



PROJET GORO NICKEL

Demande d'Autorisation d'Exploiter des Installations Classées

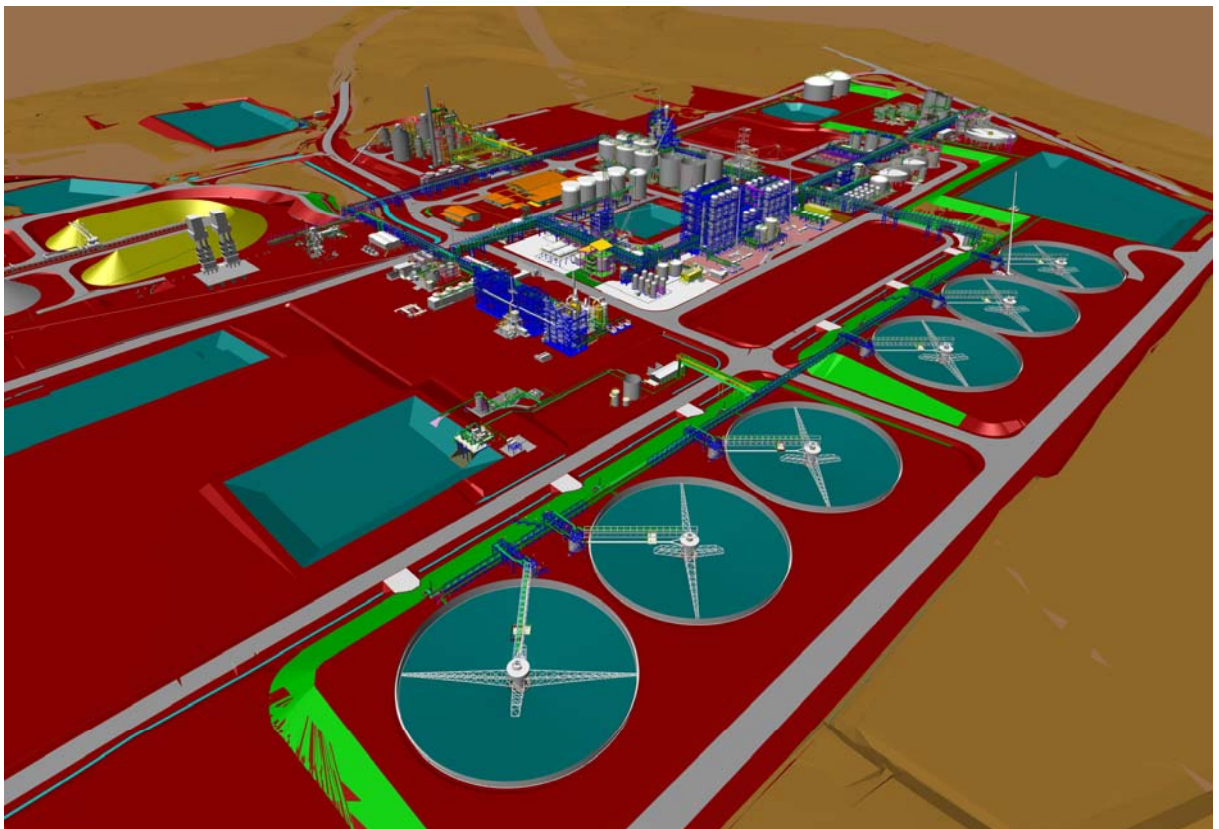


VOLUME IV – Section A METHODOLOGIE ET SYNTHÈSE DES ETUDES DE DANGERS

Mai 2007

Chapitre 1

Méthodologies et guide de lecture des études de dangers





SOMMAIRE

1	GLOSSAIRE	5
2	INTRODUCTION	7
2.1	Cadre réglementaire	7
2.1.1	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement	7
2.1.2	Arrêté du 10 mai 2000 (Directive SEVESO II)	7
2.1.3	Autres références relatives aux études de dangers	7
2.2	Objectifs et méthodologie de l'étude de dangers	8
2.3	Périmètre de l'étude - Exclusions	9
3	IDENTIFICATION DES POTENTIELS DE DANGERS	11
3.1	Définition du potentiel de dangers	11
3.1.1	Danger	11
3.1.2	Potentiel de dangers	11
3.1.3	Risque	11
3.1.4	Conclusion	12
3.2	Méthodologie générale	12
3.3	Identification des risques liés aux produits	13
3.3.1	Caractéristiques physico-chimiques	13
3.3.2	Synthèse des dangers liés aux produits	14
3.3.3	Tableau d'incompatibilité des produits	15
3.3.4	Présentation des quantités maximales de produits susceptibles d'être présentes	15
3.4	Identification des risques liés aux procédés	16
3.4.1	Risques liés aux équipements	16
3.4.2	Risques liés aux conditions opératoires	17
3.4.3	Risques liés aux réactions chimiques	17
3.4.4	Risques liés aux opérations de transfert / approvisionnement	18
3.4.5	Risques liés aux manques d'utilités	18
3.4.6	Synthèse des dangers liés au procédé	18
3.5	Etude de l'accidentologie	20
3.5.1	Définition / Introduction	20
3.5.2	Méthodologie	20
3.6	Analyse des potentiels de dangers	22
3.7	Etude de réduction des potentiels de dangers	24
3.7.1	Minimisation des inventaires	24



3.7.2	Substitution des produits	24
3.7.3	Modération des conditions opératoires.....	25
3.7.4	Simplification des procédés	25
4	ANALYSE DES RISQUES	26
4.1	Démarche globale.....	26
4.2	Principes généraux de la méthode APR.....	26
4.2.1	Préparation de l'analyse des risques.....	28
4.2.2	Analyses de risques.....	29
4.3	Sélection des scénarios d'accidents majeurs	38
4.3.1	Définition.....	38
4.3.2	Méthodologie de sélection.....	38
4.3.3	Sélection des scénarios majeurs retenus.....	38
5	EVALUATION DES CONSEQUENCES SUR L'ENVIRONNEMENT	40
5.1	Méthodologie générale	40
5.1.1	Description des types de scénarios retenus.....	40
5.1.2	Seuils réglementaires	41
5.2	Méthode de quantification des effets	46
5.2.1	Débit à la brèche - Temps de fuite.....	47
5.2.2	Dispersion atmosphérique.....	54
5.2.3	Explosions	57
5.2.4	BLEVE de capacité.....	62
5.2.5	Feux.....	64
5.2.6	Incendie de solides en vrac	68
5.2.7	Boil Over	68
5.2.8	Effet projectile	71
5.3	Analyse de la criticité	72
5.3.1	Gravité	72
5.3.2	Fréquence selon le TNO "Purple Book"	73
5.3.3	Fréquence - Probabilité	76
5.4	Effets domino et EIPS.....	77



Sommaire des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des dangers liés aux produits	14
Tableau 2 : Tableau d'incompatibilité	15
Tableau 3 : Tableau des quantités maximales de produits présents.....	16
Tableau 4 : Principaux potentiels de dangers des conditions opératoires	17
Tableau 5 : synthèse des dangers liés au procédé	18
Tableau 6 : Tableau d'accidentologie	20
Tableau 7 : Analyse statistique des causes	21
Tableau 8 : Analyse statistique des conséquences.....	21
Tableau 9 : Intégration de l'accidentologie dans la conception	22
Tableau 10 : Potentiels de danger des unités du site Goro Nickel	23
Tableau 11 : Tableau d'analyse de risques	29
Tableau 12 : Echelle de probabilité	33
Tableau 13 : Critères de gravité en fonction des catégories	34
Tableau 14 : Echelle d'appréciation de la gravité des conséquences humaines d'un accident à l'extérieur des installations.....	34
Tableau 15 : Matrice de probabilité / gravité / criticité des risques	35
Tableau 16 : Matrice finale de travail.....	36
Tableau 17 : Tableau d'analyse des sources d'ignition	37
Tableau 18 : Classification des accidents	38
Tableau 19 : Conditions météorologiques	55
Tableau 20 : Liste des îlots.....	58
Tableau 21 : Facteur de propension au BOIL-OVER	70
Tableau 22 : Critères de gravité en fonction des catégories	72
Tableau 23 : Echelle d'appréciation de la gravité des conséquences humaines d'un accident à l'extérieur des installations.....	73
Tableau 24 : Fréquences d'occurrence des sources d'ignition.....	74
Tableau 25 : Fréquences d'occurrence de canalisations et de pompes.....	75
Tableau 26 : Fréquences d'occurrence de rupture de capacité	75
Tableau 27 : Fréquences d'occurrence de perte de confinement d'échangeurs de chaleur .	76
Tableau 28 : Tableau de correspondance entre fréquence et probabilité	76

Sommaire des figures

Figure 1 : Méthode type noeud papillon	27
Figure 2 : Schéma des phénomènes mis en jeu suite à une rupture de ligne.....	47
Figure 3 : Suppression d'explosion en fonction de la distance réduite (source TNO-Yellow book).....	61



1 GLOSSAIRE

APR :	analyse préliminaire des risques
ARU :	arrêt d'urgence
ATEX :	atmosphère explosive
BLEVE :	boiling liquid expanding vapour explosion
CACES :	certificat d'aptitude à la conduite en sécurité
DDAE :	dossier de demande d'autorisation d'exploiter
EHS :	environnement hygiène et sécurité
EPI :	équipement de protection individuel OU Equipe de Première Intervention
ERP :	établissement recevant du public
ESI :	équipe de seconde intervention
FDS :	fiche de données sécurité
LIE :	limite inférieure d'explosivité
LSE :	limite supérieure d'explosivité
MEDD :	Ministère de l'écologie et du développement durable
ORSEC :	organisation des secours (Plan)
PIM :	plan d'intervention maritime
POI :	plan d'opération interne
POLMAR :	plan ORSEC pollution marine
PPI :	plan particulier d'intervention
PUM :	plan d'urgence maritime
RIA :	robinet incendie armé
RT :	route territoriale
SCR :	système de contrôle reparti
SD :	évènement redouté
SDC :	salle de contrôle
SEL :	seuil des effets létaux



SES :	seuil des effets significatifs
SMS :	système de management de la sécurité
TLV :	threshold limit value – valeur limite d'exposition
UVCE :	unconfined vapour cloud explosion – explosion de vapeurs non confinées
VME :	valeur limite de moyenne d'exposition
Z0 :	distance au seuil de destruction / distance d'effet domino
Z1 :	distance au seuil des effets létaux
Z2 :	distance au seuil des effets significatifs



2 INTRODUCTION

2.1 CADRE REGLEMENTAIRE

Le cadre réglementaire du présent dossier de demande d'autorisation d'exploiter est présenté dans le volume I. Cependant un rappel est fait ici de la réglementation applicable aux études de dangers.

