### 4.4.2 Comparaison des catégories de conséquences

De même que ce qui vient d'être fait sur les classes de probabilité, les deux tableaux ci-après proposent une comparaison entre les différentes catégories choisies par les partenaires pour qualifier *a priori* les conséquences des événements recensés.

Dans le type même de classement utilisé, à l'exception du partenaire 4 (cf. ci-avant), on peut distinguer trois grandes familles pour coter la gravité des événements :

- l'utilisation de définitions purement qualitatives pour définir les classes de gravité, depuis mineur jusqu'à catastrophique,
- la définition des catégories en fonction de la distance d'effet estimée a priori,
- la définition des catégories à partir de l'estimation a priori du terme source : quantité de produit relâchée, ou débit de fuite associée à la durée du rejet.

Le premier tableau compare les approches des partenaires qui utilisent des définitions qualitatives pour établir leurs catégories de conséquences. Le second tableau compare les approches des partenaires qui utilisent des estimations du terme source pour établir leurs catégories de conséquences.

Catégorie	I	II	III	IV	V
Partenaire 1	Marginal Effets réversibles / dommages à l'intérieur du site	Dangereux Blessures mineures / dommages à l'intérieur du site	Critique Blessures mineures en dehors du site. Morts / dommages sérieux dans le site	Catastrophique Blessures irréversibles / dommages sérieux à l'extérieur du site	
Partenaire 2	Classe 4 Pas de mort / conséquence < 100 m		Classe 3 Quelques morts / cons 100 – 500 m	Classe 2 Cons. 500 – 1000 m	Classe 1 Beaucoup de morts cons > 1000 m
Partenaire 6	Classe 1 Distances au seuil des effets irréversibles à l'intérieur du site		Classe 2 Distances au seuil des effets irréversibles à l'extérieur du site	Classe 3 Distances au seuil des effets létaux à l'extérieur du site	
Partenaire 5	Mineur Effets sur site seulement		Sérieux Blessures en dehors du site	Grave Quelques morts en dehors du site	Catastrophique Beaucoup de morts en dehors du site

Tableau 7 : Catégories de conséquences basées sur des définitions qualitatives

Catégorie	I	II	III	IV	V
Partenaire 2	Classe 4 Pas de mort / conséquence < 100 m		Classe 3 Quelques morts / cons 100 – 500 m	Classe 2 Cons. 500 – 1000 m	Classe 1 Beaucoup de morts cons > 1000 m
Partenaire 3	Classe 1 Débit < 3 kg/s Durée rejet < 3 min	Classe 2 Débit : 3-10 kg/s Durée : 3-10 min	Classe 3 Débit : 10-30 kg/s Durée : 10-30 min	Classe 4 Débit : 30-100 kg/s Durée : 30-100 min	Classe 5 Débit > 100 kg/s Durée > 100 min
Partenaire 7	Rejet négligeable < 0,5 t NH3	Rejet faible 0,5 – 5 t NH3	Rejet moyen 5 – 50 t NH3		Rejet fort > 50 t NH3

Tableau 8 : Catégories de conséquences basées sur des estimations du terme source

En conclusion de ces deux tableaux, on peut simplement remarquer l'absence d'échelle ou de métrique commune entre les partenaires. A l'exception de deux partenaires, les critères restent tout de même très qualitatifs et peuvent induire des différences notables d'appréciation. Ainsi, ce qui est catastrophique pour un partenaire (blessures irréversibles hors du site) est considéré « seulement » grave par un autre.

#### 4.4.3 Critères de sélection des scénarios retenus pour l'analyse approfondie

Partenaire	Critères de sélection des scénarios pour la phase de quantification du risque	Remarques
Partenaire 1	<ol style="list-style-type: none"> <li>Exclut tout événement classé en gravité 1 et 2 (marginal et dangereux) pour garder les événements avec effets à l'extérieur du site.</li> <li>Pour les classes de gravité 3 et 4, retient tous les scénarios quelle que soit la probabilité.</li> </ol>	pour ce partenaire, les colonnes "marginal" et "dangereux" regroupent les scénarios d'accidents aux conséquences limitées à l'intérieur du site.
Partenaire 2	<ol style="list-style-type: none"> <li>Exclut tout événement coté dans la classe de gravité la plus faible (conséquence &lt; 100 m).</li> <li>Exclut tout événement coté dans la classe de fréquence la plus faible (<math>f &lt; 10^{-9}/\text{an}</math>)</li> </ol>	
Partenaire 3	<ol style="list-style-type: none"> <li>Retient tout les scénarios dont le débit est supérieur à 100 kg/s (classe gravité 5),</li> <li>Retient les scénarios d'accidents dont le débit est compris entre 30 et 100 kg/s, et dont la probabilité est inférieure à <math>10^{-2} / \text{an}</math>,</li> <li>Retient les scénarios d'accidents dont le débit est compris entre 10 et 30 kg/s, et dont la probabilité est inférieure à <math>3.10^{-2} / \text{an}</math>.</li> </ol>	Ce partenaire applique la courbe de Farmer à sa matrice des risques (cf. Tableau 10).
Partenaire 4	<ol style="list-style-type: none"> <li>Exclut tout événement avec un débit de fuite inférieur à 4 kg/s.</li> <li>Exclut tout événement dont la probabilité d'occurrence est inférieure à <math>10^{-9}/\text{an}</math>.</li> </ol>	
Partenaire 5	Les cotations en Gravité (1 à 4) et Fréquence (1 à 4) sont multipliées entre elles pour obtenir la criticité de l'événement. Les scénarios sont hiérarchisés d'après ce score.	Pas d'exclusion directe de scénarios pour la phase de quantification du risque.
Partenaire 6	<ol style="list-style-type: none"> <li>Retient des scénarios pour chaque zone géographique du site définie d'après l'analyse fonctionnelle.</li> <li>Pour chaque zone, retient les scénarios les plus critiques classés d'après la matrice, et en accord avec le Guide M.U.<sup>3</sup></li> </ol>	
Partenaire 7	Les cotations en Gravité (1 à 4) et Fréquence (1 à 5) sont additionnées entre elles pour obtenir la criticité de l'événement. Sont exclus tous les scénarios dont le score est inférieur à 3.	Les scénarios avec un score $\geq 3$ sont tous sélectionnés et traités de la même manière.

Tableau 9 : Comparaison des critères de sélection des scénarios par les partenaires

<sup>3</sup> Guide M.U. : Guide de Maîtrise de l'Urbanisation, 1990

Pour le partenaire 3, les cases grisées correspondent aux scénarios qui sont exclus de la phase de quantification des risques.

	Classe 1 Débit < 3 kg/s Durée rejet < 3 min	Classe 2 Débit : 3-10 kg/s Durée : 3-10 min	Classe 3 Débit : 10-30 kg/s Durée : 10-30 min	Classe 4 Débit :30-100 kg/s Durée : 30-100 min	Classe 5 Débit > 100 kg/s Durée > 100 min
> 1 /an					
$10^{-1}$ - 1 /an					
$3 \cdot 10^{-2}$ - $10^{-1}$ /an					
$3 \cdot 10^{-2}$ - $10^{-2}$ /an					
< $10^{-2}$ /an					

Tableau 10 : Critères de sélection des scénarios utilisés par le partenaire 3

#### 4.5 CHOIX DES SCENARIOS POUR L'ANALYSE QUANTITATIVE

A titre d'exemple, le tableau ci-après recense l'ensemble des scénarios retenus par chacun des partenaires pour les secteurs stockage cryogénique et terminal bateaux, après hiérarchisation et application des critères de sélection. Chaque jeu de scénarios est représentatif du risque ammoniac sur le site pour chaque partenaire, et sert de point d'entrée pour la phase de quantification du risque, seconde étape du projet.

Scénario	Partenaire 1	Partenaire 2	Partenaire 3	Partenaire 4	Partenaire 5	Partenaire 6	Partenaire 7
<b>Stockage cryogénique</b>							
Ruine du réservoir cryogénique par dépression	X	X	X	X	X		X
Rupture du réservoir cryogénique – rejet diphasique	X	X	X	X		X	X
Rupture du réservoir cryogénique suite à séisme			X	X	X		X
Surremplissage du réservoir		X	X	X	X		
Petite fuite sur enveloppe primaire du réservoir			X				X
Grosse fuite sur enveloppe primaire du réservoir			X				X
Rejet gazeux par soupape	X	X	X		X		X
Rupture de la ligne de soutirage du réservoir (20"), avant et après la vanne de sectionnement automatique, à l'extérieur de la double enveloppe	X	X	X	X	X	X	X
Rupture d'une ligne de 4" à l'aval des compresseurs / condenseurs du circuit de refroidissement		X	X			X	X
Rupture du collecteur V12 sur le circuit de refroidissement	X		X				
Rupture d'un échangeur sur le circuit de refroidissement		X	X				
<b>Terminal déchargement bateaux</b>							
Rupture de la canalisation 12 " entre le terminal et le stockage cryogénique	X	X	X	X	X	X	X
Rupture ou déconnexion du bras articulé en phase liquide pendant opération	X	X	X			X	X
Rupture ou déconnexion du bras articulé en phase gaz pendant opération	X		X			X	
Rupture du collecteur V18 – rejet diphasique	X		X			X	
Rupture de la ligne 10" de chargement bateaux à l'aval de la pompe P4	X		X			X	
Ruine d'un compartiment de stockage sur le bateau		X	X		X		X

Tableau 11 : Comparaison des jeux de scénarios choisis par les partenaires pour le stockage cryogénique et le terminal bateaux

#### 4.6 CONCLUSION QUANT A L'ANALYSE QUALITATIVE DES RISQUES

- Une première conclusion s'impose d'elle-même concernant la phase d'analyse qualitative des risques. Tous les partenaires mettent en œuvre une méthode d'identification des dangers et de hiérarchisation des risques qui leur est propre mais en même temps très semblable dans son déroulement.

En effet, l'identification des dangers se fait essentiellement sur la base d'une méthode inductive, où l'on part des différents modes de défaillance envisageables sur l'installation pour identifier les scénarios d'accidents potentiels. Ces méthodes inductives découlent soit directement de méthodes identifiées et reconnues (APR, HAZOP), soit de listes guides établies sur la base de l'expérience de l'organisme.

Une fois les événements indésirables recensés, chaque organisme éprouve le besoin de les hiérarchiser suivant une double cotation en gravité et en fréquence. Les classes de cotation choisies peuvent sensiblement varier entre les organismes, on y reviendra dans le point suivant. En tout cas, le but de cette cotation est toujours d'identifier les scénarios à traiter en priorité en termes de mesures compensatoires de prévention et protection, puis de sélectionner le jeu de scénarios à retenir pour l'étape quantitative, comme représentatif du risque de l'établissement.

\*\*\*

- S'agissant des classes de cotation utilisées, il semble après discussion en groupe de travail, que très peu de partenaires utilisent des définitions figées pour chaque classe, mais qu'au contraire ces définitions tant en gravité qu'en fréquence, évoluent d'un projet sur l'autre.

En conséquence de cette remarque peut-être, il apparaît que le sens des termes employés pour définir chaque classe varie sensiblement d'un expert à l'autre. Ainsi, ce qui apparaît comme probable chez l'un ( $10^{-5}$ ,  $10^{-7}$  /an) est considéré comme très improbable chez un autre. Ce qui est catastrophique chez l'un (blessures irréversibles hors du site) est considéré "seulement" grave chez un autre.

Cette source d'incertitude a peu d'influence sur la suite de l'analyse des risques. Elle peut toutefois engendrer des difficultés de communication importantes voire des incompréhensions vis-à-vis du public, des décideurs, etc. Le besoin d'harmoniser la terminologie employée, dans un souci de transparence, se fait fortement ressentir.

\*\*\*

- Concernant le jeu de scénarios retenus pour la quantification à la fin de cette première étape, on peut noter des différences de détail entre les partenaires, qui s'expliquent essentiellement par les différences dans les critères de sélection employés plus que par la méthode d'analyse ou de classification retenue.

Cependant, quels que soient les critères de sélection, il est important de retenir que l'ensemble des partenaires prend en compte pour la quantification, les scénarios les plus importants, ou susceptibles d'être enveloppes pour l'extérieur du site, sans considérer a priori la probabilité d'occurrence de ces derniers.

Il n'y a donc eu aucune difficulté pour se mettre d'accord sur les onze scénarios de référence à retenir pour la seconde phase du projet, scénarios qui sont présentés ci-après, en tête du chapitre 5.

## 5. ANALYSE QUANTITATIVE DES RISQUES

Au terme de la première grande étape du projet, l'analyse qualitative des risques, chaque partenaire a retenu le jeu de scénarios qui lui paraît le plus représentatif du risque global du site. Ces scénarios sont donc ensuite évalués de manière chiffrée quant à leur probabilité d'occurrence et leurs conséquences en termes de distances d'effet. Cette seconde étape est appelée analyse quantitative des risques ou quantification du risque.

Dans le souci d'une meilleure analyse de la variabilité des résultats, le groupe a décidé à l'issue de l'analyse qualitative, de s'accorder sur un même jeu de scénarios à quantifier dans la deuxième étape du projet. Onze scénarios de référence ont été ainsi répertoriés sur l'ensemble des installations analysées de l'établissement :

1. Fuite de pleine section sur la canalisation (8") d'alimentation du site en ammoniac
2. Fuite de pleine section sur une portion de canalisation en 4" (deux contributions au débit de fuite) reliant le stockage cryogénique et au stockage sous pression
3. Rupture ou déconnexion du bras de déchargement bateaux en phase liquide
4. Fuite de pleine section sur une canalisation de 10" reliant le réservoir cryogénique et le terminal bateaux
5. Ruine d'un compartiment de stockage d'un bateau en déchargement
6. Ruine catastrophique du réservoir cryogénique
7. Fuite de pleine section sur la ligne de soutirage en 20" du réservoir cryogénique
8. Ruine catastrophique de l'un des dix réservoirs d'ammoniac liquéfié sous pression
9. Fuite de pleine section sur la ligne de distribution (4") vers les ateliers utilisateurs
10. Rupture ou déconnexion du bras de déchargement camions en phase liquide
11. Ruine catastrophique d'un camion citerne

### 5.1 EVALUATION DES PROBABILITES

#### 5.1.1 Comparaison des méthodes de quantification employées

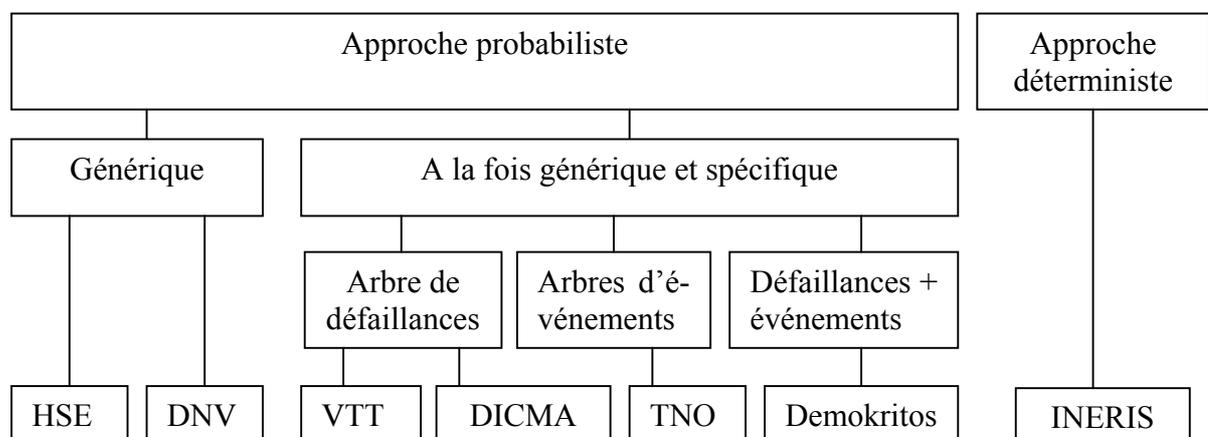


Figure 3 : Approches développées par chaque partenaire pour l'évaluation des probabilités des scénarios identifiés

### 5.1.2 Comparaison des calculs de probabilité

Le tableau ci-dessous recense les probabilités d'occurrence calculées par chaque partenaire pour les onze scénarios de référence de l'installation. Pour chaque scénario, la cellule en gris clair représente l'estimation la plus optimiste de la probabilité d'occurrence calculée ; la cellule en gris foncée représente l'estimation la plus pessimiste.