2.1.1 Installations Classées pour la Protection de l'Environnement

La description des installations, produits et procédés Goro Nickel ainsi que leur classement dans la nomenclature ICPE de la Province Sud sont présentés dans le Volume II - Description du projet.

2.1.2 Arrêté du 10 mai 2000 (Directive SEVESO II)

Si l'on se réfère à la réglementation métropolitaine non applicable en Nouvelle-Calédonie, les installations Goro Nickel entreraient dans le champ d'application de l'arrêté métropolitain du 10 mai 2000 modifié relatif à la prévention des risques technologiques majeurs, arrêté transcrivant en droit français la 96/82/CE dite SEVESO II. Le classement détaillé des installations de l'établissement vis-à-vis de la nomenclature de l'arrêté du 10 mai 2000 est présenté dans le Volume II.

L'objectif de cette étude est de caractériser les phénomènes accidentels impliquant les installations, les procédés et les produits présents dans les installations industrielles du projet Goro Nickel (raffinerie et centre industriel de la mine) afin d'en évaluer les conséquences sur le milieu environnant (humain, industriel et naturel).

2.1.3 Autres références relatives aux études de dangers

Les textes réglementaires utilisés pour l'établissement des études de dangers sont les suivants :

- Circulaire du 25 juin 2003 relative aux principes généraux des études de dangers des installations classées
- Arrêté du 22 octobre 2004 relatif aux valeurs de référence de seuils d'effets des phénomènes accidentels des installations classées
- Arrêté du 29 septembre 2005 modifiant l'arrêté du 10 mai 2000 modifié relatif à la prévention des accidents majeurs impliquant des substances ou des préparations dangereuses présentes dans certaines catégories d'installations classées pour la protection de l'environnement
- Arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises autorisation



- Circulaire du 7 octobre 2005 Relative aux installations classées - Diffusion de l'arrêté ministériel relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des IC soumises à autorisation

Divers documents sont pris en référence pour la rédaction des études de dangers :

- INERIS Rapport Ω -7 - Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (DRA-35) - Outils d'analyse des risques générés par une installation industrielle - Direction des Risques Accidentels - Mai 2003
- INERIS Rapport Ω -10 - Evaluation des dispositifs de prévention et de protection utilisés pour réduire les risques d'accidents majeurs (DRA-039) - Evaluation des Barrières Techniques de Sécurité – MEDD - Unité Prévention des Risques - Direction des Risques Accidentels - Février 2005
- INERIS Rapport Ω -6 - Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (DRA-35) - Eléments Importants Pour la Sécurité (EIPS) - Direction des Risques Accidentels - Mai 2003
- Committee for the Prevention of Disasters - CPR18E - "Purple Book" - Guidelines for the quantitative risk assessment
- Guide méthodologique UFIP pour la réalisation des études de dangers en raffineries, stockages et dépôts de produits liquides et liquéfiés.

2.2 OBJECTIFS ET METHODOLOGIE DE L'ETUDE DE DANGERS

L'étude de dangers a pour but de caractériser, analyser, évaluer, prévenir et réduire les risques liés à une installation et s'articule autour des éléments principaux suivants :

- L'identification des potentiels de dangers à l'intérieur et à l'extérieur du site étudié, en situation d'exploitation normale ou dégradée (en cas d'incident et accident) ;
- L'identification des risques générés par les installations ;
- L'évaluation des effets d'accidents majeurs ;
- La justification des mesures de maîtrise des risques visant à diminuer la probabilité d'occurrence d'accident et/ou réduire leurs conséquences sur l'environnement, tout en restant techniquement réalisables et économiquement acceptables.



Le tout, afin d'apporter les informations permettant :

- A l'exploitant de définir ses propres moyens de secours en cas de situation d'urgence, ainsi que leur organisation ;
- Aux autorités compétentes de définir des zones de maîtrise de l'urbanisation autour du site, éventuellement des plans particuliers d'intervention associés à l'établissement ;
- A l'exploitant et aux autorités compétentes d'informer les populations sur les risques encourus.

Ces trois points impliquent la prise en compte des scénarios correspondant aux cas les plus majorants en terme d'effets sur l'environnement interne et externe à l'installation industrielle, leur probabilité d'occurrence étant estimée au regard des mesures de prévention et/ou de détection proposées par l'exploitant.

2.3 PERIMETRE DE L'ETUDE - EXCLUSIONS

Compte tenu du nombre important d'unités de procédé et de leur étendue géographique sur le site Goro Nickel, l'étude a été scindée en plusieurs documents d'étude de dangers. Sont ainsi présentées dans le présent dossier :

- Une section faisant état des méthodologies et faisant la synthèse de toutes les études de dangers spécifiques des unités (synthèse des effets dominos et des EIPS). Il s'agit de la présente section,
- Une section traitant des études de dangers spécifiques aux installations du centre industriel de la mine,
- Une section traitant des études de dangers spécifiques aux installations de la raffinerie.

La logique de dissociation des études repose principalement sur le découpage fonctionnel adopté par Goro Nickel pour ses unités de procédé et unités auxiliaires. Une étude spécifique est donc associée à chacun des ensembles listés ci-dessous :

- Centre de maintenance de la mine (Section B),
- Unité de préparation de la pulpe (Section B),
- Unité de conditionnement du minerai (Section C),
- Unité de lixiviation sous pression (Section C),
- Unité de décantation à contre-courant (Section C),
- Unité de neutralisation partielle et de mélange des hydroxydes (Section C),
- Unité d'élimination du cuivre (Section C),
- Unité d'extraction primaire par solvant (Section C),



- Unité d'élimination du zinc (Section C),
- Unité d'extraction secondaire par solvant (Section C),
- Unité de pyrohydrolyse de nickel (Section C),
- Stockage de GPL (Section C),
- Unité de précipitation du carbonate de cobalt (Section C),
- Unité de traitement des effluents (Section C),
- Unité de manutention des produits finis (Section C),
- Usine de calcaire (Section C),
- Usine de chaux (Section C),
- Usine d'acide sulfurique et ses stockages associés (Section C),
- Centrale thermique au fioul lourd (Section C),
- Unité de stockage des solides en vrac (Section C).

La limite de chacune des études de dangers spécifiques correspond aux équipements et opérations tels qu'ils sont présentés dans le volume II, dans les chapitres spécifiques à chacune de ces installations.

Pour rappel, sont exclues du champ du présent dossier de demande d'autorisation d'exploiter :

- La centrale électrique au charbon de Prony Energies, et les utilités fournies par Goro Nickel pour l'exploitation de cette centrale,
- Les installations du parc à résidus miniers situé dans la vallée de la Kwé Ouest,
- Les installations du Port.

Ces installations font l'objet d'arrêtés d'exploitation propres ou bien disposent d'un dossier de demande d'autorisation d'exploiter en cours d'instruction.

Les études de dangers ne portent pas sur les risques chroniques des postes de travail, cet aspect étant traité au travers de la Notice d'Hygiène et de Sécurité (Section D du volume IV).

3 IDENTIFICATION DES POTENTIELS DE DANGERS

3.1 DEFINITION DU POTENTIEL DE DANGERS

Les définitions données ci-dessous sont extraites de la "circulaire du 7 octobre 2005 relative aux installations classées -Diffusion de l'arrêté ministériel relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation".

3.1.1 Danger

« Cette notion définit une propriété intrinsèque à une substance (butane, chlore,...), à un système technique (mise sous pression d'un gaz,...), à une disposition (élévation d'une charge),..., à un organisme (microbes), etc., de nature à entraîner un dommage sur un « élément vulnérable ».

Sont ainsi rattachées à la notion de "danger" les notions d'inflammabilité ou d'explosivité, de toxicité, de caractère infectieux, inhérentes à un produit et qui caractérisent le danger.

3.1.2 Potentiel de dangers

Système (naturel ou créé par l'homme) ou disposition adoptée et comportant un (ou plusieurs) "danger(s)" ; dans le domaine des risques technologiques, un "potentiel de dangers" correspond à un ensemble technique nécessaire au fonctionnement du processus envisagé.

Exemple : un réservoir de liquide inflammable est porteur du danger lié à l'inflammabilité du produit contenu, à une charge disposée en hauteur correspond le danger lié à son énergie potentielle (en cas de chute), à une charge en mouvement celui de l'énergie cinétique associée, etc.

3.1.3 Risque

La norme ISO/CEI 73 définit le risque comme étant la «combinaison de la probabilité d'un événement et de ses conséquences».

Le risque est la possibilité de survenance d'un dommage résultant d'une exposition aux effets d'un phénomène dangereux. Dans le contexte propre au « risque technologique », le risque est, pour un accident donné, la combinaison de la probabilité d'occurrence d'un événement redouté/final considéré (incident ou accident) et la gravité de ses conséquences sur des éléments vulnérables

Le risque constitue une "potentialité". Il ne se «réalise» qu'à travers "l'événement accidentel", c'est-à-dire à travers la réunion et la réalisation d'un certain nombre de conditions et la conjonction d'un certain nombre de circonstances qui conduisent, d'abord, à l'apparition d'un (ou plusieurs) élément(s) initiateur(s) qui permettent, ensuite, le développement et la propagation de phénomènes permettant au "danger" de s'exprimer, en donnant lieu d'abord à l'apparition d'effets et ensuite en portant atteinte à un (ou plusieurs) élément(s) vulnérable(s).



3.1.4 Conclusion

Pour chaque unité étudiée, il est demandé d'identifier les potentiels associés à l'appréciation combinée de la présence de produits dans des équipements et des conditions opératoires associées. Cette identification suit une méthodologie détaillée ci-après.

3.2 METHODOLOGIE GENERALE

Le but de cette partie est de présenter les risques internes et externes aux installations du site de Goro Nickel afin d'identifier les potentiels de dangers. L'identification de ces potentiels de dangers permet de préparer les analyses de risques en déterminant les événements redoutés qui seront analysés.

Cette identification se déroule selon les étapes suivantes.