Scen ario	Partenaire 1	Partenaire 2	Partenaire 3	Partenaire 4	Partenaire 5	Partenaire 6	Partenaire 7	Variabilité
1	9.0 10 <sup>-7</sup>	1.0 10 <sup>-6</sup>	1.4 10 <sup>-5</sup>	9.0 10 <sup>-7</sup>	1.0 10 <sup>-6</sup>	-----	1.8 10 <sup>-7</sup>	1.8 10 <sup>-7</sup> - 1.4 10 <sup>-5</sup>
2	1.0 10 <sup>-5</sup>	3.0 10 <sup>-6</sup>	1.4 10 <sup>-5</sup>	9.0 10 <sup>-7</sup>	7.3 10 <sup>-7</sup>	-----	4.6 10 <sup>-6</sup>	7.3 10 <sup>-7</sup> - 1.4 10 <sup>-5</sup>
3	4.8 10 <sup>-4</sup>	4.8 10 <sup>-6</sup>	8.0 10 <sup>-3</sup>	5.0 10 <sup>-3</sup>	5.4 10 <sup>-5</sup>	-----	1.3 10 <sup>-5</sup>	4.8 10 <sup>-6</sup> - 8.0 10 <sup>-3</sup>
4	1.0 10 <sup>-6</sup>	-----	4.6 10 <sup>-6</sup>	9.0 10 <sup>-7</sup>	8.0 10 <sup>-7</sup>	-----	1.8 10 <sup>-6</sup>	8.0 10 <sup>-7</sup> - 4.6 10 <sup>-6</sup>
5	2.8 10 <sup>-7</sup>	6.4 10 <sup>-10</sup>	5.7 10 <sup>-5</sup>	-----	2.3 10 <sup>-6</sup>	-----	4.9 10 <sup>-6</sup>	6.4 10 <sup>-10</sup> - 5.7 10 <sup>-5</sup>
6	5.0 10 <sup>-7</sup>	1.0 10 <sup>-8</sup>	4.0 10 <sup>-8</sup>	-----	5.0 10 <sup>-8</sup>	-----	5.0 10 <sup>-7</sup>	1.0 10 <sup>-8</sup> - 5.0 10 <sup>-7</sup>
7	6.0 10 <sup>-6</sup>	1.0 10 <sup>-6</sup>	5.0 10 <sup>-6</sup>	9.0 10 <sup>-7</sup>	4.0 10 <sup>-7</sup>	-----	4.0 10 <sup>-7</sup>	4.0 10 <sup>-7</sup> - 6.0 10 <sup>-6</sup>
8	1.0 10 <sup>-6</sup>	5.0 10 <sup>-7</sup>	1.0 10 <sup>-6</sup>	4.5 10 <sup>-7</sup>	1.3 10 <sup>-5</sup>	-----	4.0 10 <sup>-7</sup>	4.5 10 <sup>-7</sup> - 1.3 10 <sup>-5</sup>
9	3.0 10 <sup>-6</sup>	3.4 10 <sup>-7</sup>	1.5 10 <sup>-5</sup>	9.0 10 <sup>-7</sup>	2.2 10 <sup>-6</sup>	-----	8.0 10 <sup>-7</sup>	3.4 10 <sup>-7</sup> - 1.5 10 <sup>-5</sup>
10	2.4 10 <sup>-6</sup>	1.5 10 <sup>-7</sup>	2.1 10 <sup>-3</sup>	2.7 10 <sup>-6</sup>	6.0 10 <sup>-6</sup>	-----	5.0 10 <sup>-7</sup>	1.5 10 <sup>-7</sup> - 2.1 10 <sup>-3</sup>
11	5.5 10 <sup>-9</sup>	1.5 10 <sup>-9</sup>	1.2 10 <sup>-7</sup>	1.2 10 <sup>-7</sup>	4.7 10 <sup>-6</sup>	-----	1.4 10 <sup>-8</sup>	1.5 10 <sup>-9</sup> - 4.7 10 <sup>-6</sup>

Tableau 12 : Comparaison des probabilités calculées par les partenaires mettant en œuvre une méthode probabiliste pour chacun des 11 scénarios de référence

### 5.1.3 Analyse des sources d'incertitudes

Le tableau ci-dessus fait apparaître des variations parfois de plusieurs ordres de magnitude dans la probabilité estimée d'un même scénario. Par exemple, pour le scénario de référence 10 (rupture ou déconnexion d'un bras articulé pendant le déchargement camions), l'évaluation de la probabilité varie entre 2. 10<sup>-3</sup> pour le partenaire le plus pessimiste, à 1.5 10<sup>-7</sup> pour le partenaire le plus optimiste.

A l'analyse, il convient toutefois de nuancer ce résultat. En effet, les plus forts écarts dans les calculs de probabilités concernent seulement les scénarios mettant en cause des installations mobiles : scénarios 3, 5, 10 et 11. La variabilité des résultats pour les scénarios sur des installations fixes est bien moindre : deux ordres de magnitude au maximum pour les scénarios 1, 2, 8 et 9.

Concernant les scénarios sur des installations mobiles, il convient aussi de remarquer que les fortes variations sont souvent seulement dues à une seule valeur isolée pour chaque scénario. Si l'on excepte cette valeur isolée, la variabilité est ramenée à un maximum de trois ordres de magnitude pour le scénario 3.

Pour tenter d'apporter quelques éléments de réponse sur l'origine de la variabilité, l'ensemble des scénarios identifiés a été subdivisé en trois grandes catégories : d'abord les scénarios liés à des fuites sur des canalisations, ensuite des scénarios de fuite sur des bras de chargement ou de déchargement et enfin des scénarios de fuite sur les réservoirs proprement dits. Les principales sources d'incertitudes identifiées relatives à l'évaluation des probabilités ont ensuite été classées selon ces trois catégories.

***Scénarios de fuite sur des canalisations :***

Les paramètres clés dans l'évaluation des probabilités sont les suivants :

- la longueur de canalisation sur laquelle la fuite est supposée se produire,
- le facteur utilisation, c'est-à-dire la période de temps dans l'année pendant laquelle la canalisation est supposée pleine de liquide ou de gaz,
- le nombre ou la densité d'équipements considérés sur la portion de canalisation analysée, à savoir la présence et le nombre de joints de brides, de vannes, de pompes, etc, qui augmentent d'autant la probabilité de fuites,
- l'origine considérée pour la fuite dans la base de données générique utilisée : l'agression est-elle d'origine mécanique par impact d'objets missiles, suite à une onde surpression, ou encore d'origine thermique, etc.
- l'utilisation de données génériques différentes selon les partenaires et les bases de données utilisées,
- l'utilisation éventuelle, en plus de ces incertitudes, de coefficients correcteurs de la probabilité estimée pour tenir compte du degré de vibration, de corrosion auquel est soumise la canalisation. Ces coefficients sont entièrement liés au jugement d'expert.

***Scénarios de fuite sur des bras de chargement ou de déchargement :***

Les paramètres clés dans l'évaluation des probabilités sont :

- le nombre d'opérations de chargement ou de déchargement estimé dans l'année,
- l'origine considérée pour la fuite dans la base de données génériques utilisée : l'agression est-elle d'origine mécanique par impact d'objets missiles, suite à une onde surpression, ou encore d'origine thermique, etc.
- l'utilisation de données génériques différentes selon les partenaires et les bases de données utilisées,

***Scénarios de fuite sur des réservoirs de stockage :***

La source majeure d'incertitude est liée à l'origine considérée pour la fuite dans la base de données générique utilisée : l'agression est-elle d'origine mécanique par impact d'objets missiles, suite à une onde surpression, ou encore d'origine thermique, etc.

Bien évidemment en second lieu, l'utilisation d'une base de données plus ou moins bien adaptée au réservoir de stockage analysé (produit stocké, conditions de pression et de température, modes de conception) est aussi une source d'incertitude non négligeable dans l'évaluation de la probabilité du scénario.

#### 5.1.4 Conclusions quant aux démarches utilisées

Dans la phase d'évaluation de la probabilité d'un événement, l'analyse des incertitudes montre en substance que la variabilité est imputable à trois causes principales :

- *le type de modélisation employé* pour le calcul de probabilité (cf. Figure 3 : données génériques, arbre des défaillances, etc.),
- *la finesse de l'analyse par l'expert*, c'est-à-dire notamment le nombre et la typologie d'événements initiateurs à quantifier identifiés par l'expert,
- *le jugement d'expert dans le choix des hypothèses* et paramètres rentrés dans le modèle, soit intrinsèques au modèle lui-même (probabilité d'occurrence de tel événement initiateur), soit imputables à l'utilisateur (longueur de canalisation, nombre d'opération dans l'année, etc.).

Au cours du projet, le groupe de travail a tenté d'analyser quantitativement la part de chaque cause principale dans la variabilité totale. Notamment, en fixant les hypothèses entrées par chaque utilisateur dans son modèle propre, on serait à même de mettre en lumière les incertitudes liées au type de modélisation et au modèle lui-même.

Après plusieurs essais, il est apparu que les données d'entrée ne pouvaient pas être rendues exactement les mêmes, car elles dépendent intimement du type de modèle utilisé. Par exemple, certains modèles nécessitent seulement le diamètre et la longueur de canalisation pour calculer la probabilité de fuite majeure sur cette dernière. D'autres modèles auront besoin de connaître en supplément, la cause supposée de la fuite ou le nombre d'équipements sensibles (vannes, joints) avant de proposer un calcul.

Il est donc très difficile d'identifier la part d'incertitude liée au jugement et à l'analyse de l'expert, de celle liée au modèle même qu'il utilise. Les deux sont en effet intimement liés.

Quoiqu'il en soit, la variabilité des résultats imputable aux deux effets combinés demeure plus importante pour les scénarios liés aux installations mobiles que ceux liés aux installations fixes. Si l'on fait exception d'une valeur extrême pour chaque scénario, la probabilité évaluée varie en moyenne de deux à trois ordres de magnitude selon par exemple que la cause de rupture retenue est un arrachement, une surpression interne ou un effet missile, et que la modélisation est faite par données génériques ou par arbre de défaillance.

## 5.2 EVALUATION DES CONSEQUENCES

### 5.2.1 Distances d'effets calculées pour les 11 scénarios de référence

La figure ci-dessous fait apparaître une forte disparité dans les distances d'effets calculées par l'ensemble des partenaires. Cette disparité n'est pas constante pour tous les scénarios, et certains comme le scénario 5 (rupture d'un réservoir cryogénique bateau) possèdent une marge d'incertitude énorme : entre 200 m et 3 000 m, à la concentration de 6 200 ppm.

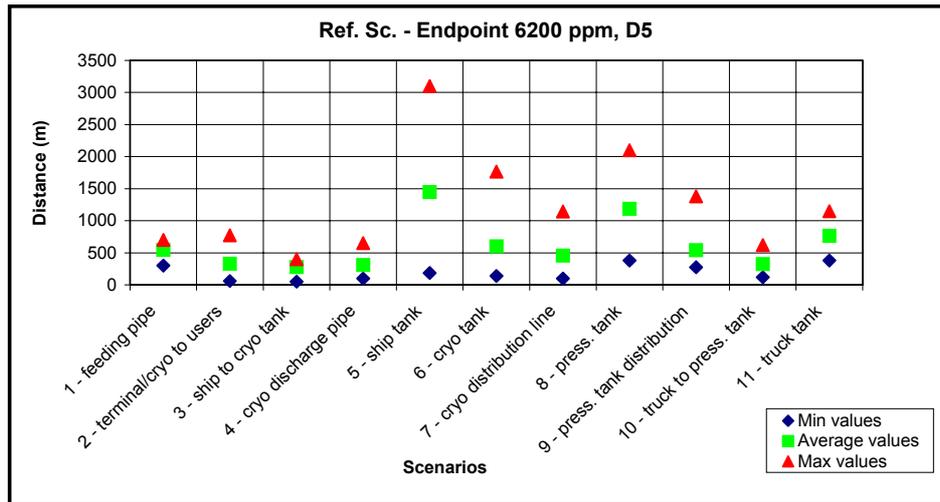


Figure 4 : Comparaison des distances d'effets modélisées par les partenaires – Valeurs maxi, moyennes et mini sont représentées pour les 11 scénarios de référence

Nota : Chaque point représente un calcul de distance d'effet à la concentration de 6 200 ppm. Les conditions météorologiques étaient fixées à D5 (D : classe de stabilité atmosphérique neutre ; vitesse de vent à 5 m/s).

Quelques éléments généraux peuvent déjà expliquer une grande part de la variabilité des résultats. Ainsi :

- La définition précise du scénario dépend pour beaucoup de la connaissance du phénomène en jeu : typiquement pour le scénario 5 évoqué plus haut, la ruine du réservoir correspond à un rejet d'ammoniac cryogénique à la surface de l'eau. Tous les partenaires prévoient une dilution partielle d'ammoniac dans l'eau et une vaporisation de l'autre partie. Mais le pourcentage d'ammoniac dilué, la fraction d'aérosols présents dans le nuage dispersé, varie significativement d'un partenaire à l'autre par manque de connaissance précise sur le comportement du produit.
- De même que pour l'évaluation des probabilités, la cause considérée pour le scénario influence notablement les hypothèses de modélisation prises et donc les distances calculées : exemple pour la rupture du stockage cryogénique, selon que la rupture est due à une surpression interne, un effet domino, un séisme, l'expert modélise la rupture de la première enceinte seule, de la double enveloppe ou seulement du toit.

Les autres explications de la variabilité des résultats sont à chercher directement dans les phases qui constituent l'évaluation des conséquences, à savoir le calcul du terme source, le modèle de dispersion atmosphérique utilisé, les seuils d'effets toxiques recherchés.

### 5.2.2 Sources d'incertitude liées au calcul du terme source

Calculer le terme source d'un scénario fixé, consiste à déterminer les conditions selon lesquelles un produit est émis à l'atmosphère (débit massique, vitesse, température, durée de rejet), avant d'envisager sa dispersion atmosphérique.

S'agissant du calcul du terme source, sont notamment déterminants pour la variabilité des résultats :

- . le type d'écoulement (liquide, gazeux ou diphasique),
- . en fuite liquide ou gazeuse, la prise en compte des pertes de charges liées à la longueur de canalisation en amont de la fuite,
- . le calcul du flash adiabatique,
- . la quantité d'aérosols formés par arrachement mécanique dans le nuage,
- . le taux de recondensation possible lors d'une détente brusque (ruptures instantanées de réservoirs),
- . les hypothèses faites sur le comportement des pompes, lorsqu'elles fonctionnent à contre-pression nulle,
- . la valeur du coefficient de décharge, fonction de la forme de l'orifice, qui est proportionnel au débit de fuite,
- . les conditions initiales dans le réservoir (pression, température, etc.)
- . la formation ou non d'une flaque liquide au sol (rayon d'extension, débit d'évaporation de la nappe),

Dans le chapitre suivant, des exercices spécifiques ont été réalisés pour mieux comprendre la contribution spécifique du calcul du terme source dans la variabilité totale des résultats.

### **5.2.3 Sources d'incertitude liées aux modèles de dispersion atmosphérique**

Une fois le terme source du scénario défini, la modélisation de la dispersion atmosphérique du rejet est encore une étape source de variations importantes dans les distances calculées. Sont notamment sources d'incertitude dans cette étape :

- . la prise en compte des paramètres orographiques (stabilité atmosphérique, humidité, rugosité du sol, température ambiante, vitesse du vent, hauteur de la couche d'inversion ...) dans les équations de dispersion,
- . la prise en compte des dimension et position de la brèche pour définir le type de rejet : rejet impactant ou non, instantané ou continu, au sol ou en altitude, horizontal ou vertical...,
- . la prise en compte des caractéristiques physiques du produit et du nuage formé (gaz lourd, gaz neutre, gaz léger), fonctions de la quantité d'aérosols dans le rejet, de la température du nuage, de sa vitesse,
- . les équations mêmes utilisées pour modéliser le phénomène physique, peuvent varier d'un logiciel à l'autre.

Dans le chapitre suivant, des exercices spécifiques ont également été réalisés pour mieux cerner la contribution spécifique du modèle de dispersion utilisé dans la variabilité totale des résultats.

#### 5.2.4 Sources d'incertitude liées aux seuils de toxicité utilisés

Pour ce qui concerne la toxicité accidentelle de l'ammoniac, l'INERIS a considéré, conformément à la fiche technique "Toxicité de l'ammoniac", publiée en 1998 par le Service de l'Environnement Industriel du MATE [6] :

- au Seuil des Effets Létaux (SEL), un effet en  $C^2.t$ , établi autour d'un point correspondant à la  $CL_{1\%}$ , égal à 6 200 ppm pour 30 minutes d'exposition,
- pour le Seuil des Effets Significatifs (SES), les valeurs de :
  - \* 500 ppm pour 30 minutes d'exposition,
  - \* 1 000 ppm pour 3 minutes d'exposition.

Cette dernière approche conduit à considérer un effet en  $C^{3,3}.t$ .

Les organismes TNO et VTT utilisent quant à eux, la formule de Probit suivante pour la toxicité accidentelle de l'ammoniac :

$$Pr = -15,6 + \ln (C^2 \times t)$$

où C est la concentration d'ammoniac dans l'atmosphère exprimée en  $mg/m^3$ ,  
t est la durée d'exposition exprimée en min.

DNV utilise le logiciel SAFETI. La formule habituelle de Probit utilisée dans ce logiciel pour la toxicité accidentelle de l'ammoniac, est la suivante :

$$Pr = -9,82 + 0,71 \times \ln (C^2 \times t)$$

où C est la concentration d'ammoniac dans l'atmosphère exprimée en ppm,  
t est la durée d'exposition exprimée en min.

Il est clair que les conséquences calculées pour chaque scénario sont sensiblement affectés par les modèles de toxicité utilisés, et les seuils d'effets retenus pour évaluer les distances.

La problématique est semblable par exemple pour le phénomène de BLEVE (non concerné dans le projet ASSURANCE) où la plupart des organismes s'entendent sur la façon de modéliser le phénomène, avec de faibles variations dans les résultats. Par contre, les distances d'effets thermiques peuvent tout de même varier sensiblement en fonction des doses thermiques retenues par chacun pour évaluer les effets sur l'homme.

Dans le projet ASSURANCE, le problème du modèle de toxicité à retenir pour l'ammoniac a été contourné, puisque les distances d'effets systématiquement calculées dans l'évaluation des conséquences correspondent à des concentrations fixées (6 200 ppm, 1 000 ppm et 500 ppm) et non pas à des doses toxiques.

### 5.3 EVALUATION DU RISQUE SOCIÉTAL ET INDIVIDUEL

Les conséquences probabilistes (qui représentent la combinaison des distances d'effets calculées pour un scénario par sa probabilité d'occurrence) sont présentées de deux manières différentes (cf. annexe C) :

1. **la notion de risque individuel** : c'est la probabilité qu'une personne exposée de façon permanente au danger soit tuée. Cette notion est habituellement représentée sur une carte des environs du site par des courbes d'isorisque individuel (distance d'effet maximale à laquelle un individu est exposé à une probabilité de mort individuelle de  $10^{-5}$  /an,  $10^{-6}$  /an) ;
2. **la notion de risque sociétal** : c'est la probabilité lors d'un accident de causer la mort de plus d'un certain nombre de personnes. Cette notion est habituellement représentée à l'aide de courbes dites F/N (nombre d'individus N exposé en permanence à une fréquence d'accident F de  $10^{-5}$  /an,  $10^{-6}$  /an).

Les deux graphiques ci-après représentent respectivement le risque individuel et le risque sociétal calculés pour le site étudié par chacun des partenaires du projet.

Sur la Figure 5, chaque courbe rouge représente une enveloppe des isorisques à  $10^{-5}$  /an calculés pour l'ensemble des scénarios de référence. La plus petite courbe représente l'enveloppe isorisque  $10^{-5}$  /an du partenaire le plus optimiste ; la plus grande zone représente le même isorisque calculé par le partenaire le plus pessimiste.



*Figure 5 : Variabilité des résultats dans le calcul du risque individuel – Minimum et maximum calculés pour la courbe d'isorisque  $10^{-5}$  /an*

Sur la Figure 6, chaque courbe représente le nombre d'individus N exposé en permanence à une fréquence d'accident F par an, calculée comme une enveloppe pour l'ensemble des scénarios de référence de l'établissement. Le résultat de chaque partenaire est représenté sur la figure ci-dessous.

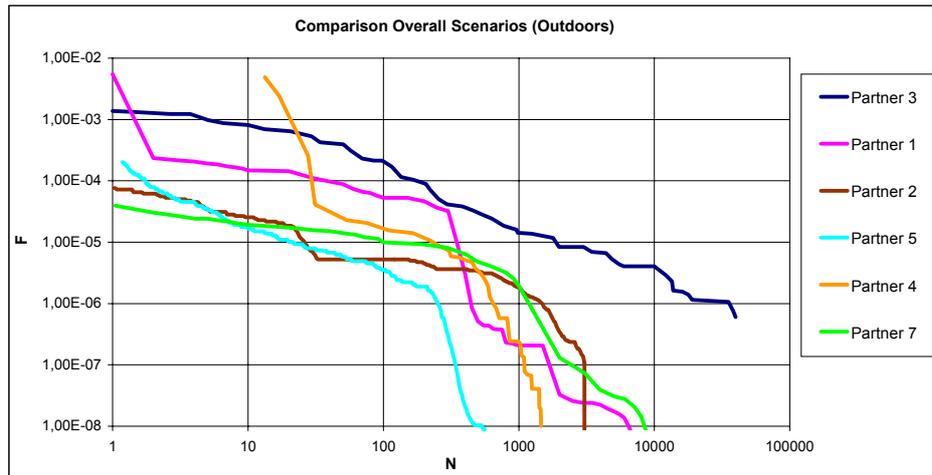


Figure 6 : Variabilité des résultats dans le calcul du risque sociétal

#### 5.4 CONCLUSION QUANT A L'ANALYSE QUANTITATIVE DES RISQUES

La Figure 4 permet d'avoir une idée de l'incertitude dans les distances d'effets calculées pour chaque type de scénario, dans le cas d'une approche déterministe de la sécurité.

La Figure 5 permet d'avoir une idée de l'incertitude dans les zones isorisques calculées pour l'établissement étudié, dans le cas d'une approche probabiliste de la sécurité. Dans cette seconde option, la notion d'isorisque permet d'atténuer la grande incertitude liée à la seule évaluation des conséquences en termes de distances d'effets. En effet, le poids dans le risque global du site des scénarios (fortes conséquences, faible probabilité) est "nivelé" par des scénarios (conséquences moindres, probabilité non négligeable).

Toutefois, la variabilité des résultats reste encore très importante pour fonder une politique cohérente de gestion des risques. Cette variabilité se résume principalement dans les cinq points suivants :

- ***Le choix des scénarios retenus comme contribuant au risque à l'extérieur de l'établissement.***  
Ce premier point est crucial, il dépend entièrement du jugement d'expert. Pour le projet ASSURANCE, il est cependant non pertinent, puisqu'on a vu dans le chapitre précédent, que chaque partenaire étaient d'accord sur les principaux scénarios majeurs à modéliser.
- ***L'incertitude ou l'ambiguïté dans la définition des scénarios.***  
Ce point est en l'occurrence la cause majeure d'incertitude dans le scénario de rupture catastrophique du réservoir cryogénique (cf. § 5.2.1 page 28). Compte tenu de l'importance de ces scénarios notamment dans la maîtrise de l'urbanisation, ce point montre la nécessité d'être très précis dans la définition même du scénario.
- ***L'incertitude intrinsèque aux modèles utilisés.***  
Les modèles ne sont toujours qu'une simplification des phénomènes physiques étudiés. Le niveau d'incertitude dépend alors à la fois de la bonne connaissance du phénomène physique et du degré de simplification employé pour le modéliser (logiciel gaussien, intégral ou CFD 3D).

- ***Le choix des hypothèses dans la modélisation des phénomènes.***  
Modéliser un scénario requiert toujours l'intervention du jugement d'expert quel que soit le modèle, non seulement pour la définition des hypothèses de départ, mais aussi pour gérer l'interface entre les différents modèles utilisés (calcul du terme source, et choix d'un débit de fuite à rentrer dans le modèle de dispersion ; pour les logiciels de type intégral, passage du modèle de gaz lourd ou de jet turbulent au modèle de gaz neutre (gaussien)).  
Ainsi, l'expérience et la connaissance des phénomènes par l'expert sont déterminants pour définir les hypothèses les plus réalistes dans les scénarios : diamètre et durée de fuite, comportement du nuage, formation d'aérosols ou d'une flaque au sol, etc.
- ***Le niveau global de prudence ou de conservatisme propre à chaque expert.***  
Cette prudence relative va amener chacun à formuler des hypothèses plus ou moins majorantes, en fonction toujours de son expérience et de sa connaissance des phénomènes.

Encore une fois, comme pour l'évaluation des probabilités, l'incertitude liée aux résultats finaux d'une évaluation des risques, est une fonction combinée du degré de finesse du modèle employé et de l'expérience, de la connaissance des phénomènes par l'analyste des risques. Il est très difficile de dissocier l'un de l'autre.

## 6. ETUDES DE CAS

---

L'étape d'analyse quantitative des risques, résumée au chapitre précédent, a permis de mettre en lumière une variabilité importante des résultats calculés par chaque partenaire.

Quelques différences et incertitudes ont pu être expliquées facilement suite à des malentendus lors de la phase de recueil d'informations sur le site, ou suite également à un manque d'information précise, nécessitant dès lors, des approximations ou des hypothèses faites par les partenaires eux-mêmes.

Mais une grande part de la variabilité restait encore inexplicable précisément. C'est pourquoi une étude de cas a été organisée. Le groupe de travail s'est mis d'accord sur six cas ou six scénarios, dont certaines hypothèses ont été volontairement fixées dans le but d'étudier de manière isolée, l'influence d'autres paramètres précis sur la variabilité totale des résultats.

### 6.1 DESCRIPTION SUCCINCTE

**Cas n°1 :** ce scénario considère la rupture guillotine de la canalisation d'alimentation (8") du site en ammoniac, longue de 70 km, et séparant le site producteur du site consommateur (cf. scénario de référence 1).

Les hypothèses fixées par le groupe sont la hauteur de rejet, la pression et la température dans la ligne avant la rupture, et la durée de la fuite (5 minutes).

Le principal intérêt de ce scénario est d'analyser la part de variabilité imputable au calcul du terme source dans la modélisation des distances d'effet.

\*\*\*

**Cas n°2 :** ce scénario considère la rupture guillotine de la canalisation de soutirage (20") du réservoir cryogénique, en aval de la vanne de sécurité automatique (cf. scénario de référence 10).

Les hypothèses fixées par le groupe sont la longueur de ligne avant la rupture (perte de charge), la hauteur de rejet, la hauteur initiale de liquide dans le réservoir (pression motrice), et la durée du rejet (5 minutes).

Le principal intérêt de ce scénario est d'analyser la part de variabilité imputable au modèle de formation de flaque dans le calcul des distances d'effet. Dans ce cas précis, le calcul du terme source est en effet a priori relativement simple (équation de Bernoulli).

\*\*\*

**Cas n°3 :** ce scénario considère la ruine d'un réservoir d'ammoniac liquéfié sous pression par un trou de diamètre 100 mm dans la paroi du réservoir, sous ce dernier (cf. scénario de référence 14A).

Les hypothèses fixées sont la hauteur de rejet, la pression dans le réservoir (17 bar) constante tout au long de la fuite (inertage à l'azote), la capacité du réservoir, la direction du rejet (vertical descendant), la taille de la rétention.

Le principal intérêt de ce scénario est d'analyser la modélisation faite par les partenaires d'un rejet impactant d'ammoniac dans une cuvette de rétention.

**Cas n°4 :** ce scénario considère la ruine catastrophique et soudaine d'un réservoir d'ammoniac liquéfié sous pression (cf. scénario de référence 14B).

Les hypothèses fixées sont la capacité du réservoir et la pression dans le réservoir (17 bar) avant rupture.

Le principal intérêt de ce scénario est d'analyser la modélisation faite par les partenaires d'un relâchement instantané d'ammoniac sous pression à l'atmosphère.

\*\*\*

**Cas n°5 :** ce scénario considère le rejet par une ligne connectée au réservoir cryogénique d'ammoniac à  $-33^{\circ}\text{C}$ .

Les hypothèses fixées sont la hauteur de rejet, la direction du rejet (horizontal), le débit de fuite (330 kg/s), et la durée du rejet (5 minutes).

De même que pour le cas n°2, le principal intérêt de ce scénario est d'analyser la part de variabilité imputable au modèle de formation de flaque et de dispersion atmosphérique dans le calcul des distances d'effet. Dans ce cas précis, le terme source est fixé par le groupe de travail.

\*\*\*

**Cas n°6 :** de même que pour le cas n°4, ce scénario considère la ruine catastrophique et soudaine d'un réservoir d'ammoniac liquéfié sous pression.

La capacité du réservoir et sa pression avant rupture sont les mêmes que dans le cas n°4. Sont fixées par contre pour ce cas, la fraction de gaz dans le nuage après expansion initiale (0,166), le volume et le rayon initiaux du nuage après expansion, la hauteur du rejet.

Le principal intérêt de ce scénario est d'analyser les modèles de dispersion atmosphériques des partenaires, en fixant le plus précisément possible les variables liées au terme source.

Pour chaque scénario, les conditions météorologiques étaient fixées : classe de stabilité F, vent à 2 m/s, température de l'air à  $20^{\circ}\text{C}$ , humidité relative de 70%.

## 6.2 EXEMPLES DE RESULTATS OBTENUS

### 6.2.1 Cas n°1

La difficulté principale de ce scénario est de prendre en compte les 75 km de longueur de canalisation qui séparent le lieu de la fuite du lieu d'où les motopompes propulsent l'ammoniac. En modélisant la rupture guillotine de cette ligne, il convient de considérer une dépressurisation rapide de la ligne à partir du lieu de fuite. Cette dépressurisation se caractérise par une onde de choc qui remonte dans la canalisation à la vitesse du son. Il en résulte une décroissance très rapide du débit de fuite, qui a été modélisée par l'INERIS sur le graphique suivant.

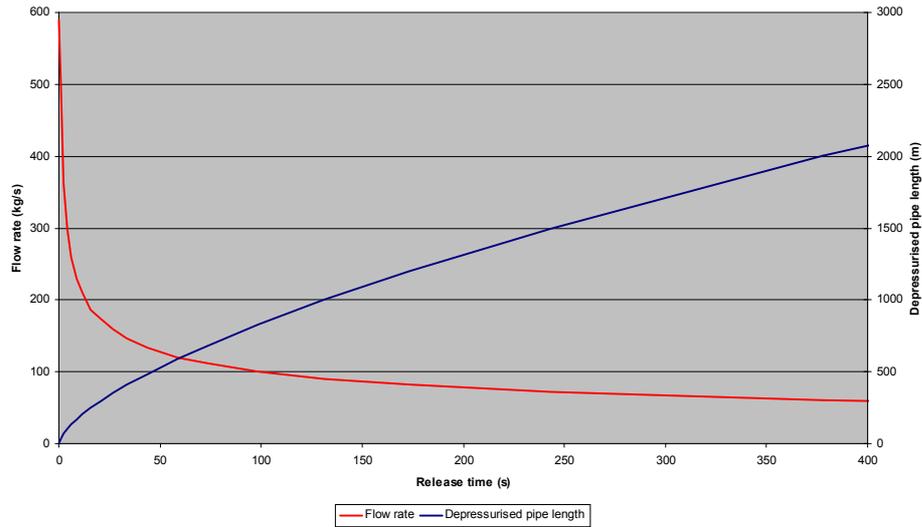
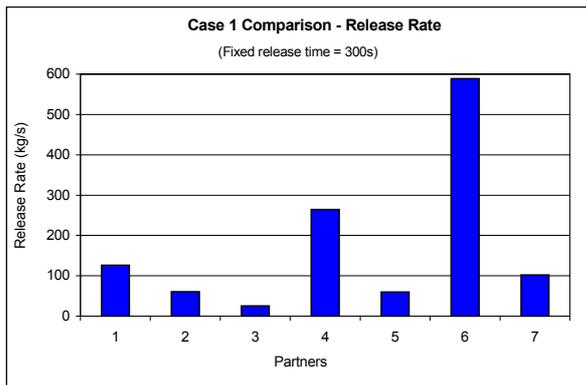


Figure 7 : Cas n°1 : évolution du débit de fuite et de l'onde de choc depuis le lieu de fuite en fonction du temps

Tous les partenaires considèrent pour ce scénario un rejet diphasique horizontal sans formation de flaque, à l'exception du seul partenaire 4 qui considère l'évaporation d'ammoniac à partir d'une flaque alimentée par le pipe.