En premier lieu, il s'agit de détecter les causes d'accidents sur les installations, liées à leur environnement extérieur, que cet environnement soit naturel, humain ou industriel. C'est l'objet du chapitre intitulé "Identification des risques liés à l'environnement du site". Sont ainsi étudiés : risques liés aux cyclones, à la foudre, au séisme, aux raz-de-marée, aux glissements de terrain, feux de broussailles, à l'humidité relative et au rayonnement solaire. Ces risques, communs à l'ensemble du site, sont traités intégralement dans le chapitre 2 de la section A.

En second lieu, on s'intéresse aux risques liés aux produits chimiques mis en œuvre dans les installations du projet. En plus de l'étude des caractéristiques intrinsèques de dangerosité des produits, l'objectif de ce paragraphe est aussi de décrire les conditions dans lesquelles les substances à l'état isolé ou en mélange avec d'autres peuvent conduire à des accidents. C'est le rôle du paragraphe "Identification des risques liés aux produits". Les potentiels de dangers spécifiques à chacun des produits sont détaillés dans les études de dangers spécifiques à chaque unité où les produits sont présents.

En troisième lieu, on s'intéressera aux équipements et aux conditions opératoires dans les procédés du site. Sont également identifiés les risques générés par la perte des utilités (eau, électricité, air, gaz, ...), par les opérations d'approvisionnements (transferts de produits autres que par canalisation - livraison par camion, dépotage, déchargement / chargement, etc.), par les technologies, équipements & procédés du projet. C'est le rôle du paragraphe "Identification des risques liés aux procédés". Ces potentiels de dangers sont détaillés dans les études de dangers spécifiques de chacune des unités visées par le présent dossier.

En quatrième lieu, la recherche d'accidents à partir des banques de données fournissant des comptes-rendus d'accidents est réalisée afin d'identifier les circonstances dans lesquelles ces accidents (mettant en œuvre les mêmes produits et/ou les mêmes procédés) sont survenus. C'est le rôle du paragraphe "Etude de l'accidentologie".

Finalement, cette première phase permet de dresser un "inventaire global des risques" et ainsi d'analyser les potentiels de dangers des installations du site Goro Nickel. En découle une première présentation de l'étude de "Réduction des potentiels de dangers" réalisée à la conception des installations par Goro Nickel.

3.3 IDENTIFICATION DES RISQUES LIES AUX PRODUITS

3.3.1 Caractéristiques physico-chimiques

L'objectif de cette partie est de présenter les risques liés à la nature chimique de chaque produit présent dans les unités étudiées selon le schéma suivant, chacune de ces parties étant détaillée par la suite :

- Généralités,
- Incompatibilité / Stabilité / Réactivité,
- Risque incendie / explosion,
- Risque toxique,
- Risque écotoxique,
- Références bibliographiques.

Cette analyse est fondée sur les fiches de données et de sécurité (FDS) et sur les fiches toxicologiques des produits.

En conclusion de chacune de ces rubriques, il est mentionné quels potentiels de dangers (inflammabilité, réactivité, toxique, écotoxique) sont retenus comme des potentiels de dangers pour le produit considéré.

Cependant, certains produits présents au sein des unités, sont des produits intermédiaires du procédé, ils ne possèdent donc pas de FDS propres. Dans ce cas, l'analyse des potentiels de dangers du produit est fondée sur l'analyse des potentiels de dangers de chacun des constituants de ce produit, et suivant les conditions où le produit est présent au sein des installations.

3.3.1.1 Généralités

Ce paragraphe a pour objet d'identifier précisément le produit soit par sa dénomination commerciale, soit par sa composition exacte, son état ou ses données physico-chimiques. L'identification du produit peut être complétée par un bref rappel de l'utilisation qui est faite du produit.

3.3.1.2 Incompatibilité / Stabilité / Réactivité

Ce paragraphe traite de l'incompatibilité et de la réactivité que le produit (ou ses composants) peut avoir avec d'autres produits ou famille de produits. Il traite également de la stabilité du produit et éventuellement des produits de décomposition dangereux qu'il peut former. (Ces données correspondent aux données fournies dans le chapitre 10 des FDS)

Ce paragraphe permet de préparer le tableau d'incompatibilité des produits qui est donné dans la synthèse des potentiels de dangers des produits.



3.3.1.3 Risque incendie / explosion

L'objet de cette partie est, pour les produits présentant un risque d'incendie ou d'explosion, de présenter les informations nécessaires pour caractériser ce potentiel grâce aux informations suivantes :

- Point éclair (en °C),
- Domaine d'inflammabilité (en %),
- Température d'auto-inflammation (en °C).

3.3.1.4 Risque toxique

L'étude de dangers traitant du fonctionnement des installations en mode dégradé, ce paragraphe traite uniquement de la toxicité aiguë des produits présents dans les installations.

Pour chacun de ces produits (ou de ses constituants), un tableau précise les données relatives à la toxicité, à savoir les effets provoqués sur les cibles exposées et suivant le mode d'exposition, ainsi que les concentrations ou doses létales qui ont pu être évaluées sur des espèces animales.

3.3.1.5 Risque écotoxique

De même que pour le risque toxique, cette partie présente pour chaque produit (ou chaque constituant) les données relatives à l'écotoxicité, à savoir si le produit présente un risque de toxicité pour certaines espèces (en précisant les concentrations à partir desquelles cette toxicité apparaît) ou s'il présente un risque de toxicité pour le milieu naturel.

3.3.2 Synthèse des dangers liés aux produits

A la fin de la partie relative aux potentiels de dangers liés aux produits, une synthèse est réalisée sous la forme du tableau suivant.

Tableau 1 : Synthèse des dangers liés aux produits

Produit	Etat physique	Symboles*	Phrases R/S**	Incompatibilité, stabilité et réactivité	Inflammabilité	Toxicité aiguë	Ecotoxicité

Ce tableau permet donc pour chaque produit de récapituler les informations suivantes :

- Le nom du produit,
- Son état physique (liquide, solide, gazeux),
- Symboles (les symboles sont explicités en annexe IV-A-2),
- Les phrases de risques et de sécurité associées (les phrases de risques sont explicitées en annexe IV-A-2),

- Les potentiels d'incompatibilité de stabilité et de réactivité,
- Les potentiels d'inflammabilité,
- Les potentiels de toxicité aiguë,
- Les potentiels d'écotoxicité.

3.3.3 Tableau d'incompatibilité des produits

L'analyse des potentiels de dangers de chaque produit comporte un paragraphe dédié au potentiel d'incompatibilité que le produit présente. Il est donc important, une fois tous ces potentiels exposés, de faire une synthèse de toutes ces incompatibilités afin de vérifier qu'il n'existe pas de produits incompatibles au sein d'une unité, ou si tel est le cas d'explicitier le résultat du mélange des deux produits en question.

Pour ce faire, le tableau suivant est mis en œuvre :

Tableau 2 : Tableau d'incompatibilité

Produit	Produit 1	Produit 2	Produit 3	Produit 4	Produit 5
Produit 6					
Produit 5					
Produit 4					
Produit 3					
Produit 2					

Chaque case du tableau est alors remplie par des lettres dont la signification est la suivante :

- R : Réaction entre les deux produits,
- E : formant un mélange Explosible,
- V : réaction Violente,
- AI : Aucune Incompatibilité.

Ainsi, pour chaque réaction ou incompatibilité identifiée, un paragraphe peut être réalisé afin d'explicitier cette incompatibilité, ou d'en limiter l'importance. En effet, dans certaines unités, certains produits pouvant produire de réactions violentes sont mis en contact mais dans des conditions ne présentant pas de risques, c'est le cas par exemple de la neutralisation des acides par du lait de chaux dans le traitement des effluents. Il est donc important d'explicitier la limite de certaines incompatibilités entre produits.

3.3.4 Présentation des quantités maximales de produits susceptibles d'être présentes

Cette partie détaille les quantités de produits présentes dans chaque unité (et les rubriques ICPE associées le cas échéant) et permet donc de caractériser l'aspect potentiel de dangers lié aux inventaires. Le tableau utilisé est le suivant :

**Tableau 3 : Tableau des quantités maximales de produits présents**

Produits	Quantité maximale présente	Rubrique ICPE
Produit 1		
Produit 2		
Produit 3		

3.4 IDENTIFICATION DES RISQUES LIES AUX PROCÉDES

L'objectif de cette partie est de rappeler, pour chaque unité étudiée, les risques liés aux procédés mis en œuvre (réactions chimiques, conditions opératoires, transferts de produits), et aux équipements. L'identification de ces risques est déclinée selon le schéma suivant :

- Risques liés aux équipements,
- Risques liés aux conditions opératoires,
- Risques liés aux réactions chimiques,
- Risques liés aux opérations de transfert / approvisionnement,
- Risques liés au manque d'utilité.

L'ensemble de ces potentiels de dangers est détaillé par la suite.

3.4.1 Risques liés aux équipements

L'objet de ce paragraphe est de mettre en avant les risques inhérents aux équipements, en dehors de toute considération du produit contenu, ainsi que des conditions opératoires. Cependant, sur ce dernier point, notons que certains équipements (équipements sous pression notamment) sont indissociables de leurs conditions opératoires, les potentiels de dangers liés aux équipements transcriront donc aussi ceux des conditions opératoires.

Les potentiels de dangers liés aux équipements sont de plusieurs natures, en effet, il peut s'agir de :

- L'inventaire de produit contenu dans l'équipement et qui pourrait être libéré,
- Les chutes d'équipements engendrées par les équipements de grande hauteur ou ceux situés en hauteur,
- Les projectiles générés par les éléments mécaniques en mouvements ou par les équipements sous pression,
- Les échauffements engendrés par les éléments mécaniques en mouvements,
- Le départ d'incendie dû à la présence de matériaux combustibles dans les équipements,

- L'obstruction de certains équipements (filtres par exemple) pouvant entraîner des montés en pression d'autres équipements,
- Etc.

3.4.2 Risques liés aux conditions opératoires

L'objet de cette partie est de mettre en avant les dangers liés aux conditions opératoires mises en œuvre dans le procédé, à savoir les températures, pressions et débits. Il est important de faire état des principales conditions opératoires de l'unité et surtout des conditions maximales. Les principaux potentiels de dangers liés aux conditions opératoires sont rappelés dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Principaux potentiels de dangers des conditions opératoires

Condition opératoire	Potentiel de dangers associé
Température haute	Augmentation de pression Inflammation de produits Liquéfaction de produits Dommages des structures des équipements
Température basse	Solidification de produits Diminution de pression Dommages des structures des équipements
Pression haute	Augmentation de température Modification des structures des équipements, voir éclatement
Pression basse	Diminution de température Modification des structures des équipements

D'autres conditions opératoires pourront également être considérées comme la densité ou le débit.