On vient de voir que le débit de fuite décroissait très rapidement en fonction du temps. Or, tous les partenaires utilisent des logiciels de dispersion atmosphérique, qui ne prennent en compte qu'un débit de rejet constant dans le temps. La part la plus importante de variabilité dans les résultats de ce cas, provient ainsi des critères retenus par chacun pour calculer la valeur constante du débit de fuite à utiliser dans le modèle de dispersion.



Partenaire	Débit retenu pour la dispersion	Longueur ligne (m)
1.	Moyenne sur 5 min	910
2.	Moyenne sur 5 min	10000
3.	Moyenne sur 5 min	76000
4.	Moyenne sur 5 min	1000
5.	Moyenne sur 200 s	75000
6.	Valeur max. initiale	1
7.	Valeur à 30 s	8000

Figure 8 : Débits de fuite retenus par chaque partenaire pour le modèle de dispersion atmosphérique dans le cas n°1

La plupart des partenaires choisissent d'utiliser dans le modèle de dispersion une valeur moyennée du débit de fuite sur la durée du rejet. Le partenaire 6 est particulièrement majorant dans ce cas précis, car il utilise comme débit constant la valeur du débit de fuite à t=0 s.

Les autres variations dans les résultats sont essentiellement dues à la longueur *moyenne* de canalisation dépressurisée choisie par chaque partenaire pour modéliser son débit de fuite. En effet, cette valeur est utilisée pour estimer la perte de charge qui influence directement le débit de fuite, et elle varie dans le temps tout comme le débit de fuite (cf. courbe bleue de la Figure 7).

### 6.2.2 Cas n°2

Le calcul du débit de fuite à la brèche est relativement facile pour ce scénario, puis que le rejet est entièrement liquide. L'équation de Bernoulli s'applique alors, corrigée par un coefficient de frottement dû aux pertes de charge. Au final, les résultats obtenus par chaque partenaire sont très similaires.

La seconde étape de ce cas, consiste à modéliser les dimensions et taux d'évaporation de la flaque d'ammoniac formée au sol. Les modèles de formation et d'évaporation de flaque utilisés sont alors sensiblement différents entre eux : le débit d'évaporation à titre d'exemple, varie de 54 à 264 kg/s.

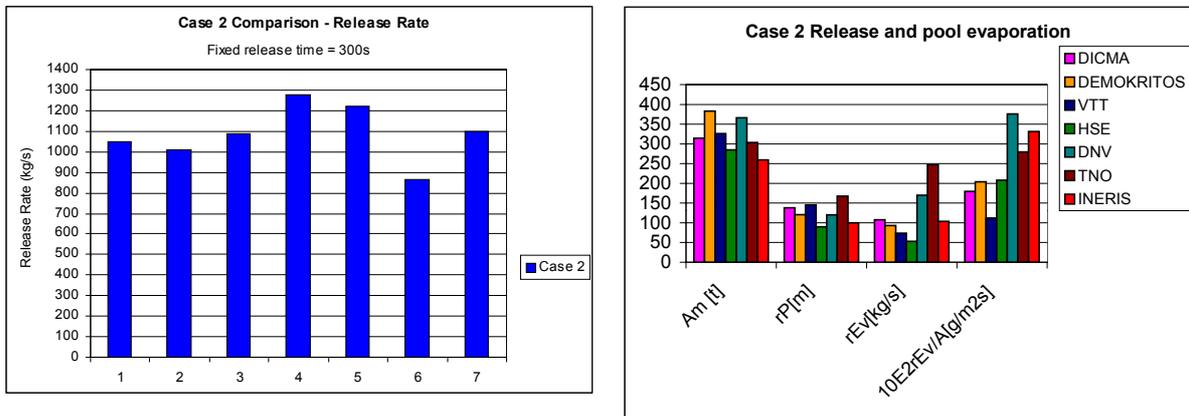


Figure 9 : Débits de fuite et modèles d'évaporation de flaque calculés par chaque partenaire dans le cas n°2

$A_m$  : quantité totale relâchée en tonnes

$r_P$  : diamètre de la flaque (m)

$r_{Ev}$  : débit d'évaporation de la flaque (kg/s)

$r_{Ev/A}$  : taux d'évaporation de la flaque par unité de surface ( $g/m^2s$ )

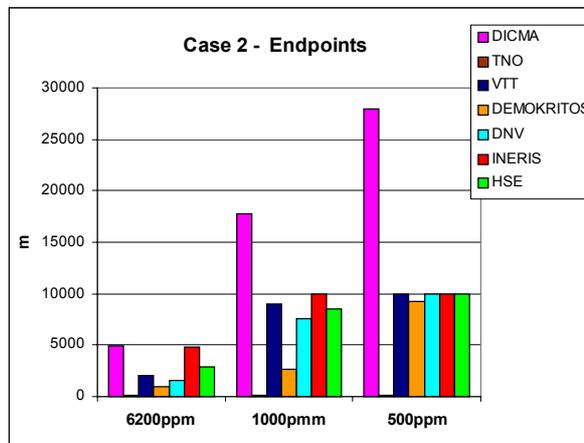


Figure 10 : Distances d'effets calculées par chaque partenaire dans le cas n°2

Pour le seuil de concentration de 500 ppm, beaucoup de partenaires comme l'INERIS ont limité leurs distances à 10 km. Il faut donc comprendre sur l'histogramme précédent ainsi que les suivants pour les cas 3 à 6, distance > 10 km, limite supérieure de validité des modèles de dispersion « gaussiens ».

Pour ce scénario, les distances d'effets calculées par les partenaires sont très disparates. Cela peut s'expliquer par les modèles de dispersion employés par chaque partenaire, en plus de l'incertitude liée déjà à la dimension et au débit d'évaporation de la flaque.

En effet, les partenaires 3, 5 et 7 ont par exemple considéré un modèle de gaz neutre (dispersion gaussienne) pour modéliser l'évaporation de la flaque.

Le partenaire 2 au contraire, utilise un modèle de gaz léger pour disperser la flaque formée. Ceci explique pourquoi les distances d'effet sont nettement en retrait des autres calculées.

Les partenaires 1 et 6 ont utilisé un modèle de gaz lourd pour ce scénario. L'explication physique est que 100% du liquide ne retombe pas au sol au droit de la brèche. Le logiciel (PHAST 4.2., EFFECTS) considère que la vitesse du rejet est suffisante pour induire un léger fractionnement mécanique du rejet, et 4% de l'ammoniac rejeté reste en suspension dans le nuage sous forme d'aérosols. Ces 4% d'aérosols conjugués à l'évaporation gazeuse de la flaque sont suffisants pour donner au nuage un comportement de gaz lourd.

### 6.2.3 Cas n°3

La difficulté essentielle de ce scénario est de modéliser un rejet impactant d'ammoniac liquéfié sous pression sur le sol de la cuvette. Il est clair qu'aucun logiciel ne permet de modéliser directement et de façon réaliste ce phénomène complexe.

La variabilité des résultats liés à ce scénario s'explique donc assez naturellement par le degré de connaissance varié du phénomène physique lui-même, puis la diversité des approches développées pour rendre compte au mieux du phénomène.

Pour son approche, l'INERIS s'est inspiré des essais en grand qu'il a mené en 1998, pour diverses conditions expérimentales de rejet d'ammoniac, dont des rejets impactants (R. Bouet – rapport INERIS – 1999).

C'est ainsi que pour rendre compte de la complexité physique, l'INERIS considère trois termes sources successifs pour la dispersion du rejet impactant (cf. tableau ci-dessous).

- Terme source 1 : l'ensemble de l'ammoniac rejeté se retrouve à l'atmosphère sous forme gazeuse, après vaporisation instantanée suite au contact avec le sol chaud.
- Terme source 2 : Le sol s'est refroidi au contact de l'ammoniac, et environ 40% de l'ammoniac rejeté est piégé au sol sous forme liquide, et alimente une flaque sous le réservoir. Le reste du rejet part toujours à l'atmosphère sous forme gazeuse.
- Terme source 3 : A la fin du rejet, il ne reste plus que l'évaporation de la flaque à  $-33^{\circ}\text{C}$  formée sous le réservoir.

Les partenaires 1, 3 et 5 ont des approches à peu près comparables à celle de l'INERIS. Les partenaires 2, 4 et 7 ne considèrent pas pour leur part la formation d'une flaque au sol, et modélisent le rejet comme s'il n'était pas impactant.

Partenaire	% liquide retombant au sol	Terme source utilisé dans la dispersion
1	82.56	3 contributions : 1) flash du rejet (37.5kg/s; 220s) 2) vaporisation instantanée après impact (1 085kg) 3) évaporation de flaue (2kg/s; > 1 800s)
3	60	2 contributions : 1) flash du rejet + aérosols (84.4kg/s; 237s) 2) évaporation de flaue (1.7kg/s)
2	0	50000kg
4	0	Equivalent au débit de fuite (69kg/s)
5	68	2 contributions : 1) flash du rejet (37kg/s) 2) vaporisation des aérosols après impact (75kg/s) (évaporation de flaue a été négligée)
6	42	3 contributions : 1) rejet gazeux (215kg/s; 60s) 2) rejet gazeux (124.7kg/s; 60-232s) plus alimentation d'une flaue au sol 3) évaporation de la flaue 2.3kg/s; 60s à >1800s
7	0	Equivalent au débit de fuite (210kg/s)

Tableau 13 : Modélisation d'un rejet impactant d'ammoniac par chaque partenaire

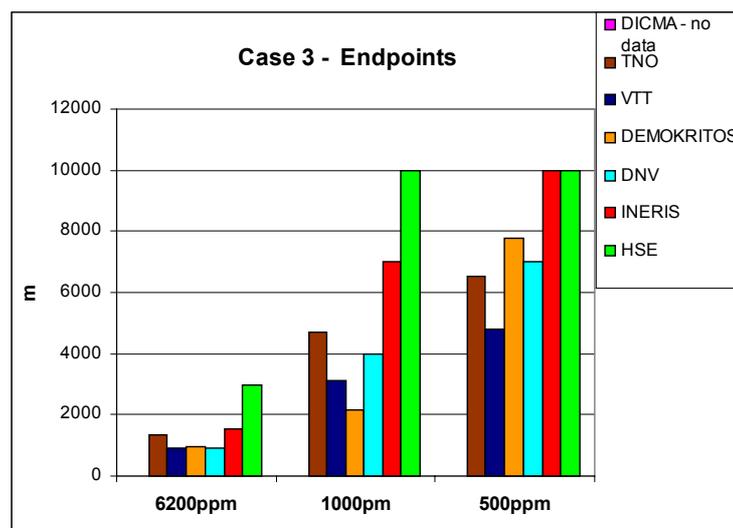


Figure 11 : Distances d'effets calculées par chaque partenaire dans le cas n°3

La modélisation de ce scénario est complexe. La variabilité des résultats dans le graphique ci-dessus reflète les différentes options de modélisation choisies par chaque partenaire.

### 6.2.4 Cas n°4

La modélisation d'un relâchement instantané d'ammoniac sous pression à l'atmosphère est intéressante, car elle permet la comparaison directe des modèles de dispersion entre eux : quantité d'air entraîné dans le nuage lors de la dépressurisation (dilution initiale), vitesse du nuage, etc.

Parmi les premières conclusions, tous les modèles n'utilisent pas les mêmes hypothèses de dilution : proportion d'air entraîné dans le nuage, quantité d'aérosols dans le nuage.

Notamment en fonction de la quantité d'aérosols dans le nuage, le modèle de dispersion employé ensuite est soit celui d'un gaz lourd soit celui d'un gaz neutre. En fonction de la vitesse initiale du nuage, il peut aussi être employé un modèle de jet turbulent suivi d'un modèle de gaz lourd (cf. PHAST 4.2).

En fonction du type de modèle, les distances d'effets peuvent être radicalement différentes.

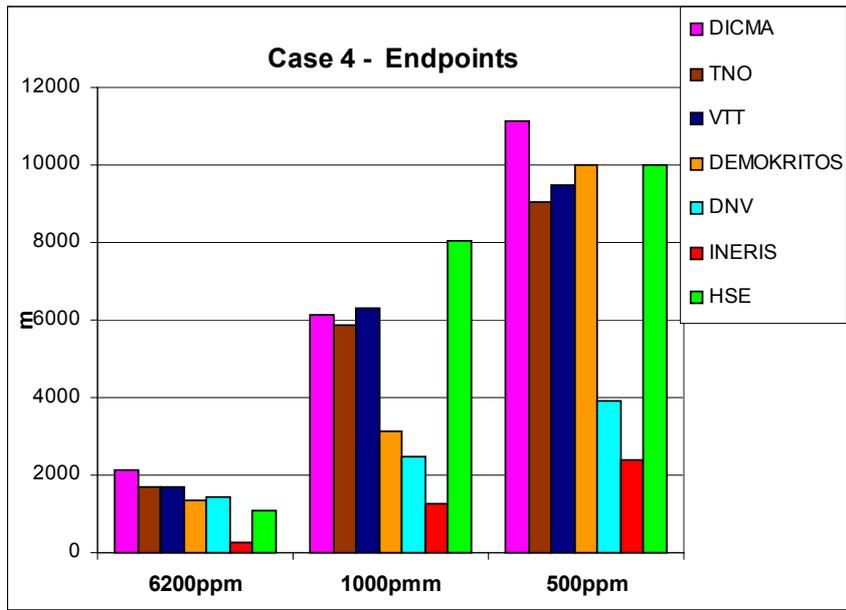


Figure 12 : Distances d'effets calculées par chaque partenaire dans le cas n°4

A titre indicatif, DNV a réalisé ses modélisations en utilisant la version 6.0 de PHAST. L'INERIS pour sa part, emploie la version 4.2. La différence dans les distances imputables directement au modèle employé est notable. Pour s'en convaincre, l'INERIS a réalisé la même modélisation avec le même jeu d'hypothèses mais sur les deux versions de PHAST. Le graphe ci-dessous résume cette étude de cas.

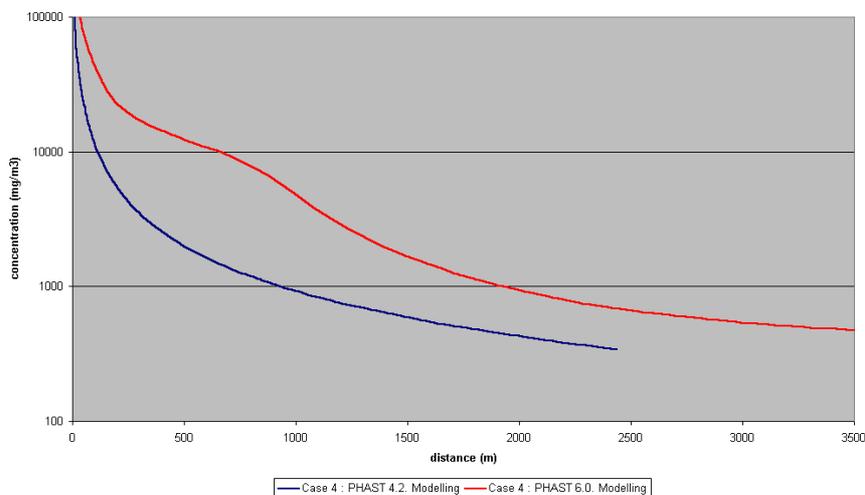


Figure 13 : Concentration vs. distance de la fuite pour le cas n°4 : PHAST 4.2 et 6.0

### 6.2.5 Cas n°5

Le cas n°5 n'a pas apporté d'information supplémentaire sur les raisons de la variabilité des résultats par rapport à la modélisation du cas n°2.

### 6.2.6 Cas n°6

Le cas n°6 n'a pas apporté d'information supplémentaire sur les raisons de la variabilité des résultats par rapport à la modélisation du cas n°4.

## 6.3 CONCLUSIONS DE L'EXERCICE

Les études de cas réalisées a posteriori de l'analyse quantitative des risques, corroborent parfaitement et viennent même étayer les conclusions générales formulées à l'issue du chapitre 5.

- ***L'incertitude intrinsèque aux modèles utilisés.***

L'incertitude liée aux modèles est par exemple flagrante pour les cas 2, 5, 4 et 6.

Dans le cas d'une fuite d'ammoniac cryogénique dans une cuvette de rétention, le groupe fixe arbitrairement le débit de fuite dans la cuvette (cas n°5). La variabilité sur le débit d'évaporation calculé est de l'ordre de 500 % (entre 54 kg/s et 264 kg/s). Elle est uniquement due aux modèles de formation et d'évaporation de flaque employés par chaque partenaire.

De même dans le cas n°6, où le groupe fixe la quantité d'ammoniac instantanément relâchée à l'atmosphère, la quantité d'air incorporée au nuage, et la taille du nuage après dilution initiale, la variabilité des résultats s'explique seulement par la différence de modélisation dans la dispersion d'un gaz lourd. L'incertitude dans les distances calculées à la concentration de 500 ppm, varient alors entre 1 500 m et plus de 10 km.

Le même type de différence est mis en exergue par l'INERIS dans le cas n°4 entre les version 4.2. et 6.0. de PHAST, pourtant confiées à un même utilisateur. La même remarque s'applique également au logiciel EFFECTS, dont le TNO utilisait pour le projet la version 4.0. et DICMA la version 2.0.

\*\*\*

- ***L'intervention du jugement d'expert à l'interface des modèles.***

L'intervention du jugement d'expert dans le choix des hypothèses à l'interface des modèles, se révèle particulièrement importante lors du calcul des termes sources, et notamment dans le cas n°1.

A une ou deux incertitudes près dues à la difficulté de modéliser le terme source, chaque partenaire s'accorde sur l'évolution dans le temps du débit de fuite, depuis sa valeur maximale à  $t = 0$  s, jusqu'à sa valeur au bout des cinq minutes de fuite.

Les distances d'effets calculées varient pourtant sensiblement entre elles, en fonction de la valeur de débit de fuite choisie par chaque partenaire, comme donnée d'entrée constante du modèle de dispersion.

Certains moyennent le débit sur toute la durée de fuite, d'autres considèrent la valeur maximale du débit à  $t = 0$  s.

Ce choix est également révélateur de la prudence ou du conservatisme propre à chaque expert, comme d'autres hypothèses telles que la durée de fuite, le diamètre équivalent de fuite, etc.

\*\*\*

- ***Le jugement d'expert dans l'expérience et la connaissance du phénomène.***

Modéliser un scénario requiert toujours l'intervention du jugement d'expert quel que soit le modèle, ne serait-ce parce que le modèle n'est qu'une simplification du phénomène physique étudié. Dans ce cas, la variabilité des résultats dépend pour beaucoup de l'expérience et de la connaissance du phénomène par l'analyste pour définir les hypothèses les plus réalistes possibles.

Les meilleurs exemples concernent les cas n°2 et 3. Tous les partenaires sont à peu près d'accord sur le comportement physique des rejets étudiés.

Ainsi, pour le cas n°2, chacun s'accorde sur un rejet monophasique liquide d'ammoniac qui vient alimenter une flaque dans la rétention. Le point divergent concerne la quantité d'aérosols présente dans le nuage dispersé. Pour les partenaires 1 et 6, un léger fractionnement du jet à la sortie de la brèche est suffisant pour engendrer des aérosols et donner au nuage un comportement de gaz lourd. Pour les autres partenaires, 100 % du rejet vient alimenter la flaque, il s'ensuit une simple évaporation gazeuse de cette flaque. Pour le partenaire 2, le nuage qui s'évapore est à température ambiante et aura un comportement de gaz léger. Pour les autres experts, le nuage gazeux est encore bien froid et aura un comportement de gaz neutre. En fonction du jugement de l'expert, la variabilité des résultats dans ce cas précis est très importante.

Pour le cas n°3, cinq partenaires considèrent que le rejet impactant donnera lieu à la formation d'une flaque, après refroidissement suffisant du sol de la cuvette. Pour deux autres experts, l'intégralité du rejet part se disperser à l'atmosphère. De même que précédemment, aucun modèle ne prend simplement en compte la problématique des rejets impactants, et les distances sont fortement influencées par les choix de l'expert.

## 7. BILAN COMPARATIF DES AVANTAGES ET INCONVENIENTS ENTRE METHODES DETERMINISTE ET PROBABILISTE

---

### 7.1 DEFINITIONS

#### 7.1.1 Le concept de défense en profondeur

Le concept de défense en profondeur est une méthode de raisonnement et un cadre général permettant d'examiner complètement la sécurité d'une installation dangereuse. Il a été développé aux Etats-Unis par l'AIEA<sup>4</sup> dans les années 1960, pour concevoir la sécurité des premiers réacteurs nucléaires. Ce concept consiste en une suite d'actions, d'équipements ou de procédures, regroupés en niveaux ou barrières de défense dont chacun a pour objet de prévenir les dégradations susceptibles de conduire au niveau suivant et de limiter la conséquence de la défaillance du niveau précédent. Cette démarche s'intéresse donc à la fois à la prévention des situations anormales et à la limitation de leurs conséquences.

Le concept de défense en profondeur est actuellement structuré en cinq niveaux [7] :

1. ***Prévention des anomalies de fonctionnement et des défaillances du système.***  
Il faut doter les installations d'une excellente résistance intrinsèque à l'égard de ses propres défaillances (conception prudente) ou d'agressions externes, afin de prévenir la sortie du domaine de fonctionnement normal.
2. ***Maintien de l'installation dans le domaine autorisé.***  
Il faut concevoir des systèmes de contrôle capables d'alerter et d'arrêter une évolution anormale susceptible de solliciter des matériels ou l'organisation au delà des conditions souhaitables, choisies très en deçà des risques de défaillance.
3. ***Maîtrise des accidents à l'intérieur des hypothèses de conception.***  
Il s'agit ensuite de mettre en place les moyens de limiter à des niveaux acceptables les effets des accidents potentiels, même si cela demande la conception et l'installation de systèmes n'ayant aucun rôle dans le fonctionnement normal de l'installation. La mise en service de ces systèmes (dits de sauvegarde) doit être automatique et ne demander d'intervention humaine qu'après un temps suffisamment long pour que le diagnostic puisse être réalisé dans des conditions de calme suffisantes.
4. ***Prévention de la dégradation des conditions d'accident et limitation des effets.***  
Toujours dans la même perspective, il faut envisager le cas de défaillances multiples et, plus généralement, les moyens de faire face à des situations non traitées par les trois premiers niveaux de la défense en profondeur ou considérées comme faisant partie du risque résiduel. Il s'agit des procédures ultimes cherchant à limiter les rejets provoqués par une situation très grave, et plus globalement, du plan d'urgence interne.
5. ***Limitation des conséquences pour les populations en cas d'accidents graves.***  
La nécessité de mesures de protection des populations suppose l'échec des mesures précédentes. Il s'agit ici des Plans Particuliers d'Intervention (PPI) élaborés avec la sécurité civile, sous la responsabilité du Préfet.

---

<sup>4</sup> INSAG 10, Defence in depth in nuclear power plant safety – International Nuclear Safety Advisory Group – AIEA.

La notion de niveaux de défense successifs implique que ces niveaux soient aussi indépendants que possible. Il est donc très important de vérifier qu'un même événement ou une défaillance simple ou multiple n'est pas susceptible d'atteindre simultanément plusieurs niveaux (défaillance de mode commun).

### 7.1.2 L'approche déterministe

Les deux premiers niveaux de la défense en profondeur (prévention et maintien dans le domaine autorisé) sont destinés à éliminer, avec un haut niveau de confiance, le risque de défaillance d'une installation. Pourtant, malgré le soin apporté à ces deux niveaux et indépendamment de leur probabilité de défaillance, on postule toute une série d'incidents et d'accidents en affirmant des défaillances pouvant aller jusqu'à la rupture complète instantanée d'une canalisation ou d'une enceinte de stockage.

Voici qui définit l'approche déterministe de la sécurité, qui dans un souci particulier de protection des travailleurs et des populations voisines du site, trouve le besoin de dimensionner les systèmes de sauvegarde (3<sup>e</sup> niveau de défense : maîtriser les accidents), puis même les moyens d'intervention et de protection des populations (4<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> niveaux de défense), pour parer à toute éventualité, même la plus improbable.

L'approche déterministe consiste alors à recenser les événements pouvant conduire à un accident grave pour l'environnement pour définir des accidents enveloppes, c'est-à-dire majorants du point de vue de leurs conséquences. On utilise ensuite le concept de défense en profondeur pour maintenir les risques à des niveaux acceptables.

Chronologiquement dans le milieu du nucléaire, l'approche déterministe a ensuite été complétée par l'approche probabiliste.

### 7.1.3 L'approche probabiliste

L'étude probabiliste permet d'apprécier la probabilité des scénarios accidentels identifiés. Partant de la fréquence d'apparition des événements initiateurs (dérive d'un paramètre, brèche, corrosion, etc.), cette approche prend en compte la probabilité de succès ou d'échec des barrières de défense prévues (défense en profondeur) pour limiter les conséquences de ces événements initiateurs.

La probabilité de succès ou d'échec dépend du comportement des opérateurs et de la fiabilité des systèmes déduite de l'expérience acquise en exploitation. On calcule alors la probabilité que chaque scénario accidentel conduise aux conséquences redoutées calculées pour l'environnement.

Il s'agit d'une approche complémentaire qui permet de conforter les décisions (défense en profondeur) prises sur l'approche purement déterministe. Elle permet aussi par exemple de mettre en évidence certains points faibles de la conception (niveau 1 de la défense en profondeur) qui peuvent alors être corrigés.

Si des dispositifs permettant de limiter les conséquences de la plupart des accidents à des valeurs acceptables peuvent être trouvés (niveau 3 : les systèmes de sauvegarde), il n'en est pas de même pour certaines situations particulièrement graves. C'est le cas par exemple, de la rupture brutale des grands appareils sous pression. Compte tenu des difficultés de limitation des conséquences, l'effort est alors porté sur une amélioration accrue de la prévention de ces situations pour réduire sensiblement la probabilité d'occurrence.

A partir de l'expérience industrielle mondiale, il apparaît que pour les appareils sous pression, bien conçus, bien construits et bien surveillés, la probabilité de rupture est extrêmement faible. Dans l'industrie nucléaire [7], il est ainsi convenu de ne pas postuler ces accidents dans les études de base et donc de ne pas répondre au troisième niveau de la défense en profondeur, mais de compenser cette décision par un renforcement des marges de conception, de construction et d'exploitation et par une surveillance initiale et en service particulière.

Dans l'industrie nucléaire, l'approche probabiliste permet ainsi "d'exclure" du champ d'étude des scénarios d'accidents majeurs particulièrement graves mais très improbables à partir de l'instant où la probabilité calculée de l'événement est strictement inférieure à  $10^{-6}$  par an, par tranche et par fonction de sécurité (risque résiduel) [7], [8].

## 7.2 COMPARAISON DES DEUX APPROCHES DETERMINISTE ET PROBABILISTE DANS UN PROCESSUS COMPLET D'ANALYSE ET DE GESTION DES RISQUES

### 7.2.1 Etape d'identification des dangers et de hiérarchisation des risques

Méthode déterministe	Méthode probabiliste
<p><b>Identification des dangers</b></p> <p>Les deux méthodes commencent par l'analyse des potentiels de danger de l'installation : analyse des événements d'origine "externe" à l'installation, puis des événements d'origine interne par la mise en œuvre le plus souvent d'une méthode inductive, APR, HAZOP, etc.</p> <p><b>Hiérarchisation des risques</b></p> <p>Pour les deux approches, il s'agit ensuite de hiérarchiser les événements identifiés en les classant le plus souvent selon leur Gravité et Fréquence. La cotation se fait alors de manière qualitative en déterminant des classes de Gravité / Fréquence puis une criticité.</p> <p>A noter tout de même la diversité du vocabulaire employé par les partenaires lors de cette cotation qualitative (possible / probable, improbable / très improbable, grave / catastrophique). Cette source d'incertitude a peu d'influence sur la suite de l'analyse des risques mais peut engendrer des difficultés de communication importantes vis-à-vis du public, des décideurs, etc. Nécessité d'harmoniser ce discours.</p>	

### 7.2.2 Etape du choix des scénarios pour la phase de quantification

Méthode déterministe	Méthode probabiliste
<p><b>Choix des scénarios</b></p> <p>A la suite de la hiérarchisation qualitative des événements recensés, le choix des scénarios se fait seulement en retenant les événements aux conséquences les plus graves, indépendamment de leur probabilité d'occurrence.</p> <p>Le principe est de modéliser ensuite les accidents majeurs pouvant aboutir sur des scénarios d'accidents enveloppes, c'est-à-dire majorants du point de vue de leurs conséquences pour l'environnement.</p> <p><b>Lien entre analyses qualitative et quantitative</b></p> <p>Le lien entre les événements issus de l'APR ou de l'HAZOP et les scénarios modélisés n'est pas toujours facile à faire, d'autant plus lorsque des scénarios forfaitaires sont imposés tels que dans le guide de maîtrise de l'urbanisation en France.</p>	<p>En fonction des partenaires, le choix des scénarios se fait de deux façons :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• soit en excluant tout événement dont les conséquences sont mineures pour se concentrer sur les conséquences majeures, quelle que soit la probabilité de l'événement,</li> <li>• soit en excluant tout événement dont les conséquences sont mineures et/ou dont la probabilité est jugée trop faible (ex. <math>&lt; 10^{-9}/\text{an}</math>).</li> </ul> <p>Dans chaque cas, le principe est de conserver pour la quantification, un jeu de scénarios représentatif du niveau de risque de l'installation, c'est-à-dire des scénarios catastrophiques plus ou moins probables et des scénarios probables, plus ou moins graves.</p> <p>Le lien entre les événements issus de l'APR ou de l'HAZOP et les scénarios modélisés est immédiat ; l'analyse quantitative est une conséquence logique de l'analyse qualitative.</p>

### 7.2.3 Quantification des scénarios choisis : calcul des probabilités

Méthode déterministe	Méthode probabiliste
<p><b>Utilisation des bases de données</b></p> <p>Dans l'approche déterministe, seule est réalisée l'évaluation des conséquences du scénario envisagé en fonction des barrières de défense en place qui sont considérées soit présentes soit défaillantes.</p>	<p>Le calcul de probabilité des événements nécessite de disposer de bases de données fiables sur la fréquence des événements initiateurs.</p> <p>Cela nécessite d'organiser le retour d'expérience pour alimenter les bases de données. Or, le recueil d'informations n'est pas souvent adapté pour fournir une information précise et utilisable, en particulier dans les ICPE<sup>5</sup> où les équipements et matériaux varient sensiblement en 2 installations (ex. fuite de joint de bride en fonction qualité du joint).</p> <p>A contrario, dans l'industrie nucléaire, les matériaux et équipements sont plus comparables entre 2 installations distinctes.</p>

<sup>5</sup> ICPE : Installations Classées pour la Protection de l'Environnement

Méthode déterministe	Méthode probabiliste
<p><b>Fiabilité des probabilités dans les bases de données</b></p> <p><b>Prise en compte des barrières de défense</b></p> <p>Par construction (cf. § 7.1.2), cette approche ne permet de valoriser que les niveaux de défense 3 (systèmes de sauvegarde) et éventuellement 4. La robustesse des niveaux 1 et 2 (prévention et maintien dans le domaine autorisé par les mesures techniques et organisationnelles) n'est pas du tout évaluée.</p> <p>Pour la prise en compte des niveaux de défense 3 et 4, il manque dans l'approche déterministe des critères explicites sur la prise en compte ou non de ces barrières dans l'évaluation des conséquences.</p> <p><b>Temps de l'analyse</b></p> <p>L'évaluation déterministe des scénarios (seule évaluation des conséquences) est plus rapide à réaliser. Pour le même temps passé sur un site industriel, cette approche laisse plus de disponibilité pour conseiller l'exploitant, sur ses choix techniques et organisationnels par exemple.</p>	<p>A l'origine d'un événement initiateur, il y a souvent une erreur humaine directe ou indirecte (erreur d'exploitation, de maintenance ...). La quantification probabiliste de l'erreur humaine reste toujours une grande source d'incertitude dans les résultats.</p> <p>Par construction (retour d'expérience), la méthode probabiliste permet une bonne connaissance des événements (forte probabilité, faible gravité).</p> <p>A contrario, cette méthode est source d'incertitudes importantes pour les événements (forte gravité, faible ou très faible probabilité).</p> <p>Le calcul des probabilités permet de valoriser les barrières de défense en place selon le concept de la défense en profondeur, en quantifiant l'intérêt d'un équipement de sécurité, d'une redondance de la fonction de sécurité, etc.</p> <p>L'évaluation des probabilités exige beaucoup de temps et d'expertise technique de la part de l'évaluateur des risques. Comme toute étude qui requiert le jugement d'expert, elle est également source d'importantes d'incertitudes (cf. § 5.1).</p>