3.4.3 Risques liés aux réactions chimiques

Ce paragraphe présente les réactions chimiques mises en jeu et les risques associés (emballement réactionnel, produit de décomposition, etc.), ainsi que les éventuelles réactions "parasites" qui pourraient se produire.

Le but de cette partie est donc d'une part de décrire pour chaque réaction si elle est exothermique, si elle est sujette à produire de grandes quantités de gaz, si elle est sujette à des emballements réactionnels ou à produire d'autres composés ; et d'autre part, au vu des produits présents et des conditions opératoires de déterminer quelles sont les autres réactions qui peuvent se produire, et dans un tel cas de décrire les potentiels de dangers de ces réactions.

3.4.4 Risques liés aux opérations de transfert / approvisionnement

Ce paragraphe étudie les activités annexes au procédé même comme les apports de matières premières, en dehors de ceux réalisés par canalisations.

Ces opérations de transfert sont généralement assurées par des camions puis par des chariots élévateurs ou des systèmes de pompes.

Les principaux risques engendrés par ces opérations sont donc les suivants :

- Collision entre véhicules, entre véhicules et équipements,
- Chute de chargement,
- Fuites de chargements,
- Fuites lors des opérations de dépotage,
- Etc.

3.4.5 Risques liés aux manques d'utilités

L'objet de ce paragraphe est de décrire les conséquences et actions en cas de panne ou de perte d'utilités spécifiquement à chaque unité étudiée. Les cas considérés sont donc les suivants :

- Manque d'électricité,
- Manque d'air instrument,
- Manque d'eau de refroidissement,
- Manque d'eau filtrée,
- Manque de vapeur.

Suivant les cas, certaines rubriques ne seront pas traitées car les unités ne sont pas alimentées avec toutes ces utilités.

3.4.6 Synthèse des dangers liés au procédé

L'objet de cette partie est de faire la synthèse des dangers liés au procédé. Cette synthèse est réalisée dans le tableau suivant :

Tableau 5 : synthèse des dangers liés au procédé



Section A – Chapitre 1 – Méthodologie et guide de lecture des études de dangers

Élément / Paramètre du procédé	Nature de l'élément ou du paramètre	Facteur de risque associé	Dangers induits	Commentaires
Équipement				
Réaction chimique				
Conditions opératoires				
Opération de transfert / approvisionnement				
Utilités				

Ainsi, pour chaque élément ou paramètre du procédé, il faut préciser :

- La nature de l'élément ou du paramètre, c'est-à-dire qu'il faut préciser de quel équipement, de quelle réaction, condition opératoire, opération de transfert ou de quel manque d'utilité il est question,
- Pour chacun de ses éléments ou paramètre, il faut préciser quels sont les facteurs de risques associés (volumes importants, débit de gaz traité, etc.) et les dangers induits (épandages, dispersion, brûlures, etc.).

Une colonne commentaire est mise en place afin de rappeler la justification de la non prise en compte de certains éléments ou paramètres comme potentiels de dangers.

3.5 ETUDE DE L'ACCIDENTOLOGIE

3.5.1 Définition / Introduction

Afin de compléter la partie relative aux potentiels de dangers, une recherche a été menée dans les bases de données recensant les accidents industriels. Cette recherche a pour but de permettre de compléter éventuellement la liste des potentiels de dangers, mais surtout de vérifier que les installations concernées par le dossier sont conçues de telle sorte que ces accidents puissent être évités, tant que faire ce peut.

L'accidentologie met en évidence les risques d'incendie, d'explosion et d'intoxication qui peuvent être rencontrés sur une unité en fonction des produits impliqués. Elle constitue la base d'une analyse critique de l'installation, destinée à s'assurer que les causes d'un accident passé sont bien prises en considération.

3.5.2 Méthodologie

3.5.2.1 Recherche d'accidents

Cette recherche se fait essentiellement sur la base de données ARIA du BARPI (Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industrielles), à l'aide de mots-clés ou de secteurs industriels.

Ces mots-clés correspondent à des équipements, des produits ou des opérations du procédé. A l'issue de cette recherche, un tri est effectué dans les résultats afin de ne sélectionner que les résultats représentatifs des installations concernées. En effet, les résultats de recherche par mots-clé donnent souvent des accidents non appropriés. Par exemple, en tapant le mot-clé "gasoil", on obtient des accidents liés au fonctionnement des stations services, ce qui n'a pas de lien avec des installations de stockage et d'alimentation de fours.

La liste des mots-clés est explicitement donnée dans le texte afin de prouver la véracité et la pertinence de cette recherche accidentologique.

Il est aussi possible de recourir à d'autres bases de données, ou à des rapports d'accidentologie, comme par exemple celui de la conférence d'ALTA 2005 COPPER, portant sur les risques d'accident au sein des unités d'extraction par solvant.

Les principaux accidents sont ensuite résumés dans un tableau comme ci-après. Le détail de l'accidentologie est présenté en annexe de chaque étude spécifique.

Tableau 6 : Tableau d'accidentologie

N°	Accident	Equipement	Cause	Conséquence

Ce tableau permet donc, pour chaque accident d'identifier le ou les équipements en cause, ainsi que les causes et les conséquences de ces accidents.

3.5.2.2 Analyse statistique

Ensuite, une analyse statistique des scénarios sélectionnés (représentatifs des installations étudiées) est présentée pour faire ressortir les principales causes et conséquences.

Cette analyse peut servir à coter de manière semi-quantitative la probabilité des évènements étudiés dans l'analyse de risques (prochaine étape de l'étude de dangers). En effet, les accidents sont sélectionnés sur une période de temps définie et il est possible d'en évaluer la récurrence.

Les statistiques des causes sont établies par l'intermédiaire du tableau suivant :

Tableau 7 : Analyse statistique des causes

Analyse des causes		Evènements par équipement	
<i>Causes génériques</i>	<i>Causes spécifiques</i>	<i>Nombre</i>	<i>Pourcentage</i>

Dans ce tableau, les statistiques sont établies sur les causes génériques, cependant, afin d'apporter plus de précision, les causes spécifiques sont mentionnées dans ce tableau (mais ne sont pas prises en compte dans les statistiques).

Les statistiques des conséquences sont établies par l'intermédiaire du tableau suivant :

Tableau 8 : Analyse statistique des conséquences

Analyse des conséquences	Nombre d'évènements par équipement	
	<i>Nombre</i>	<i>Pourcentage</i>

Notons qu'un accident peut avoir plusieurs conséquences, ainsi la somme des statistiques peut être supérieure à 100%.

3.5.2.3 Prise en compte dans la conception

Enfin, un tableau récapitule les enseignements tirés de l'étude de l'accidentologie et résume les éléments mis en œuvre dans la conception et la gestion des installations pour que ces accidents ne se reproduisent pas. En effet, pour les causes et conséquences identifiées lors de l'étude de l'accidentologie, sont mentionnés les moyens mis en œuvre pour la prévention et la détection des causes, ainsi que les moyens mis en œuvre pour la limitation des conséquences.

Le tableau suivant regroupe l'ensemble de ces informations.

Tableau 9 : Intégration de l'accidentologie dans la conception

Intégration de l'accidentologie dans la conception	
Causes et conséquences issues de l'accidentologie	Éléments de conception justifiant la prise en compte de l'accidentologie dans la conception

3.6 ANALYSE DES POTENTIELS DE DANGERS

Une fois l'identification des risques (produits, procédés) finalisée et l'accidentologie analysée, les potentiels de dangers peuvent être identifiés et décrits.

Pour ce faire deux tableaux servent de support à cette synthèse. Le premier tableau (tableau 10) permet de croiser entre eux les différents potentiels de dangers établis auparavant afin d'en faire ressortir les événements redoutés qui seront le centre de l'analyse de risques (étape suivante de l'étude de dangers). Le deuxième tableau présente les potentiels de dangers inhérents aux équipements, indépendamment des produits.

Dans le premier tableau, à chaque produit on associe d'une part les dangers induits identifiés (2^{ième} colonne), puis les équipements dans lesquels ces produits sont présents (6^{ième} colonne). Les colonnes n°3, 4 et 5 présentent les risques génériques associés aux équipements servant au stockage, aux opérations de procédé ou aux opérations de transfert de produits. Ces risques génériques sont les suivants :

- Ecoulement / épandage,
- Emanation / accumulation de vapeurs,
- Emanation de poussières ou de particules.

Ainsi pour chaque produit et pour chaque équipement qui le contient, il est possible de décrire le phénomène dangereux associé. Par exemple, pour une solution d'alimentation écotoxique, contenu dans un réservoir de stockage, le phénomène dangereux associé au potentiel d'écoulement est : la pollution des eaux et des sols. Les deux dernières colonnes permettent d'analyser ces phénomènes dangereux suspectés et de conclure quant à leur étude en analyse de risques. En effet, en considérant d'autres paramètres telles que les conditions opératoires notamment ou bien les données relatives à la construction des unités, certains phénomènes dangereux peuvent être réduits ou limiter à certaines conditions. Par exemple lorsqu'un produit inflammable est utilisé à des températures bien en dessous de son point éclair, le potentiel d'accumulation de vapeurs et d'inflammabilité ne sera retenu que dans le cas de formation d'un brouillard de ce produit ou dans le cas d'un incendie se propageant aux installations considérées.

Le deuxième tableau présente donc, pour les autres équipements, les potentiels de dangers qui leur sont propres. Ces potentiels sont essentiellement liés aux éléments mécaniques en mouvement ou aux charges calorifiques ; les phénomènes dangereux associés sont donc des projections d'éléments mécaniques ou des départ de feu.



Tableau 10 : Potentiels de danger des unités du site Goro Nickel

Dangers induits par le procédé** Dangers induits par le produit*		Ecoulement / Epanchage	Emanation / Accumulation de vapeurs	Emanation de poussières	Equipements concernés	Analyse / Conclusions	
						Analyse des phénomènes dangereux suspectés	Conclusions quant aux analyses de risques
Produits	Dangers induits	Phénomènes dangereux suspectés associés à ces potentiels				Analyse des phénomènes dangereux suspectés	Conclusions quant aux analyses de risques

Equipements / Opérations	Charge mécanique en mouvement	Rupture Mécanique	Charge calorifique	Analyse / Conclusions	
	Phénomènes dangereux suspectés			Analyse des phénomènes dangereux suspectés	Conclusions quant aux analyses de risques

3.7 ETUDE DE REDUCTION DES POTENTIELS DE DANGERS

En amont de l'analyse de risques il est important de procéder à l'étude de réduction des potentiels de dangers, afin de s'assurer que même si les installations possèdent de nombreux potentiels de dangers, ces derniers ne peuvent pas être diminués, au regard de la nature des activités et de la capacité de production.