#### 7.2.4 Quantification des scénarios choisis : calcul des conséquences

Méthode déterministe	Méthode probabiliste
<p><b>Représentation des conséquences</b></p> <p>Les conséquences déterministes sont seulement calculées en termes de distances d'effets létaux et irréversibles. Le seuil des effets létaux correspond à 1% de morts parmi les personnes exposées.</p> <p>Il pourrait être aussi judicieux de calculer un potentiel de morts et de blessures irréversibles par scénario, chiffres beaucoup plus évocateurs pour un décideur de risque qu'une distance d'effet.</p>	<p>Les conséquences probabilistes sont présentées de deux manières :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• risque individuel : distance d'effet maximale à laquelle un individu est exposé à une probabilité de mort de <math>10^{-5}</math> /an, <math>10^{-6}</math> /an ...</li> <li>• risque sociétal : nombre d'individus exposés à une probabilité de mort de <math>10^{-5}</math> /an, <math>10^{-6}</math> /an ...</li> </ul>

Méthode déterministe	Méthode probabiliste
<p><b>Variabilité des résultats</b></p> <p>Lors du calcul des conséquences d'un scénario, la variabilité dans les résultats peut être souvent importante (cf. § 5.2 et 6), mais elle s'explique aussi facilement et rapidement (hypothèses sur le scénario ou connaissance du phénomène ...)</p>	<p>Le calcul des zones de risque individuel et sociétal diminue sensiblement la variabilité liée au calcul des conséquences seules.</p> <p>En effet, le poids dans le risque global du site des scénarios (fortes conséquences, faible probabilité) est "nivelé" par des scénarios (conséquences moindres, probabilité non négligeable).</p>

### 7.2.5 Critères d'acceptabilité du risque majeur présenté par le site

Méthode déterministe	Méthode probabiliste
<p><b>Critères d'acceptabilité des risques</b></p> <p>Il est très difficile de fixer des critères explicites d'acceptabilité du risque autour des sites avec une approche déterministe. En effet, pour certains scénarios particulièrement graves, il est difficile d'imaginer des dispositifs permettant de limiter les conséquences à un niveau acceptable (niveau 3 : système de sauvegarde). L'effort est alors porté sur l'amélioration de la prévention de ces situations pour permettre d' "exclure" lesdits scénarios (cf. § 7.1.3).</p> <p>Dans l'approche déterministe, pour ces cas pas si rares, les critères d'acceptation du risque sont alors implicites : conformité réglementaire, jugement d'expert, autorisation DRIRE...</p> <p><b>Communication externe sur le risque</b></p> <p>Il est très difficile de communiquer auprès du public avec des critères implicites.</p> <p><b>Politique de gestion des risques</b></p> <p>Aucune des deux approches n'est parfaitement adaptée à elle seule pour baser une politique globale de gestion des risques. En effet, au sein de la société civile, des exemples récents ont montré que l'on n'accepte pas le risque d'une installation sur des critères seulement techniques.</p> <p>La notion de risque est toujours perçue de façon négative. Le risque subi ne peut être accepté par un tiers (public, administration, association...) qu'à partir du moment où il présente des contreparties, des bénéfices suffisants en échange. Il est donc nécessaire pour un décideur de posséder une analyse multicritères des risques (vulnérabilité de l'environnement, intérêt économique, etc.) pour pouvoir bien établir sa décision.</p> <p>A titre d'exemple, l'approche probabiliste s'applique bien en France dans le cas du TMD<sup>6</sup>. Elle permet alors la comparaison de plusieurs itinéraires entre eux pour aller d'un point A à un point B, et de choisir ensuite le moins risqué (risque sociétal). L'approche probabiliste facilite dans ce cas la prise de décision, en proposant un critère clair de choix du risque subi parmi plusieurs alternatives possibles.</p>	<p>Il est beaucoup plus facile d'établir explicitement des critères d'acceptabilité du risque avec une approche probabiliste (risque sociétal et individuel) : <u>exemple</u> : risque d'accident majeur sur le site &lt; 10<sup>-6</sup> /an.</p> <p>L'approche probabiliste peut permettre d'établir des critères nationaux de gestion globale des risques en comparant par exemple les risques nucléaire, infrastructures de transport et I.C.P.E.</p> <p>Il peut aussi être difficile de communiquer sur des critères explicites : quel est le risque acceptable ?</p>

<sup>6</sup> TMD : Transport de Matières Dangereuses.

## 7.2.6 Etape de la gestion des risques : maîtrise de l'urbanisation, PPI <sup>7</sup>, information du public

Méthode déterministe	Méthode probabiliste
<p>Une certitude : pour toutes les activités industrielles, la probabilité d'incident ou d'accident ne peut pas être égale à zéro, quelle que soit l'importance des dispositions prises.</p> <p>La règle retenue pour la mise en place des dispositions ayant pour but d'éviter les incidents et accidents ou de limiter leurs conséquences est la suivante : plus les conséquences d'un accident sont graves pour l'environnement, plus sa probabilité doit être rendue faible.</p> <p><b>Réalité de la gestion des risques</b></p> <p>Les distances d'effets majorantes (notamment pour les scénarios de rejet toxique) calculées, sont souvent très grandes et peu compatibles avec l'urbanisation actuelle autour des sites existants.</p> <p>Les zones de concertation pour la M.U. <sup>8</sup> sont alors négociées implicitement entre DRIRE, tiers expert et exploitant en l'absence de critères explicites (prise en compte de dispositif de sécurité, hypothèse de modélisation, etc.)</p> <p><b>Prise en compte des risques d'effets dominos</b></p> <p>La prise en compte du risque d'effets dominos n'est pas évidente dans une approche déterministe de la maîtrise de l'urbanisation.</p> <p><b>Information sur la maîtrise réelle des risques</b></p> <p>L'approche déterministe est très pauvre quant à l'information sur le système utilisée dans l'analyse (on ne regarde pas du tout les niveaux 1 et 2 de défense, ni technique ni organisationnel, etc.).</p> <p>Elle dessert en fait l'analyse réelle de la maîtrise des risques sur un site donné.</p>	<p>Les courbes d'isorisques (risque individuel) calculées par l'approche probabiliste sont plus compatibles avec l'urbanisation autour des sites existants.</p> <p>Il est plus facile d'établir des critères explicites de maîtrise de l'urbanisation sur la base des courbes isorisques et de s'y tenir. En effet, l'approche probabiliste permet dans la négociation industriel / DRIRE de proposer des mesures de sécurité compensatoires (selon la défense en profondeur) et de quantifier le gain en terme de réduction du risque.</p> <p>La prise en compte du risque d'effets dominos est facilitée dans une approche probabiliste, puisque les conséquences sont contrebalancées par la faible probabilité de l'événement.</p> <p>L'approche probabiliste est beaucoup plus riche quant à l'information sur la maîtrise des risques.</p> <p>Par contre, cette approche nécessite d'être mieux cadrée voire améliorée, pour être utilisée dans une politique de gestion des risques (comme la M.U.) communicable auprès du public.</p>

**Nota :**

A titre de remarque, pour ce qui concerne la gestion des risques, et notamment la maîtrise de l'urbanisation, il existe également des démarches forfaitaires d'évaluation des risques.

Les scénarios types d'accidents à considérer sont déterminés d'avance quel que soit le type d'installation concerné, et l'évaluation de leurs conséquences se fait simplement sur la base d'abaques ou de formules simplifiées.

<sup>7</sup> PPI : Plan Particulier d'Intervention (5<sup>e</sup> niveau de la défense en profondeur)

<sup>8</sup> M.U. : Maîtrise de l'Urbanisation

Cette démarche présente un avantage très clair par rapport aux deux autres, celui d'assurer une cohérence spatiale parfaite dans la gestion de tous les établissements classés du territoire, en faisant fi des incertitudes liées à l'une ou l'autre des approches présentées dans ce rapport.

Malgré ces avantages en termes de gestion, ce type d'approche appauvrit beaucoup la phase d'évaluation des risques et surtout l'intérêt d'une réflexion sur l'impact des barrières de sécurité sur la maîtrise des risques.

Dans tous les cas, quelle que soit la méthode choisie, la gestion des risques devrait se baser sur une évaluation multicritères intégrant l'évaluation des risques et aussi d'autres aspects (économiques, culturels, sociaux...). L'évaluation multicritères devrait s'accompagner de l'analyse de plusieurs alternatives de gestion, discutées avec les parties prenantes.

## **7.3 AVIS DE L'INERIS**

### **7.3.1 Approche probabiliste / approche déterministe**

En donnant l'occasion à plusieurs organismes européens de comparer leurs méthodes d'analyses des risques respectives, le projet ASSURANCE a permis pour ce qui concerne l'INERIS, d'éclaircir certaines zones d'ombres sur l'intérêt des approches probabilistes puis de se forger une opinion quant à la méthode la mieux adaptée pour une politique transparente de gestion des risques.

La méthode probabiliste complète est très intéressante pour l'industriel qui a les moyens financiers de la faire réaliser. Si elle est associée à une démarche coût / bénéfice, cela permet de quantifier le gain de sécurité apporté par tel dispositif ou mesure de sécurité, et donc de constituer une aide à la décision précieuse pour faciliter les investissements sécurité et l'allocation des ressources humaines et financières.

Toutefois, cette approche est entachée d'incertitudes, encore plus que dans l'approche déterministe, puisque l'on multiplie l'incertitude liée à la probabilité à celle liée aux distances d'effets des scénarios. Par conséquent, elle demeure intéressante en relatif tant qu'il s'agit de hiérarchiser différents investissements entre eux, ou de choisir entre plusieurs alternatives possibles comme dans le cas du transport de matières dangereuses.

Dans le cadre d'une démarche de gestion des risques autour des établissements classés, aucune des deux approches ni probabiliste ni déterministe n'est parfaitement adaptée pour baser une politique cohérente de gestion. En effet, au sein de la société civile, des exemples récents ont montré que l'on n'accepte pas le risque d'une installation sur des critères seulement techniques. Le risque ne se résume pas à un chiffre ( $10^{-6}$  par exemple), mais il est nécessaire pour un décideur d'intégrer d'autres paramètres comme la vulnérabilité de l'environnement, l'intérêt économique local ou national, etc.

L'analyse probabiliste des risques reste donc difficile à appréhender ou à interpréter pour des décideurs, en l'absence de critères explicites d'acceptabilité.

De même, la maîtrise de l'urbanisation fondée sur une méthode purement déterministe n'est pas complètement réaliste puisqu'elle est construite sur le postulat « risque d'accident zéro à l'extérieur du site ». En pratique, l'acceptabilité du risque est souvent réalisée sur des critères implicites à chacun des acteurs de la négociation, au niveau local. Il en ressort à l'expérience, une importante variabilité spatiale des distances retenues, pour des sites comparables dans des départements différents.

### 7.3.2 Approche par les barrières de défense

Le concept de la défense en profondeur est le principe même de la sécurité, dans les installations nucléaires ou industrielles. Ce concept est le même dans tous les pays européens, que leur approche de l'analyse des risques soit probabiliste ou déterministe.

Pour aller plus loin, les deux approches sont simplement complémentaires. En effet, la démarche déterministe est essentiellement utilisée en conception des installations, lorsqu'il s'agit de prévoir et mettre en place les barrières de défense de l'installation (cf. § 7.1.2). Une fois les barrières de défense en place, l'approche probabiliste complète sert à évaluer la probabilité de défaillance de ces barrières, puis le risque résiduel de l'installation, en statuant finalement sur l'acceptabilité "technique" de ce risque.

Plusieurs pays européens s'orientent peu à peu vers une méthode alternative d'analyse des risques d'une installation, semi-probabiliste et axée sur les barrières de défense. C'est le cas de la Grande-Bretagne qui développe la méthode TRAM [11], [12], et des Pays-bas qui développe la méthode AVRIM2 [11], [13].

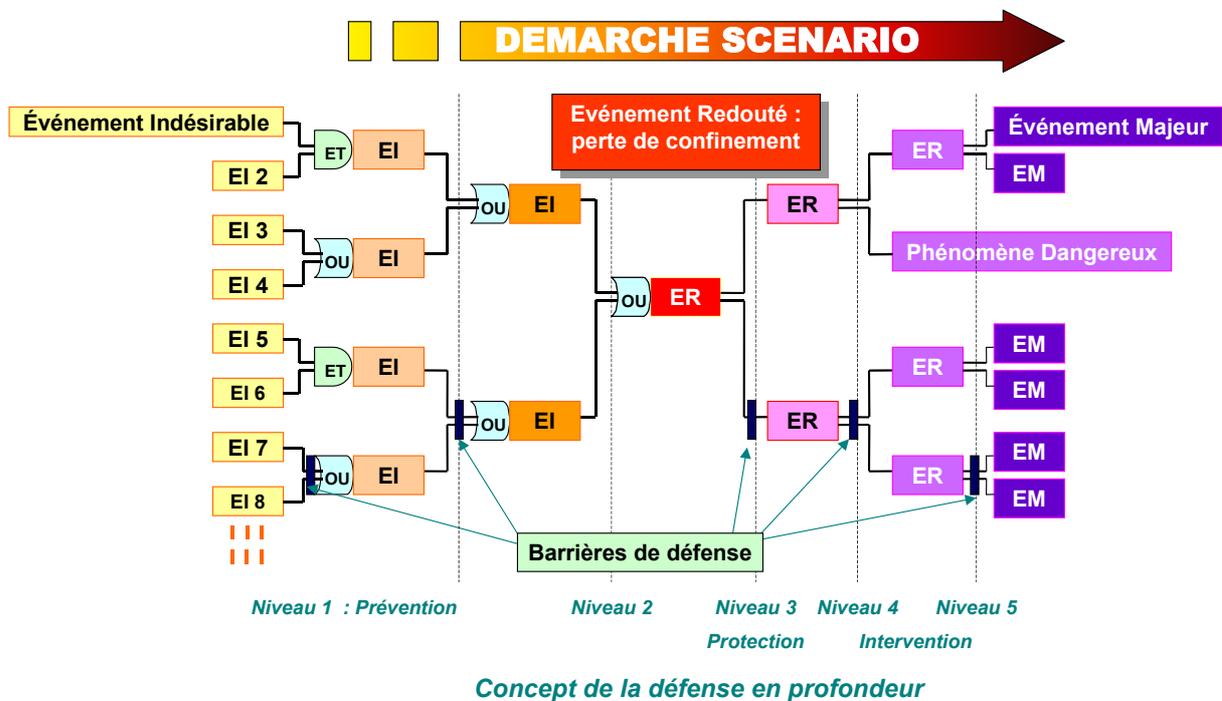


Figure 14 : démarche scénario "nœud papillon" :  
séquence de développement d'un accident majeur [14], [15]

En s'inspirant de la complémentarité des deux approches, les méthodes anglaise et néerlandaise consistent d'abord à identifier les scénarios d'accidents majeurs d'une installation puis d'en évaluer les conséquences de manière déterministe.

En fonction de la gravité des conséquences, le principe est ensuite d'évaluer la "robustesse" des barrières de défense en place (selon le concept de défense en profondeur) en termes de probabilité de défaillance.

Cette approche est dite semi-quantitative, dans le sens où le calcul des probabilités de défaillance et des conséquences qui en découleraient peuvent être classés dans des catégories, dont les critères sont exposés à l'exploitant.

Le risque acceptable est défini dans une matrice où en fonction de la classe de conséquence de l'événement, il est exigé une classe maximale de probabilité de défaillance, **charge à l'exploitant de démontrer ensuite que son système de défense en place par scénario** (prévention, protection et intervention) **remplit bien les conditions allouées à cette classe maximale.**

Rappelons que la notion de risque (lorsqu'il est subi) est toujours perçue de façon négative par le grand public. Une condition nécessaire de l'acceptabilité du risque majeur par le public, c'est notamment de posséder des systèmes de garanties suffisantes contre ce risque, et de connaître qui est responsable de ces garanties.

L'analyse de risques par les barrières de défense présente cet avantage qu'elle affiche clairement le risque encouru de manière déterministe, les barrières de défense sont ensuite présentées comme les systèmes de garanties nécessaires contre ce risque. L'industriel est alors identifié comme le seul responsable de ses barrières de défense, il doit ensuite convaincre l'administration et le public de faire confiance dans ses systèmes de garantie.

En cela, l'approche par les barrières de défense permet plus de transparence dans la présentation de la gestion des risques, et donc une communication mieux perçue en fin de compte par le public et les associations non techniques.