La réduction des potentiels de dangers se fait sur la base des 4 critères suivants:

- Minimisation des inventaires,
- Substitution des produits,
- Modération des conditions opératoires,
- Simplification des procédés.

3.7.1 Minimisation des inventaires

Ce principe repose sur la limitation des inventaires afin d'une part de limiter le risque d'occurrence d'un incident, et d'autre part de limiter les conséquences de ces éventuels incidents.

Il s'agit donc dans cette partie de vérifier que les installations ne présentent pas de stockages trop importants et que le site dispose des quantités suffisantes pour assurer une autonomie raisonnable pour son fonctionnement. Pour cela il est aussi important de considérer les problématiques d'approvisionnement en matières premières.

Par exemple les quantités de stockages de soufre solides peuvent paraître très importantes (95 000 tonnes), cependant, cette quantité donne 57 jours d'autonomie à l'usine d'acide. De plus, si l'on considère qu'on ne peut réapprovisionner que lorsque la capacité de stockage est en dessous de 48 000 tonnes (pour décharger les 47 000 tonnes des bateaux), cela ne donne qu'un mois d'autonomie, en cas de problème d'approvisionnement.

3.7.2 Substitution des produits

L'objet de cette partie est de s'assurer que les produits mis en œuvre sont, parmi les produits utilisables dans le procédé, les moins dangereux possibles.

Par exemple, les réacteurs à lits fluidisés sont alimentés en énergie par la combustion du propane. Le propane est certes un produit dangereux de par son caractère inflammable, mais moins dangereux que le kérosène initialement considéré pour l'alimentation des réacteurs. En effet, l'utilisation du propane permet une meilleure utilisation des réacteurs, mais également diminue considérablement la production de dioxine et de furane dans le procédé de pyrohydrolyse. De plus son utilisation comme combustible dans un système fondé sur le principe d'auto-inflammation permet une très bonne maîtrise de l'inflammation de ce produit.



3.7.3 Modération des conditions opératoires

La modération des conditions opératoires consiste à utiliser des procédés ayant le plus possibles des conditions normales (pressions atmosphériques, température ambiante) ou, si cela n'est pas possible, des conditions les plus modérées possible.

Par exemple, les opérations de lixiviation se déroulent à de fortes températures et pressions, mais qui correspondent au minimum requis par le procédé, et pas plus. Cependant, la température de 270°C est nécessaire pour que la lixiviation soit optimale afin d'atteindre la capacité de production, et la pression de 5 700 kPa est alors nécessaire pour maintenir la solution liquide dans l'autoclave. En dessous de ces températures et pressions, il ne serait alors plus possible d'obtenir la capacité de production voulue.

3.7.4 Simplification des procédés

L'objet de cette partie est de s'assurer que les installations sont aménagées afin de réduire à la source les risques d'incidents, c'est-à-dire qu'elles ne disposent que des éléments nécessaires au bon déroulement des opérations.

Par exemple, les unités sont conçues et implantées de telle sorte que les dénivelés de terrains sont utilisés pour le transfert gravitaire de certains produits. Ce type de transfert ne nécessitant donc pas la mise en œuvre de pompes, permet de limiter les risques induits par ces dernières.

4 ANALYSE DES RISQUES

4.1 DEMARCHE GLOBALE

La phase initiale d'identification des potentiels de dangers du site a permis de dresser un portefeuille global des risques associés aux installations étudiées et d'identifier les événements redoutés qui vont faire l'objet de l'analyse de risques.

L'objectif de l'analyse des risques est donc, pour chaque événement redouté considéré d'en identifier les causes et les conséquences, ainsi que les moyens de prévention et de limitation des effets mis en place. Ceci permet, par l'intermédiaire d'une cotation, d'identifier les événements pouvant conduire à des scénarios d'accident majeur.

La méthode choisie par le projet est l'Analyse Préliminaire des Risques (APR).

L'analyse préliminaire des risques est une méthode générale couramment utilisée au stade de la conception des installations, mais également pour des installations complexes, ce qui est le cas des installations visées par le présent dossier.

4.2 PRINCIPES GENERAUX DE LA METHODE APR

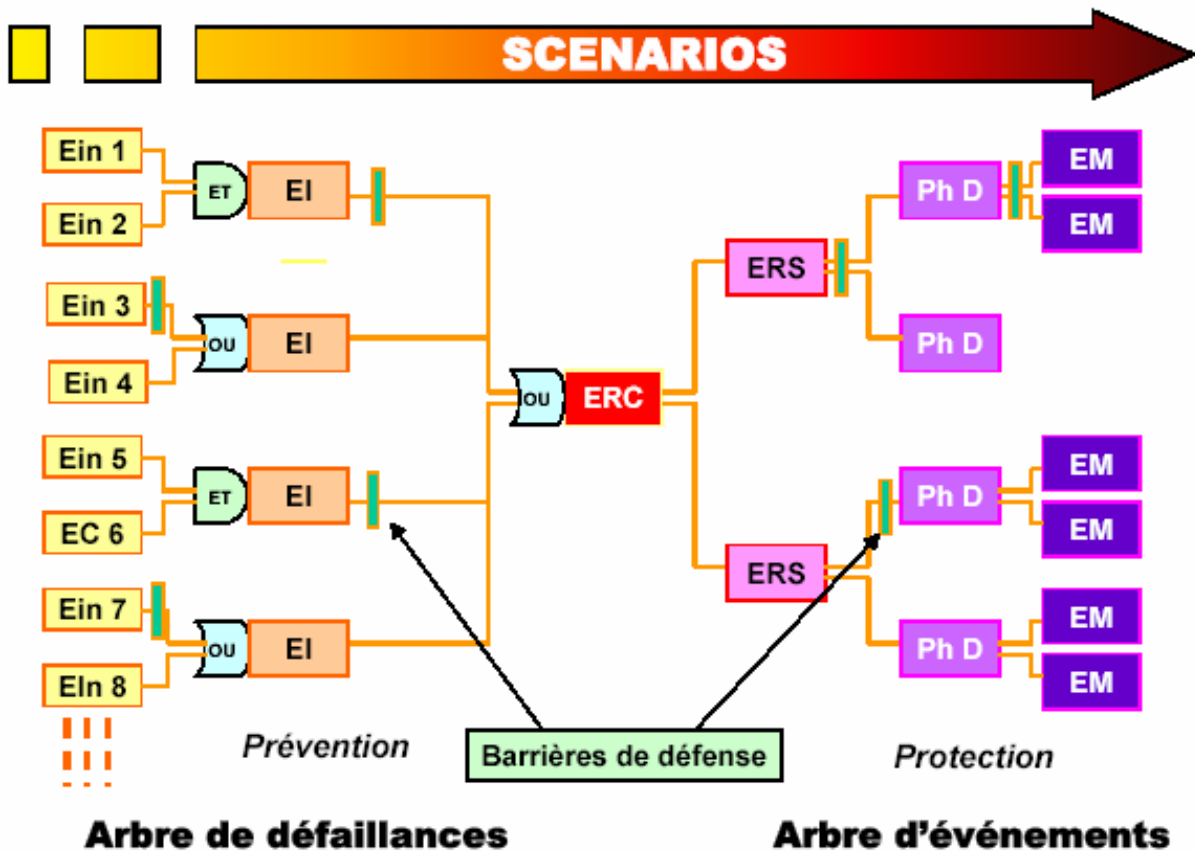
L'analyse des risques de type APR a pour but d'identifier successivement et pour chaque événement redouté préalablement identifié :

- Les causes pouvant conduire à l'occurrence de ces événements redoutés ;
- Les mesures de prévention prévues pour pallier à l'apparition des causes identifiées ;
- Les phénomènes dangereux provoqués par la réalisation des événements redoutés (premiers ou secondaires), les effets prévisibles et leurs conséquences sur des cibles potentielles ;
- Les mesures de limitation des conséquences prévues ;
- La probabilité d'occurrence et la gravité des scénarios d'accidents identifiés (cotation semi-quantitative) ;

Cette APR est structurée selon la méthode des nœuds-papillons, et ce dans le but d'avoir une meilleure lisibilité et d'autre part afin de mieux préparer la représentation des nœuds-papillons à proprement parler, qui serviront à la sélection des EIPS (Eléments Importants Pour la Sécurité). Notons en effet que même si l'analyse est structurée suivant la méthode des nœuds papillons, les nœuds papillons ne sont présentés que dans le cadre des scénarios d'accidents majeurs. Les nœuds-papillons sont décrits ci-après.

Le nœud-papillon est un outil qui combine à la fois un arbre des causes et un arbre des conséquences. Le point central du nœud-papillon est l'événement redouté. La partie gauche du nœud-papillon représente un arbre des causes, la partie droite l'arbre des conséquences. Sur ce diagramme, les barrières sont présentées sous la forme de carrées de couleur verte pour les barrières de prévention, et de couleur bleue pour les barrières de limitation des conséquences. Un exemple de nœud-papillon est donné dans le schéma suivant.

Figure 1 : Méthode type noeud papillon



Légende			
Ein	Evénement indésirable	ERS	Evénement redouté secondaire
EC	Evénement courant	Ph D	Phénomène dangereux
EI	Evénement initiateur	EM	Effets majeurs
ERC	Evénement redouté central		

En pratique, ajouter une barrière sur l'arbre correspond à ajouter un événement "défaillance de la barrière" lié à une porte ET à l'événement qui le précède.

De fait, dans cette présentation, chaque chemin conduisant d'une défaillance d'origine (événement indésirable ou courant) jusqu'à l'apparition de dommages désigne un scénario d'accident particulier pour un événement redouté.

La suite du document présente les moyens mis en œuvre pour la réalisation de ces analyses de risques, ainsi que les méthodes de cotation des événements.



4.2.1 Préparation de l'analyse des risques

4.2.1.1 Equipe d'analyse

L'analyse des risques est réalisée par un groupe de travail composé au minimum de :

- Des représentants de Goro Nickel,
- Des représentants de l'ingénierie :
 - Représentants du département instrumentation,
 - Représentants du département procédé,
 - Représentants du département Environnement et Permis,
- Un "Chairman" des revues Hazop de l'unité en question.

Cette équipe peut être complétée par des intervenants d'autres disciplines comme la mécanique, le génie civil, l'électricité, etc.

L'analyse est donc fondée sur les connaissances et expériences acquises par le groupe de travail sur les éléments suivants :

- Procédés et équipements,
- Produits mis en œuvre,
- Boucles de régulation et boucles de sécurité,
- Gestion des installations et de la sécurité,
- Environnement des installations étudiées.

Tous ces éléments vont alors servir à établir les analyses de risques.

4.2.1.2 Découpage fonctionnel des activités

Afin de simplifier l'analyse de risques et de la rendre plus lisible, un découpage fonctionnel est réalisé. Il peut se faire de la façon suivante :

- Découpage par étape de procédé,
- Découpage par sous-système physique de l'unité,
- Découpage par type d'équipements.

Pour le dernier point, il est en effet possible de traiter dans un même système d'analyse plusieurs équipements identiques d'une même unité, même s'ils ont des utilisations qui peuvent légèrement différer ; comme par exemple des colonnes de lavage de gaz fonctionnant avec de l'eau, à l'acide ou avec des solutions alcalines. Ces équipements ont des fonctionnements similaires seuls certains paramètres et boucles de régulation ou de



sécurité changent. Ils peuvent donc être traités ensembles. Dans ce cas les éventuelles différences seront mentionnées.

4.2.1.3 Intégration des résultats des revues HAZOP

Les analyses de risques sont conduites à partir des PIDs révisés après HAZOP c'est à dire après intégration des actions recommandées lors des revues HAZOP. De ce fait, les analyses de risques portent sur un procédé finalisé.

Rappel :

- Les PIDs sont des diagrammes de procédé et d'instrumentation sur lesquels figurent les équipements du procédé (réservoirs, réacteurs, broyeurs, autoclaves, décanteurs, etc.), les moyens de transfert des produits (pompes, soufflantes, canalisations, conduites, convoyeurs, etc.) et l'instrumentation associée au contrôle commande (capteurs, alarmes, boucles de régulation ou de sécurité, etc.).
- Les HAZOP sont des analyses de risques réalisées lors de l'avancement de la conception des installations afin d'une part de vérifier que les risques potentiels sont pris en compte et que des moyens de prévention, de détection et de limitation des effets sont bien mis en œuvre pour y palier, et d'autre part d'analyser les conséquences sur le procédé d'éventuelles dérives. Ce dernier point ne focalise pas uniquement sur des aspects liés à la sécurité, mais également sur des aspects de production.

Afin de produire les analyses de risques les plus détaillées possibles, les résultats de ces HAZOP sont pris en compte dans les APR sous la forme de causes, de conséquences ou de moyens de prévention ou de limitation des effets.

4.2.2 Analyses de risques

Une fois le découpage des analyses effectué, et les HAZOP et les PIDs disponibles, l'équipe procède à l'analyse de risques des installations visées.

Cette analyse est formalisée dans le tableau suivant :

Tableau 11 : Tableau d'analyse de risques

N°	Evènement Redouté	Causes	Prévention	P	Conséquences	Maîtrise des conséquences	Gravité				Risque						
							E	P	T	M	E	P	T	M			

Le contenu des différentes colonnes est détaillé dans les paragraphes suivants.

4.2.2.1 Détermination des Evènement Redoutés (ER)

Les événements redoutés analysés dans les tableaux sont issus de l'étude des potentiels de dangers. Ils concernent généralement les événements suivants :

- Perte de confinement (d'une capacité, d'un filtre, d'une canalisation, etc.),
- Rupture mécanique de pompe,
- Propagation d'incendie,
- BLEVE, Boil-Over.

D'autres événements peuvent évidemment être considérés.

4.2.2.2 Détermination des causes

Les causes sont les facteurs susceptibles de provoquer seuls ou en combinaison avec d'autres, l'évènement redouté. S'il y a combinaison, on le précise dans les tableaux d'APR par des opérateurs « OU » ou « ET ».

Parmi les causes génériques on retrouve :

- Pression haute,
- Pression basse,
- Température haute,
- Température basse,
- Surremplissage de capacité,
- Défaillances d'équipements ou d'instrumentation de contrôle,
- Défauts ou non-respect de procédures d'exploitation ou de sécurité (erreur humaine),
- Dérivé de procédé,
- Phases de travaux,
- Diverses sources d'agressions d'un équipement (vibrations, échauffements ou d'ignition d'une réaction d'un produit, y compris les sources énergétiques pour les cas d'inflammation, d'explosion, ...).

Note relative aux causes provenant de l'environnement naturel ou humain

Les risques environnementaux et humains sont traités globalement pour le site dans le chapitre 2 de la Section A "Analyse des risques génériques". Ils ne sont donc pas repris comme causes dans les tableaux d'APR.



Note relative aux phases de travaux / démarrage / arrêt / transitoire / situations dégradées

Les phases transitoires de l'exploitation des installations, opérations de maintenance, travaux dans une cuvette de rétention, ...constituent bien souvent la source d'inflammation d'un incendie ou d'une explosion ou une cause d'une perte de confinement ou d'intégrité physique d'un équipement.

Les démarrages ou arrêts d'exploitation sont des événements pouvant, suivant la nature des installations générer des risques particuliers. Ils sont donc traités dans les analyses de risques en tant que causes de dérives ou d'événements redoutés.

Les coups de bélier consécutifs à des fermetures rapides (sectionnement de fuite ou isolement de produit) ne portent pas atteinte à l'intégrité des installations dont la conception est adaptée et associée à des mesures de prévention et de protection décrites.

4.2.2.3 Détermination des conséquences

Les conséquences sont les effets physiques de l'évènement redouté sur des cibles potentielles, non atténués par d'éventuelles mesures de protection (émissions de produit toxique, flux thermiques, surpressions, etc.). Ces conséquences ont généralement des impacts sur l'environnement humain, matériel ou environnemental de l'évènement redouté.

Les conséquences des événements redoutés sont généralement des dispersions ou des épandages de produits pouvant être inflammables, toxiques, corrosifs, etc.

Cas particulier des produits inflammables : pour plus de lisibilité dans les analyses de risques, il a été décidé de traiter les sources d'ignitions comme des événements redoutés à part entière. Ainsi, dans les tableaux d'analyse de risques des autres événements redoutés, les conséquences identifiées sont celles de dispersion ou d'épandage de produits inflammables, pouvant s'enflammer en cas d'apparition de sources d'ignitions, ces dernières auront été établies au préalable.

4.2.2.4 Détermination des mesures de prévention

Les mesures de prévention sont les mesures permettant d'éviter l'apparition des causes de l'évènement redouté. Ces moyens sont de plusieurs types :

- Procédures d'exploitation,
- Boucles de régulations (automatismes de régulation de certains paramètres comme la pression, le niveau, le débit, etc. Il s'agit en fait d'un ensemble de capteurs et de systèmes de contrôle commande),
- Boucles de sécurité (automatisme générant des alarmes et/ou actions de mise en sécurité en cas de dépassement de certains paramètres),
- Inspection et maintenance préventive des équipements,
- Formations des opérateurs,
- Délivrance de permis de travail ou de permis feu,
- Etc.



Certaines installations visées par le présent dossier étant complexes d'un point de vue procédé, mais également d'un point de vue interactions entre les équipements, une attention particulière est portée à la présentation de ces moyens de prévention (les boucles de régulations peuvent impliquer un même paramètre sur de nombreux équipements).

4.2.2.5 Détermination des mesures de maîtrise des conséquences

Les moyens de maîtrise des conséquences sont les moyens mis en œuvre pour d'une part détecter l'occurrence de l'événement redouté ou de ces conséquences, et d'autre part protéger l'environnement humain, matériel et environnemental des installations concernées.

Mesures de détection

Il s'agit des mesures permettant de détecter l'apparition de l'événement redouté, de ses causes ou des phénomènes dangereux associées aux conséquences. Cette détection peut se faire grâce à :

- De l'instrumentation et des automatismes associés,
- Des détecteurs permettant de mettre en évidence la présence, en "extérieur" de produits dangereux,
- Des rondes opérateurs,
- Etc.

Mesures de protection

Il s'agit des mesures permettant de limiter la portée des conséquences de l'évènement redouté. Ces mesures sont généralement :

- Des installations physiques passives (rétention, murs coupe-feu, etc.)
- Des moyens d'intervention contre les incendies, les dispersions de produits toxiques, etc. (matériel, procédures, etc.),
- Etc.

4.2.2.6 Cotation du niveau de probabilité

La probabilité d'occurrence de l'événement redouté (colonne P) est évaluée de manière **semi-quantitative** en tenant compte des mesures de prévention existantes.

L'indice de probabilité P est donc estimé, soit, si ces données sont disponibles, à partir de l'accidentologie du site étudié et des autres sites industriels d'activités similaires, soit à partir du retour d'expérience du groupe d'analyse, soit à partir des probabilités de défaillance des mesures de prévention. Cette cotation n'est donc pas quantitative dans le sens où elle n'est pas fondée sur une valeur exacte de probabilité, mais sur un ordre de grandeur de cette probabilité. Cet ordre de grandeur correspondant à celui du tableau ci-après.

L'évaluation de cette probabilité est réalisée en se basant sur le tableau suivant :

Tableau 12 : Echelle de probabilité

Niveau de probabilité	Détail de la Probabilité		
	5	Fréquent	Se produit de façon récurrente sur des installations comparables
4	Probable	S'est déjà produit quelques fois sur des installations comparables	De 10^{-3} à $10^{-2} / \text{an}$
3	Peu probable	A été rapporté une fois sur des installations comparables	De 10^{-4} à $10^{-3} / \text{an}$
2	Rare	A pu être observé une fois sur des installations comparables	De 10^{-5} à $10^{-4} / \text{an}$
1	Extrêmement rare	N'a jamais été observé ni rapporté nulle part	$< 10^{-5} / \text{an}$

Ainsi, à chaque événement redouté, un niveau de probabilité, compris en 1 et 5 sera associé. Ce niveau de probabilité, croisé avec le niveau de gravité permettra ultérieurement de déterminer la criticité de l'événement redouté.

4.2.2.7 Cotation du niveau de gravité

La gravité des conséquences de l'évènement redouté (colonne G) est également évaluée de manière **semi-quantitative** compte tenu des barrières de maîtrise des conséquences (mesures de détection et de protection) existantes dans l'installation.

L'indice de gravité inscrit dans les tableaux, est évalué au stade des analyses de risques, de façon intuitive, soit en appréciant les résultats de l'étude accidentologique soit à partir du retour d'expérience du groupe d'analyse.