En conservant cette approche, l'intérêt d'études probabilistes complètes se ressent alors pour certains équipements de sécurité bien ciblés, en quantifiant le gain réel en sécurité de ces équipements, ce qui permet de les classer selon les catégories prédéfinies ou de les comparer les uns par rapport aux autres : types de vannes ou de capteurs, intérêt de la double enveloppe, du confinement avec rideau d'eau, etc.

De telles études génériques complètes permettraient d'alimenter la réflexion et de faciliter les décisions quant à l'état de l'art ou aux Meilleures Technologies Disponibles. Il est ensuite plus facile d'harmoniser les niveaux de sécurité au plan national, et de conseiller par exemple efficacement les PME /PMI qui ne peuvent pas s'offrir par elles-mêmes des études probabilistes complètes.

## 8. CONCLUSION

---

Le projet ASSURANCE fait suite avec une dizaine d'années de recul, à un autre projet européen intitulé BEMHA : Benchmark Exercise on Major Hazards Analysis. Comme lors du premier exercice de benchmark, l'objectif d'ASSURANCE était de faire une analyse comparée des méthodes d'analyse des risques et des approches sécurité à travers l'Europe. Pour cela, le projet d'une durée de trois ans (1998-2001) a réuni neuf organismes européens experts en analyse des risques, qui ont évalué les risques d'une installation chimique réelle prise en référence.

En tirant les leçons du premier benchmark, la différence notable avec le projet BEMHA concerne le découpage des différentes étapes du projet, prévu pour mieux cadrer le travail des experts, et ainsi permettre la comparaison des résultats intermédiaires qui interviennent dans l'évaluation finale du risque.

C'est ainsi qu'ont été successivement comparées les méthodes d'identification des dangers et de hiérarchisation des risques, de sélection des scénarios d'accidents à quantifier, d'évaluation des probabilités d'occurrence de ces scénarios puis de leurs conséquences.

S'agissant de la phase d'analyse qualitative des risques, tous les partenaires mettent en œuvre une méthode d'identification des dangers et de hiérarchisation des risques qui leur est propre, mais en même temps très semblable dans son déroulement. En effet, l'identification des dangers se fait sur la base d'une méthode inductive, et lorsque les événements indésirables sont recensés, chaque organisme les hiérarchise suivant une double cotation en gravité et en fréquence. Le but de cette cotation est toujours d'identifier les scénarios à traiter en priorité en termes de moyens de prévention et protection, puis de sélectionner le jeu de scénarios à retenir pour l'étape quantitative. Les scénarios les plus importants, ou susceptibles d'être enveloppes pour l'extérieur du site ont tous été identifiés par l'ensemble des partenaires.

S'agissant des classes de cotation utilisées, il apparaît que les critères retenus et le sens des termes employés pour définir chaque classe varie sensiblement d'un expert à l'autre. Les écarts sur les critères qualitatifs ne se répercutent pas dans la phase suivante d'évaluation des probabilités d'événements. Toutefois, cette incertitude peut engendrer des difficultés de communication importantes voire des incompréhensions vis-à-vis du public, des décideurs, etc. Le besoin d'harmoniser la terminologie employée dans un souci de transparence, se fait fortement ressentir.

Concernant l'évaluation quantitative des risques, l'exercice a révélé comme lors du premier projet BEHMA, une grande disparité des résultats obtenus par chaque expert. Y compris lors de l'évaluation du risque individuel et du risque sociétal de l'établissement (notions spécifiques de l'approche probabiliste), la variabilité des résultats reste encore très importante. Il paraît alors difficile de fonder sur cette approche une politique cohérente de gestion des risques et de maîtrise de l'urbanisation.

Les incertitudes liées aux résultats tant dans l'évaluation des probabilités que des conséquences des scénarios, se comprennent toutefois plutôt bien et se résument principalement en cinq points :

- **Le choix des scénarios à quantifier** est primordial. Il dépend entièrement du jugement d'expert. Pour le projet ASSURANCE, ce paramètre n'est toutefois pas pertinent, puisque tous les partenaires étaient d'accord sur les principaux scénarios majeurs à modéliser.
- L'incertitude ou l'ambiguïté dans la **définition même des scénarios** s'est révélé une source majeure de disparité, notamment pour les scénarios de ruptures de réservoirs. Dans le mécanisme du jugement d'expert, cette ambiguïté dans la définition des scénarios est souvent liée aux différentes causes identifiées d'occurrence du scénario. Compte tenu de l'importance de ces scénarios notamment dans la maîtrise de l'urbanisation, ce point montre la nécessité d'être très précis dans la définition d'un scénario d'accident.
- **Les modèles** utilisés dans l'évaluation des conséquences ne sont toujours qu'une simplification des phénomènes physiques étudiés. Le niveau d'incertitude dépend alors à la fois de la bonne connaissance du phénomène physique et du degré de complexité du logiciel employé pour le modéliser.
- La source d'incertitude la plus importante et récurrente concerne **le choix des hypothèses dans la modélisation des phénomènes**. Modéliser un scénario requiert toujours l'intervention du jugement d'expert quel que soit le modèle. Ainsi, l'expérience et la connaissance des phénomènes par l'expert sont déterminants pour définir les hypothèses les plus réalistes possibles dans les scénarios.
- Enfin, **le niveau global de prudence ou de conservatisme** propre à chaque analyste, amène chacun à formuler des hypothèses plus ou moins majorantes, en fonction toujours de son expérience et de sa connaissance des phénomènes.

En conclusion, l'incertitude globale liée aux résultats finaux d'une analyse des risques, se résume assez bien comme une fonction combinée :

1. de l'expérience de l'analyste des risques qui lui permet d'identifier l'ensemble des causes à l'origine des scénarios qu'il choisit de retenir,
2. de la connaissance des phénomènes par l'analyste et du degré de finesse du modèle employé qui permettent de définir les hypothèses les plus réalistes pour le scénario à modéliser, hypothèses en adéquation avec le niveau de complexité du modèle utilisé.

L'INERIS a ensuite voulu profiter de son expérience dans le projet ASSURANCE, pour proposer quelques points de comparaison entre les approches déterministe et probabiliste du risque. Il en ressort en substance que dans le cadre d'une démarche de gestion des risques autour des sites classés, aucune des deux approches n'est parfaitement adaptée pour baser une politique cohérente de gestion.

En effet, au sein de la société civile, des exemples récents ont montré que le risque acceptable ne peut pas se résumer à un chiffre purement technique, mais il est nécessaire pour un décideur d'intégrer d'autres paramètres comme la vulnérabilité de l'environnement, l'intérêt économique, etc. L'analyse probabiliste des risques reste donc difficile à interpréter pour des décideurs, en l'absence de critères explicites d'acceptabilité.

De même, la maîtrise de l'urbanisation fondée sur une méthode purement déterministe n'est pas complètement réaliste puisqu'elle est construite sur le postulat « risque d'accident zéro à l'extérieur du site ». En pratique, l'acceptabilité du risque est souvent réalisée sur des critères implicites à chacun des acteurs de la négociation, au niveau local. Il en ressort à l'expérience, une importante variabilité spatiale dans les distances d'isolement retenues.

Une solution alternative serait de s'appuyer sur le concept des barrières de défense et de la défense en profondeur, qui est le principe fondateur de la sécurité, dans les installations nucléaires ou industrielles.

Le principe consiste d'abord à identifier les scénarios d'accidents majeurs d'une installation puis d'en évaluer les conséquences de manière déterministe. En fonction de la gravité des conséquences, il s'agit ensuite d'évaluer la "robustesse" des barrières de défense en place (concept de défense en profondeur) selon une approche probabiliste complète qui permet d'évaluer la probabilité de défaillance des barrières, puis le risque résiduel de l'installation.

Cette approche est dite semi-quantitative, dans le sens où le calcul des probabilités de défaillance et des conséquences qui en découleraient sont classés dans des catégories, dont les critères sont exposés à l'exploitant.

De l'avis de l'INERIS, l'approche par barrières de défense permet plus de transparence dans la présentation de la gestion des risques, et donc une communication mieux perçue en fin de compte par le public et les associations non techniques. Plusieurs pays européens s'orientent d'ailleurs peu à peu vers ce type de méthode, tels que de la Grande-Bretagne (HSE) et les Pays-bas (Ministère néerlandais du travail).

Le projet ASSURANCE est un réel succès et ouvre de nombreuses perspectives. Chacun des partenaires a en effet joué le jeu de la transparence, et fort logiquement a donc retiré beaucoup d'enseignements de cet exercice de benchmark. Chaque organisme a ainsi pu s'auto-évaluer et améliorer ses méthodes d'évaluation internes en profitant de l'expérience et du savoir particulier des autres partenaires.

A ce titre, l'INERIS propose d'organiser le même type d'exercice au plan national, par exemple entre trois ou quatre principaux tiers experts français. Un tel projet favoriserait l'échange mutuel des connaissances, échange qui est d'ailleurs vivement souhaité par le MEDD<sup>9</sup>. L'approche française de la sécurité en sortirait certainement enrichie.

L'INERIS souhaite également publier un article de fond dans une revue nationale, sur l'approche générale et les principaux résultats du projet ASSURANCE. Cela pourrait également contribuer à promouvoir l'échange d'informations avec les grands industriels privés présents sur le territoire français.

Au niveau européen, le projet ARAMIS (Accidental Risk Assessment Methodology for IndustrieS) vient de débiter en janvier 2002. Ce projet coordonné par l'INERIS, a pour objectif de développer une méthode harmonisée d'analyse des risques qui sache intégrer les points forts des méthodes de chaque partenaire européen. Les conclusions tirées du projet ASSURANCE seront certainement mises à profit dans un avenir proche, pour servir les objectifs très complémentaires de ce nouveau projet.

---

<sup>9</sup> MEDD : Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

## 9. GLOSSAIRE

---

**ASSURANCE** : ASSESSment of the Uncertainties in Risk Analysis of Chemical Establishments

**DICMA** : Université de Bologne, département de recherche sur les risques majeurs

**DNV** : Det Norske Veritas Limited – bureau d'études international

**HSE** : Health and Safety Executive, Major Hazards Assessment Unit – organisme de régulation britannique

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

**MEDD** : Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

**NCSR DEMOKRITOS** : Organisme de recherche grec, laboratoire de fiabilité des systèmes et de sécurité industrielle

**TNO** : The Netherlands Organisation, Department of Industrial Safety – organisme de recherche néerlandais

**VTT** : Organisme de recherche finlandais

## 10. REFERENCES

---

- [1] F.I. KHAN, S.A. ABBASI,  
Journal Loss Prevention - Process Industries, No. 12 (1999)
- [2] SECRETARIAT D'ETAT AUPRES DU MINISTRE CHARGE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA  
PREVENTION DES RISQUES TECHNOLOGIQUES ET NATURELS MAJEURS - DEPPR -  
SERVICE DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL  
Guide de Maîtrise de l'Urbanisation autour des sites industriels à haut risque -  
Octobre 1990
- [3] A. AMENDOLA, M. CHRISTOU, K. LAURIDSEN, F. MARKERT,  
ASSURANCE – Comparison of results of the qualitative analysis  
CONFIDENTIAL report – Avril 2002
- [4] A. AMENDOLA, M. CHRISTOU, M. FIORI, I. KOZINE, K. LAURIDSEN, F. MARKERT,  
ASSURANCE – Comparison of results of the quantitative analysis  
CONFIDENTIAL report – Avril 2002
- [5] THE NETHERLANDS ORGANISATION (TNO)  
Guidelines for the preparation of off-site safety reports (in Dutch)  
Report IPO A-73 - Interprovinciaal Overleg, The Hague april 1994
- [6] SERVICE DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL – MINISTÈRE DE L'AMÉNAGEMENT DU  
TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT  
Fiches techniques - Courbes de toxicité aiguë par inhalation - Juin 1998.
- [7] J. LIBMANN  
Eléments de sûreté nucléaire – Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire - 1996
- [8] EPN (EXPLOITATION DU PARC NUCLEAIRE)  
Mémento de sûreté nucléaire en exploitation – EDF – Edition 1994
- [9] D. HOURTOLOU  
ASSURANCE – Assessment of the Uncertainties in Risk ANalysis of Chemical  
Establishments – Qualitative and quantitative risk analyses – Final report  
Rapport INERIS-DRA-25472 – Janvier 2001.
- [10] D. HOURTOLOU  
ASSURANCE – Assessment of the Uncertainties in Risk ANalysis of Chemical  
Establishments – Cases study – Final report  
Rapport INERIS-DRA-25472 – Novembre 2000.
- [11] S. BOUCHET  
Analyse des risques et prévention des accidents majeurs – Présentation des méthodes  
d'inspection TRAM, NIVRIM et AVRIM 2  
Rapport intermédiaire INERIS-DRA07 – Juin 2001.

- [12] T. MADDISON  
Technical Risk Audit Method (TRAM). Development and application to the auditing of major hazard sites.  
Health and Safety Executive – 2000.
- [13] MINISTERE DES AFFAIRES SOCIALES ET DE L'EMPLOI NEERLANDAIS  
AVRIM2 – Une méthodologie pour les entreprises devant réaliser le rapport de sécurité dans le cadre de la réglementation BRZO 1999.  
Rapport final n°135 – Novembre 1999.
- [14] EMMANUEL BERNUCHON  
Improvement of the hazard identification and assessment in application of the Seveso II Directive - ESREL 2001, Turin, septembre 2001.
- [15] SANDRINE DESCOURRIERE  
Improvement of the hazard identification and assessment in application of the Seveso II Directive - ESREL 2002, Lyon, mars 2002.

## 11. LISTE DES ANNEXES

---

---

<b>Repère</b>	<b>Désignation précise</b>	<b>Nb. de pages</b>
A	Liste des participants	3
B	Liste des publications issues du projet	2
C	Définitions des notions de « risque individuel » et de « risque sociétal »	3

**ANNEXE A :**  
**LISTE DES PARTICIPANTS**

## Liste et coordonnées des participants au projet ASSURANCE

### **Risø National Laboratory, SYS-110**

Dr. Kurt Lauridsen  
P.O. Box 49  
DK-4000 Roskilde  
Denmark  
Telephone: +45 4677 5124  
Fax: +45 4677 5199  
E-mail: kurt.lauridsen@risoe.dk

Dr. Frank Markert  
P.O. Box 49  
DK-4000 Roskilde  
Denmark  
Telephone: +45 4677 5128  
Fax: +45 4677 5199  
E-mail: frank.markert@risoe.dk

### **EC-JRC Ispra**

Dr. Aniello Amendola  
International Institute for Applied Systems Analysis  
A-2361 Laxenburg,  
Austria  
Telephone: +43 2236 807 209  
Fax: +43 2236 73147  
E-mail: aniello.amendola@jrc.it or amendola@iiasa.ac.at

Dr. Michalis Christou  
ISIS, Major Accident Hazards Bureau  
I-21020 Ispra (Va)  
Italy  
Telephone: +39 0332 789 516  
Fax: +39 0332 789 007  
E-mail: michalis.christou@jrc.it

### **Det Norske Veritas Limited**

Dr. Phillip Crossthwaite  
Highbank House, Exchange Street,  
Stockport, SK3 0ET Cheshire  
United Kingdom  
Telephone: +44 161 477 3818  
Fax: +44 161 477 3819  
E-mail: phil.crossthwaite@dnv.com

**HSE, Major Hazards Assessment Unit**

Mr. David A. Carter  
St Anne's House, University Road  
Bootle, Merseyside L20 3RA  
United Kingdom  
Telephone: +44 151 951 4570  
Fax: +44 151 951 3824  
E-mail: Dave.HID.Carter@hse.gsi.gov.uk

Dr. Susan Coulter  
Broad Lane  
Sheffield  
United Kingdom  
Telephone: +44 114 289 2912  
Fax: +44 114 289 2444  
E-mail: susan.coulter@hsl.gov.uk

Mr. Ian L. Hirst  
St Anne's House, University Road  
Bootle, Merseyside L20 3RA  
United Kingdom  
Telephone: +44 151 951 3526  
Fax: +44 151 951 3824  
E-mail: ian.hirst@hse.gsi.gov.uk

**INERIS**

Mr. David Hourtolou  
B.P.2, Parc Technologique ALATA  
F-60550 Verneuil en Halatte  
France  
Telephone: +33 344 55 6206  
Fax: +33 344 55 6295  
E-mail: david.hourtolou@ineris.fr

**NCSR DEMOKRITOS Systems Safety and Risk Assessment**

Dr. Ioannis A. Papazoglou  
P.O. Box 60228, Aghia Paraskevi  
GR-153 10 Attika  
Greece  
Telephone: +30 1 654 8415  
Fax: +30 1 654 0926 or +30 1 653 3431  
E-mail: yannisp@ipta.demokritos.gr

Dr. Zoe Nivolianitou  
P.O. Box 60228, Aghia Paraskevi  
GR-153 10 Attika  
Greece  
Telephone: +30 1 650 3744  
Fax: +30 1 653 3431  
E-mail: zoe@ipta.demokritos.gr

Dr. Olga Aneziris  
P.O. Box 60228, Aghia Paraskevi  
GR-153 10 Attika  
Greece  
Telephone: +30 1 650 3703  
Fax: +30 1 653 3431  
E-mail: olga@ipta.demokritos.gr

**TNO, Dept. of Industrial Safety**

Ir. Menso Molag  
P.O. Box 342, Laan van Westenenk 501  
NL-7300 AH Apeldoorn  
The Netherlands  
Telephone: +31 55 549 3824  
Fax: +31 55 549 3390  
E-mail: menso.molag@MEP.TNO.NL

**Università di Bologna, DICMA**

Prof. Gigliola Spadoni  
via le Risorgimento 2  
I-40136 Bologna  
Italy  
Telephone: +39 051 209 3146  
Fax: +39 051 581 200  
E-mail: gigliola.spadoni@mail.ing.unibo.it

**VTT Automation**

Dr. Jyrki Tiihonen  
P.O. Box 1306, Tekniikankatu 1  
FIN-33101 Tampere  
Finland  
Telephone: +358 3 316 3231  
Fax: +358 3 316 3282  
E-mail: Jyrki.Tiihonen@vtt.fi

Mr. Yngve Malmén  
P.O. Box 1306, Tekniikankatu 1  
FIN-33101 Tampere  
Finland  
Telephone: +358 3 316 3276  
Fax: +358 3 316 3282  
E-mail: yngve.malmen@vtt.fi

**ANNEXE B :**  
**LISTE DES PUBLICATIONS ISSUES DU PROJET**

## Liste des publications issues du projet ASSURANCE

**Markert, F.; Nivolianitou, Z.; Christou, M.,**

ASSURANCE - A benchmark exercise on risk analysis of chemical installations. In: New research and its application in industry. 2. Internet conference on process safety, 20-24 Mar 2000. (2000) 6 p. (<http://safetynet.de/activities/conference2/index.htm>)

**Amendola, A.; Lauridsen, K.,**

The ASSURANCE project. Presentation in the Risk Assessment Society under the Danish Engineering Society. Copenhagen 11 May 2000.