Notons que seule une modélisation permet d'évaluer avec "précision" les conséquences des phénomènes physiques d'un événement redouté, cependant, à ce stade de l'étude de dangers, une évaluation précise des conséquences ne présente aucun intérêt au vu du très grand nombre d'événements redoutés considéré (bien que ce nombre soit limité à son minimum grâce à l'identification des potentiels de dangers). De plus l'objet de l'analyse de risques est aussi d'identifier les scénarios d'accidents nécessitant une évaluation précise de leurs conséquences.

Le niveau de gravité est défini pour l'impact sur 4 catégories :

- Les personnes à l'extérieur de l'établissement, ceux dénommés par la suite comme "populations",
- Les travailleurs à l'intérieur de l'établissement,
- Les biens,
- L'environnement.

En effet, pour un même phénomène dangereux, l'impact sur chacune de ces catégories ne sera pas le même ; par exemple l'environnement et les hommes peuvent être plus facilement impacté par la dispersion d'un produit toxique qui n'a aucun impact sur le matériel. Le tableau suivant donne les critères de cotation de la gravité pour chacune de ces catégories.

Tableau 13 : Critères de gravité en fonction des catégories

	Gravité				
	1	2	3	4	5
Personnel présent dans l'établissement ►	Pas d'effets létaux ou premiers effets irréversibles	Premiers effets létaux ou effets irréversibles peu étendus	Effets létaux ou irréversibles peu étendus	Effets létaux ou irréversibles étendus	Effets létaux ou irréversibles largement étendus
Personne hors établissement (riverains, ERP ou voies de circulation) ►					
Matériel ►	Pas de dommage	Dommage matériel mineur réparable	Dommages irréparables limité aux équipements de l'unité	Dommages affectant les unités adjacentes (effet domino possible)	Dommages étendus – Dommages en dehors des limites du site
Dommages sur l'environnement naturel ►	Pollution négligeable - Pas d'impact significatif* sur l'environnement – retour à l'état initial quasi immédiat	Impact significatif sur l'environnement et nécessitant des travaux de dépollution minimales – récupération dans une cuvette de rétention étanche	Atteintes sévères à l'environnement limité au site – récupération en bassin de contrôle - nécessitent des travaux importants de dépollution (retour état initial < 1 an)	Atteintes majeures à des zones vulnérables hors du site avec répercussions à l'échelle locale - nécessitent des travaux lourds de dépollution (retour état initial > 1 an)	Atteintes catastrophiques dans une zone largement étendue hors du site - effets irréversibles nécessitant des travaux lourds de dépollution (dépollution > 5 ans)

Pour la catégorie des "Personnes hors établissement (riverains, ERP ou voies de circulation)" mais aussi pour le "personnel présent dans l'établissement", le détail de chaque niveau de gravité est défini dans la grille de critères de l'annexe III de l'arrêté du 29 septembre 2005 présentée ci-après.

Tableau 14 : Echelle d'appréciation de la gravité des conséquences humaines d'un accident à l'extérieur des installations

Niveau de gravité des conséquences		Zone délimitée par le seuil des effets létaux significatifs	Zone délimitée par le seuil des effets létaux	Zone délimitée par le seuil des effets irréversibles sur la vie humaine
5	Désastreux	Plus de 10 personnes exposées (1).	Plus de 100 personnes exposées.	Plus de 1 000 personnes exposées.
4	Catastrophiques	Moins de 10 personnes exposées.	Entre 10 et 100 personnes.	Entre 100 et 1 000 personnes exposées.
3	Important	Au plus 1 personne exposée.	Entre 1 et 10 personnes exposées.	Entre 10 et 100 personnes exposées.
2	Sérieux	Aucune personne exposée.	Au plus 1 personne exposée.	Moins de 10 personnes exposées.
1	Modéré	Pas de zone de létalité en dehors de l'établissement		Présence humaine exposée à des effets irréversibles inférieure à "une personne".

(1) personne exposée : en tenant compte le cas échéant des mesures constructives visant à protéger les personnes contre certains effets et la possibilité de mise à l'abri des personnes en cas d'occurrence d'un phénomène dangereux si la cinétique de ce dernier et de la propagation de ses effets le permettent.

Ainsi, comme pour la probabilité, à chaque événement redouté, un niveau de gravité compris entre 1 et 5 est attribué. Ces éléments vont permettre de déterminer la criticité d'un événement redouté.

4.2.2.8 Cotation du niveau de criticité

La criticité de l'évènement redouté peut être définie comme étant un couple Gravité / Probabilité. Elle est estimée en tenant compte des mesures de prévention, détection et protection. Les critères d'évaluation des niveaux de probabilité P et de gravité G retenus par le projet sont présentés auparavant.

Ainsi, chaque évènement redouté, auquel on a associé une probabilité d'occurrence et une gravité aux conséquences de ses phénomènes dangereux, est positionné dans la matrice de criticité présentée ci-après. C'est-à-dire que le numéro de l'évènement redouté (par exemple 6.11 - système n°6, évènement N°11) est positionné dans la matrice, à l'intersection de la ligne correspondant à sa probabilité d'occurrence et de la colonne correspondante au niveau de gravité des conséquences des ses phénomènes dangereux.

Tableau 15 : Matrice de probabilité / gravité / criticité des risques

Probabilité						
Fréquent	5	51	52	53	54	55
Probable	4	41	42	43	44	45
Peu probable	3	31	32	33	34	35
Rare	2	21	22	23	24	25
Extrêmement rare	1	11	12	13	14	15
		1	2	3	4	5
		Mineure	Significative	Sévère	Critique	Catastrophique
		Gravité				

	Risques acceptables
	Risques à surveiller
	Risques inacceptables

Suivant son positionnement dans la matrice de probabilité / gravité / criticité des risques ci-dessus, la criticité du risque de l'évènement redouté est « acceptable », « à surveiller » ou « inacceptable ».

Cette grille va permettre par la suite de sélectionner les évènements redoutés pouvant conduire à des scénarios d'accident devant être analysés en détail. Cette sélection est détaillée ultérieurement, dans la partie "Sélection des accidents majeurs".

4.2.2.9 Matrice de travail

Afin de faciliter le travail de cotation des événements redoutés, une matrice de travail, regroupant l'ensemble des matrices précédemment établies pour les cotations et la criticité, a été établie. Elle est donnée ci-après :

Tableau 16 : Matrice finale de travail

Probabilité							
Evènement	Description	Fréquence	1	2	3	4	5
Evènement Fréquent > 10 ⁻² / an	Se produit de façon récurrente sur des installations comparables	5	51	52	53	54	55
Evènement Probable 10 ⁻³ à 10 ⁻² / an	S'est déjà produit quelques fois sur des installations comparables	4	41	42	43	44	45
Evènement Peu probable 10 ⁻⁴ à 10 ⁻³ / an	A été rapporté une fois sur des installations comparables	3	31	32	33	34	35
Evènement Rare 10 ⁻⁵ à 10 ⁻⁴ / an	A pu être observé une fois sur des installations comparables	2	21	22	23	24	25
Evènement Extrêmement rare < 10 ⁻⁵ / an	N'a jamais été observé ni rapporté nulle part	1	11	12	13	14	15
			1	2	3	4	5
			Mineure	Significative	Sévère	Critique	Catastrophique
			Gravité				
Personnel présent dans l'établissement ▶	Pas d'effets létaux ou premiers effets irréversibles ▶ Pas de zones de létalité hors du site ▶ Présence humaine exposée à des effets irréversibles inférieure à 1 pers.	Premiers effets létaux ou effets irréversibles peu étendus pers. exposées ▶ SEI < 10 ▶ au plus 1 pers. exposées au SEL ▶ 0 pers. exposée au SELS	Effets létaux ou irréversibles peu étendus ▶ 10< pers. exposées SEI < 100 ▶ 1< pers. exposées SEL < 10 ▶ 1 pers. exposée au plus au SELS	Effets létaux ou irréversibles étendus : ▶ 100< pers. exposées SEI < 1000 ▶ 10< pers. exposées SEL < 100 ▶ pers. exposées SELS < 10	Effets létaux ou irréversibles largement étendus : ▶ > 1000 pers. exposées au SEI OU ▶ > 100 pers. exposées au SEL OU ▶ > 10 pers. exposée au SELS		
Personne hors établissement (riverains, ERP ou voies de circulation) ▶							
Matériel ▶	Pas de dommage	Dommage matériel mineur réparable	Dommages irréparables limités aux équipements de l'unité	Dommages affectant les unités adjacentes (effet domino possible)	Dommages étendus – Dommages en dehors des limites du site		
Dommages sur l'environnement naturel ▶	Pollution négligeable - Pas d'impact significatif sur l'environnement – retour à l'état initial quasi immédiat	Impact significatif sur l'environnement et nécessitant des travaux de dépollution minimes – récupération dans une cuvette de rétention étanche	Atteintes sévères à l'environnement limité au site – récupération en bassin de contrôle - nécessitent des travaux importants de dépollution (retour état initial <1 an)	Atteintes majeures à des zones vulnérables hors du site avec répercussions à l'échelle locale - nécessitent des travaux lourds de dépollution (retour état initial > 1 an)	Atteintes catastrophiques dans une zone largement étendue hors du site - effets irréversibles nécessitant des travaux lourds de dépollution (dépollution > 5 ans)		



4.2.2.10 Cas particulier des sources d'ignition

Comme il a été vu précédemment, les sources d'ignitions sont traitées dans un tableau à part, avant les autres événements redoutés. Ce tableau est le suivant :

Tableau 17 : Tableau d'analyse des sources d'ignition

Sources d'ignition	Causes	Prévention	P	Conséquences

Dans ce tableau, pour chaque type de sources d'inflammation (températures hautes, étincelles, etc.) on présente les causes possibles :

- Points chauds,
- Incendie,
- Electricité statique,
- foudre,
- défaut électrique,
- etc.

Et pour chaque cause, on détaille les moyens de prévention mis en oeuvre.

Une cotation de la probabilité d'occurrence de la source d'ignition est également établie sur la même base de cotation que présentée précédemment.

Enfin la dernière colonne permet de présenter les conséquences de ces sources d'ignition, à savoir :

- Ignition d'incendie,
- Ignition de nuages explosifs,
- etc.