**Lauridsen, K.,**

Presentation "The ASSURANCE project". EC Workshop on Natural and Technological Hazards Research in Europe - Contribution to MEDIN". Brussels, 15-16 November 2000.

**Christou, M.; Lauridsen, K.; Amendola, A.; Markert, F.; Kozine, I.O.,**

ASSURANCE: Assessment of uncertainties in risk analysis of chemical establishments. In: Proceedings. Vol. 1. 5. International conference on probabilistic safety assessment and management (PSAM 5), Osaka (JP), 27 Nov - 1 Dec 2000. Kondo, S.; Furuta, K. (eds.), (Universal Academy press, Tokyo, 2000) (Frontiers Science Series) p. 369-374

**F. Markert, M. Christou, D. Hourtolou, and Z. Nivolianitou,**

A benchmark exercise on risk analysis of chemical installations. Paper presented at the ESMG – symposium , Nürnberg March 2001.

**F. Markert, I. Kozine, K. Lauridsen, A. Amendola, M. Christou,**

Sources and magnitudes of uncertainties in risk analysis of chemical establishments. First insights from an European benchmark study. In: Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries. Proceedings of the 10th International Symposium, 19-20 June 2001, Stockholm, Sweden. H.J. Pasman et al. (eds.), (Elsevier, 2001) p. 371-384.

**Lauridsen, K.; Kozine, I.O.; Amendola, A.; Fiori, M.,**

EU advances in identifying sources of uncertainty in risk analyses. In: Modelling and analysis of safety, risk and quality in complex systems. International scientific school, Saint-Petersburg (RU), 18-22 Jun 2001. (Institute of Problems of Mechanical Engineering of Russian Academy of Sciences (IMPE RAS), St. Petersburg, 2001) p. 159-163

**Lauridsen, K.; Christou, M.; Amendola, A.; Markert, F.; Kozine, I.; Fiori, M.,**

Assessing the uncertainties in the process of risk analysis of chemical establishments: Part 1. In: Safety and reliability. Towards a safer world. Proceedings. Vol. 1. ESREL 2001, Torino (IT), 16-20 Sep 2001. Zio, E.; Demichela, M.; Piccinini, N. (eds.), (Politecnico di Torino, Torino, 2001) p. 592-598

**Lauridsen, K.; Christou, M.; Amendola, A.; Markert, F.; Kozine, I.; Fiori, M.,**  
 Assessing the uncertainties in the process of risk analysis of chemical establishments: Part 2. In: Safety and reliability. Towards a safer world. Proceedings. Vol. 1. ESREL 2001, Torino (IT), 16-20 Sep 2001. Zio, E.; Demichela, M.; Piccinini, N. (eds.), (Politecnico di Torino, Torino, 2001) p. 599-606

**Christou, M.; Nivolianitou, Z.; Lauridsen, K.; Amendola, A.; Markert, F.; Crossthwaite, P.; Carter, D.; Hourtolou, D.; Molag, M.; Spadoni, G.; Tiihonen, J.; Kozine, I.; Aneziris, A.; Gadd, S.; Papazoglou, I.A.,**  
 Implications of the uncertainties present in risk assessment of chemical installations to risk-informed decision making: The case of land-use planning. In: Safety and reliability. Towards a safer world. Proceedings. Vol. 3. ESREL 2001, Torino (IT), 16-20 Sep 2001. Zio, E.; Demichela, M.; Piccinini, N. (eds.), (Politecnico di Torino, Torino, 2001) p. 1747-1754

**Lauridsen, K.; Amendola, A.; Christou, M.; Markert, F.; Kozine, I.,**  
 Uncertainties in risk analysis of chemical establishments - the ASSURANCE project. In: Progress in European research on major accident hazards. Seminar, Antwerp (BE), 10 Oct 2001. (Federal Ministry of Employment and Labour, Antwerp, 2001) 10 p.

**Lauridsen, K.,**  
 Uncertainties in risk analysis of chemical establishments. Summary prepared for the meeting on "Major technological risks - The new European local policies" arranged by Les Eco Maires Association. Fos-sur-Mer, France, 21-22 February 2002.

**ANNEXE C :**  
**DEFINITIONS DES NOTIONS DE « RISQUE INDIVIDUEL »**  
**ET DE « RISQUE SOCIÉTAL »**

## Risque individuel et Risque sociétal

Ces deux notions fondamentales dans une évaluation quantitative des risques sont particulièrement bien définies dans les guides [1] [2], élaborés par le Committee for the Prevention of Disasters pour le RIVM (Ministère de la Santé et de l'Environnement néerlandais). Cet ensemble de guides forme le "Guide pour l'Analyse Quantitative des Risques aux Pays-Bas", qui est à la disposition de l'analyste afin de l'aider notamment dans la phase de quantification des risques.

Dans une évaluation quantitative des risques, après avoir évalué les probabilités d'occurrence des événements redoutés et leurs conséquences, on évalue les dommages causés sur les personnes grâce aux fonctions de Probit.

Le travail suivant consiste à mesurer le risque à l'aide des deux métriques de représentation que sont le **risque individuel** et le **risque sociétal**.

**Le risque individuel est la probabilité qu'une personne exposée de façon permanente au danger soit tuée.** On peut le quantifier à partir des fonctions de Probit <sup>1</sup> et on le représente sur une carte par des courbes d'isorisque individuel.

**Le risque sociétal est la probabilité que lors d'un accident plus d'un certain nombre de personnes soit tuées.** On le déduit directement des fonctions de Probit et on le représente à l'aide de courbes dites F/N.

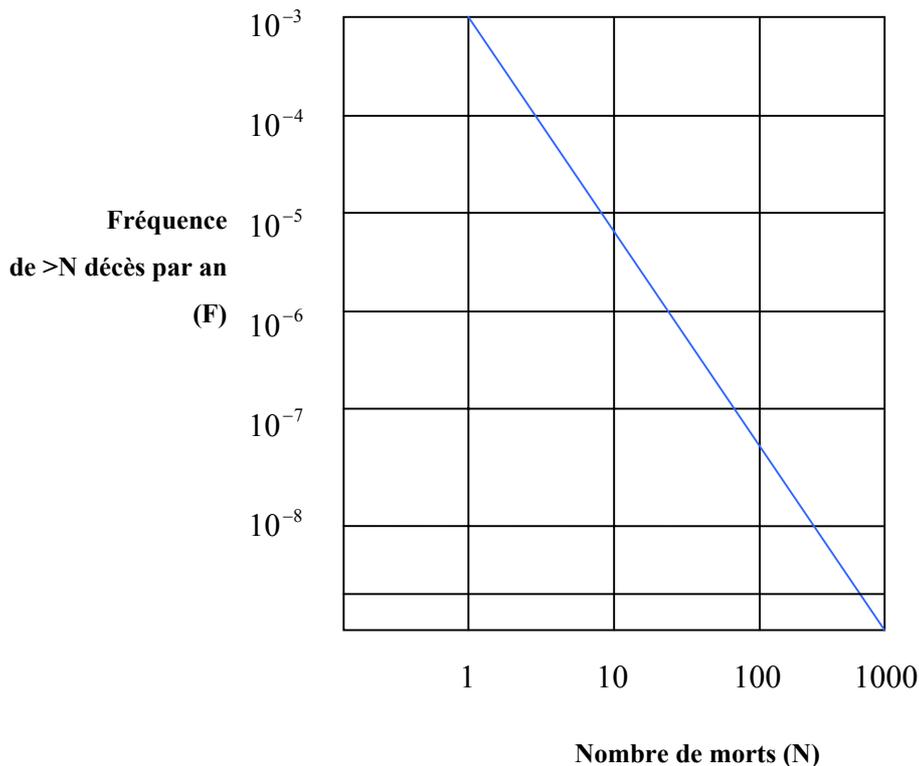


Figure 1 : Le risque sociétal

<sup>1</sup> Si Pr est le probit, la probabilité individuelle de mort est  $P = 0.5 * [1 + erf(Pr - 5 / \sqrt{2})]$  avec  $erf(x) = (2 / \sqrt{\pi}) * \int Exp(-t^2).dt$ .

Le risque sociétal peut également être représenté sur une carte par des zones de risque sociétal.

Pour illustrer la différence entre risque individuel et risque sociétal, considérons un supermarché. Le risque individuel y est faible puisque les gens y restent peu de temps en moyenne. En revanche, un grand nombre de personnes étant présentes dans l'établissement à chaque instant, le risque sociétal y est élevé. Prendre en compte le risque sociétal permet de refléter le fait que même si le risque individuel est faible, le risque sociétal peut être élevé du fait de la forte densité de population dans la zone exposée au danger.

Les décisions relatives aux risques sont prises après comparaison des données d'entrée du problème (mesure du risque) et de critères d'acceptabilité définis par les pouvoirs publics à titre indicatif, dans un souci de cohérence et d'équité. Un danger est jugé inacceptable si le risque individuel ou le risque sociétal dépasse le **Risque Maximum Tolérable**. En dessous, le principe **ALARA** (As Low As Reasonably Achievable) s'applique pleinement ; l'industriel se doit de porter le risque " aussi bas que raisonnablement réalisable ".

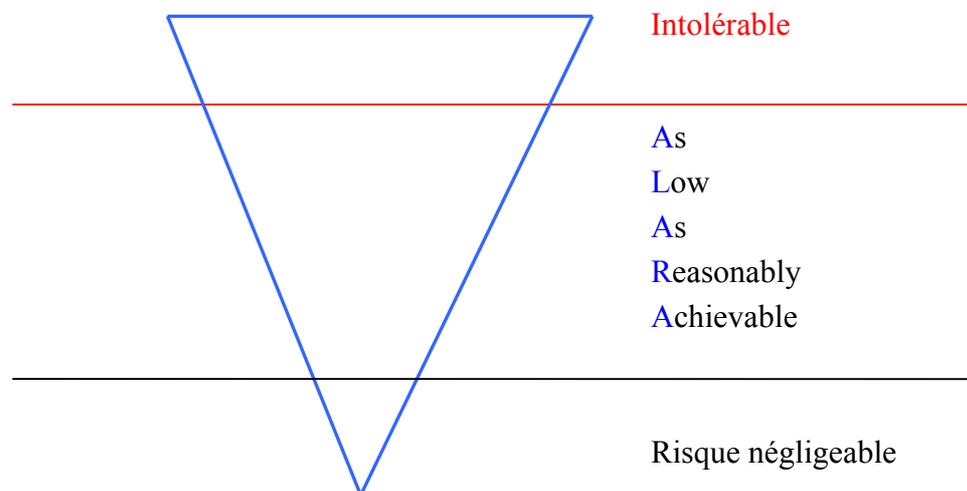


Figure 2 : Les critères d'acceptabilité

Dans le cas du risque maximum tolérable individuel, ce sont des probabilités de mort annuelle qui sont fixées ( $10^{-5}$  pour les installations existantes et  $10^{-6}$  pour les installations nouvelles).

Concernant le risque sociétal, le seuil est donné par des fonctions de type hyperbolique dans le plan (F,N) afin de traduire l'aversion qu'éprouve la société à l'égard des accidents rares mais dramatiques (le seuil est de  $10^{-3} / N^2$  pour tous les types d'installation). Lorsqu'un risque est jugé inacceptable, des mesures de réduction sont impérativement adoptées.

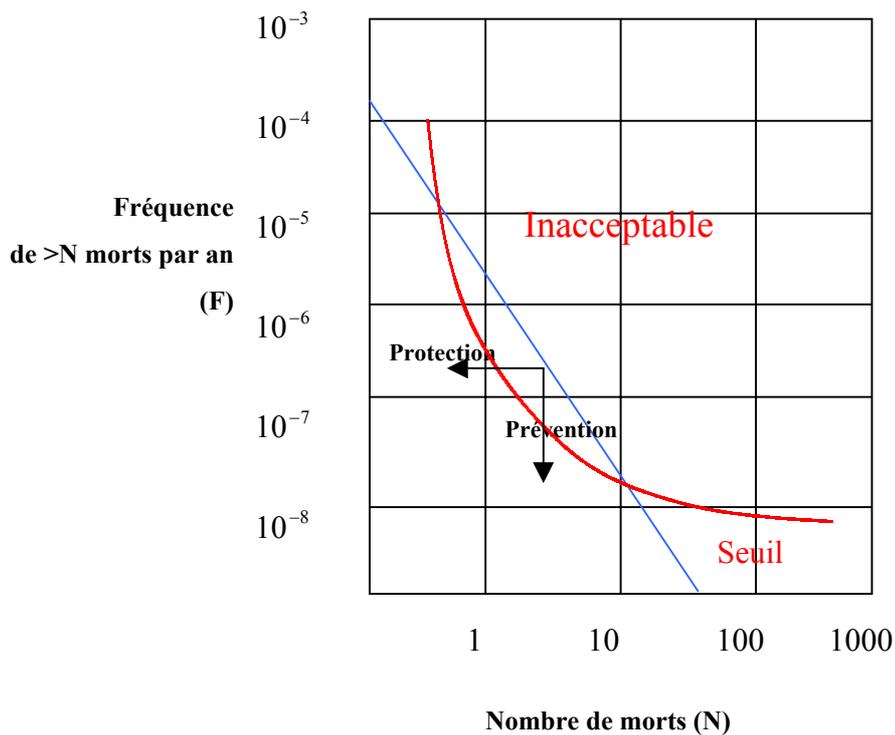


Figure 3 : La réduction du risque sociétal

## Références bibliographiques

- [1] COMMITTEE FOR THE PREVENTION OF DISASTERS  
Red book - Methods for Determining and Processing Probabilities,  
Ed. Sdu Uitgevers, Den Haag, Pays-Bas, 1997.
- [2] COMMITTEE FOR THE PREVENTION OF DISASTERS  
Purple book - Guidelines for Quantitative Risk Assessment,  
Ed. Sdu Uitgevers, Den Haag, Pays-Bas, 1999.
- [3] I. ARPIN  
De l'acceptabilité économique des dispositifs de sécurité mis en place sur les  
Installations Classées pour la Protection de l'Environnement – Une démarche  
normative et prescriptive.  
Mémoire de DEA – ENS de Cachan / ENGREF - 2000.