4.3 SELECTION DES SCENARIOS D'ACCIDENTS MAJEURS

4.3.1 Définition

La notion d'accident majeur est définie de façon réglementaire dans l'article 2 de l'arrêté du 10 mai 2000. Cette définition reprenant les éléments présentés dans la directive 96/82/CE dite SEVESO II est reportée ci-dessous

Accident majeur : un évènement tel qu'une émission, un incendie ou une explosion d'importance majeure résultant de développements incontrôlés survenus au cours de l'exploitation, entraînant pour la santé humaine ou pour l'environnement, à l'intérieur ou à l'extérieur de l'établissement, un danger grave, immédiat ou différé, et faisant intervenir une ou plusieurs substances dangereuses.

L'INERIS dans son rapport Ω - 6 "Eléments importants pour la sécurité (EIPS)" propose la définition suivante :

Scénario d'accident majeur : Séquence d'évènements qui, s'ils ne sont pas maîtrisés, s'enchaînent ou se combinent jusqu'à l'apparition de dommages majeurs au niveau des cibles de l'environnement.

4.3.2 Méthodologie de sélection

Comme il a été vu précédemment, l'ensemble des événements redoutés ayant été coté, chacun d'eux est positionné dans la matrice de criticité de la façon suivante.

Tableau 18 : Classification des accidents

Probabilité	5					
	4					
	3		ER7		ER5, ER1	
	2		ER2	ER3	ER6	
	1			ER8	ER4	
		1	2	3	4	5
		Gravité				

Où ER est l'Evènement Redouté.

Ainsi, il apparaît que certains événements redoutés se trouvent considérés *à priori* comme "à surveiller" voire même "inacceptables". Ces événements redoutés, situés dans les zones jaunes et rouges de la matrice seront ceux qui donneront lieu à des scénarios d'accident majeur, dont les conséquences vont être analysées en détail.

D'autres scénarios susceptibles d'avoir des conséquences sur les équipements voisins (effets dominos internes à l'unité) pourront également faire l'objet d'évaluations détaillées ; ils seront discutés au cas par cas.

4.3.3 Sélection des scénarios majeurs retenus

Au terme, un certain nombre d'évènements redoutés peut conduire à des scénarios d'accidents majeurs, dont certains seront identiques.



Par exemple, plusieurs événements redoutés peuvent concerner des pertes de confinement de produits inflammables, de catégories identiques, situés dans une même rétention. Ainsi, les conséquences de ces événements redoutés seront, entre autre, des feux de cuvette. Il peut donc être envisagé de ne traiter qu'un seul scénario de feu de cuvette, celui dont l'épandage de liquide couvrira la plus grande zone de la cuvette ou dont le produit possède la flamme la plus rayonnante.

Au final l'ensemble des événements redoutés pourra être traité par un nombre réduit de scénarios, mais couvrant l'ensemble des installations.

Cette sélection des scénarios permet donc d'apporter à l'étude de dangers une meilleure lisibilité sans pour autant se faire au détriment du contenu technique des études. Aucun scénario, ni aucun événement redouté n'est écarté de l'étude sans justification.

5 EVALUATION DES CONSEQUENCES SUR L'ENVIRONNEMENT

5.1 METHODOLOGIE GENERALE

L'analyse des potentiels de dangers et l'analyse des risques ont permis :

- D'identifier les principaux risques liés aux produits (le risque d'explosion, le risque d'incendie et le risque de relâchement d'un nuage de gaz toxique),
- D'identifier les équipements critiques,
- D'identifier les potentiels de dangers,
- D'identifier les événements redoutés,
- D'identifier les causes des événements redoutés, ainsi que leurs moyens de prévention,
- D'identifier les conséquences des événements redoutés, ainsi que les moyens de limitation des effets.

L'analyse **quantitative** a pour objet l'évaluation précise et quantifiée des effets des scénarios d'accident majeurs retenus :

- La modélisation des conséquences des scénarios d'accidents majorants,
- L'attribution d'un niveau de risque quantitatif pour chaque scénario étudié, défini par un couple niveau de gravité / niveau de probabilité.

L'analyse quantitative doit ainsi permettre la confrontation des scénarios avec les mesures de prévention, de protection et d'intervention, et la définition de mesures compensatoires éventuelles, jusqu'à atteindre un niveau de risque acceptable.

5.1.1 Description des types de scénarios retenus

Il est donc nécessaire de procéder à l'évaluation détaillée des phénomènes physiques des événements redoutés, qui dans le cas de ce dossier sont les suivants :

- Feu de nappe et de cuvette,
- Explosion de nuages de gaz confiné ou non confiné,
- Dispersion de produits toxiques gazeux ou sous forme de brouillard,
- Eclatements de capacités sous pression ou d'éléments mécaniques en rotation,
- Feu de solides.



A ces scénarios sont associés des phénomènes physiques tels que :

- Effets thermiques,
- Effets de surpression,
- Effets toxiques,
- Des effets projectiles.

Ce sont ces phénomènes physiques qui seront évalués, et pour chacun d'entre eux les distances d'effets aux seuils réglementaires seront données. Ils peuvent engendrer des dommages ou dégâts sur des cibles potentielles que sont les êtres humains, les constructions, les biens, l'environnement.

Les seuils réglementaires associés à ces effets sont donnés dans le paragraphe suivant.

5.1.2 Seuils réglementaires

5.1.2.1 Références

Pour déterminer les seuils à appliquer pour ce projet, les textes suivants ont été pris comme références:

- Arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation,
- Arrêté du 22 octobre 2004 relatif aux valeurs de référence de seuils d'effets des phénomènes accidentels des installations classées,
- Guide technique relatif aux valeurs de référence de seuils d'effets des phénomènes accidentels des installations classées - Version Octobre 2004 – INERIS,
- Rapports d'étude sur la toxicité de certains produits – INERIS :
 - Seuils de Toxicité Aiguë - Acide chlorhydrique (HCl) - Janvier 2003
 - Seuils de Toxicité aiguë - Acide sulfurique - 03/06/2005
 - Seuils de Toxicité aiguë - Dioxyde de soufre - 03/06/2005



5.1.2.2 Effets de surpression

1) *Seuil des dégâts très graves sur les structures*

Le seuil défini par l'arrêté du 22 octobre 2004 est :

$$\underline{\Delta p^+ = 30\ 000\ Pa}$$

Si l'on tient compte des pressions réfléchies et dynamiques. Ce seuil, qui est une surpression positive incidente, correspond à une charge d'environ $7\ t/m^2$ pour des équipements ou structures offrant une surface plate normale à la direction de propagation de l'onde de souffle.

2) *Seuil des effets Dominos*

Le seuil retenu pour l'étude des effets dominos est :

$$\underline{\Delta p^+ = 20\ 000\ Pa}$$

Il correspond aux effets sur les structures métalliques légères, mais également au seuil des effets létaux significatifs correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine (effets létaux pour 5% des personnes impactées).

3) *Seuil des premiers effets létaux correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine*

Le seuil correspond à l'effet létaux indirect. La létalité est engendrée par la chute d'un missile ou autre matériau, la mise en mouvement du corps de la victime, ou l'effondrement de toits ou de murs. Le seuil défini par le SEI pour une surpression positive limite est de :

$$\underline{\Delta p^+ = 14\ 000\ Pa}$$

4) *Seuil des effets irréversibles correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine*

Ce seuil correspond aux blessures dues à des effets secondaires de la surpression et dégâts réparables. Ces blessures sont principalement causées par des fragments de vitres brisées. Le seuil défini par l'arrêté du 22 octobre 2004 est :

$$\underline{\Delta p^+ = 5\ 000\ Pa}$$

Il correspond également à des dégâts mineurs aux maisons d'habitation : dégâts occasionnels à l'huissierie des portes et fenêtres, vitres brisées.



5) *Seuil des effets irréversibles correspondant à la zone des effets indirects par bris de vitre sur l'homme*

Ce seuil correspond aux blessures à caractère réversible et dégâts réparables aux habitations. Par blessures à caractère réversible, on peut citer les brûlures du premier degré, les coupures cicatrisables dues aux éclats de verre, et les contusions bénignes.

Le seuil de surpression positive représentatif de cet effet est de :

$$\Delta p^+ = 2\,000\text{ Pa}$$

Ce seuil correspond également à des dégâts mineurs aux maisons d'habitation : bris de vitres, chute de tuiles, effondrement de faux plafonds. Son calcul est obtenu de manière simple en doublant la distance des effets à 5 000 Pa (5 kPa).

5.1.2.3 Effets thermiques

L'intensité radiative suffisante pour causer des dégâts aux équipements des unités est supérieure aux rayonnements possibles sur des feux d'hydrocarbures.

1) *Seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures*

Il correspond au seuil des dégâts très graves sur les structures béton. Le seuil retenu par le SEI est le suivant :

$$\Phi = 20\text{ kW/m}^2$$

2) *Seuil d'exposition prolongée des structures*

Il correspond au seuil des dégâts très sur les structures, hors structures béton. Le seuil retenu par le SEI est le suivant :

$$\Phi = 16\text{ kW/m}^2$$

3) *Seuil des effets Dominos*

Il correspond au seuil de dégâts graves sur les structures. Le seuil retenu par le SEI est le suivant :

$$\Phi = 8\text{ kW/m}^2$$

Il correspond également au seuil des effets létaux significatifs correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine (effets létaux pour 5% des personnes impactées).



4) *Seuil des premiers effets létaux*

Il correspond à la zone des dangers graves pour la vie humaine.

Le critère, retenu par le SEI, de risque léthal pour une exposition de 60 secondes sur la peau nue sans protection est de :

$$\Phi = 5 \text{ kW/m}^2$$

Le critère retenu par l'UFIP pour le seuil de charge thermique en provenance d'une boule de feu correspondant à un seuil de létalité 1% est de :

$$I = 1\,912 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3} \cdot \text{s}$$

Le critère retenu par le SEI pour le seuil de charge thermique en provenance d'une boule de feu correspondant à un seuil de létalité 1% est de :

$$I = 1\,000 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3} \cdot \text{s}$$

Le seuil $I = 1\,000 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3} \cdot \text{s}$ est retenu comme seuil des effets létaux pour l'étude des phénomènes de feu flash.

Il correspond également au seuil des destructions de vitres significatives.

5) *Seuil des effets irréversibles*

Il correspond à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine comme les blessures dues à des effets secondaires de la surpression et dégâts réparables

L'UFIP et le SEI considèrent comme seuil représentatif des brûlures du 1er degré correspondant à une exposition de 60 secondes sur la peau nue sans aucune protection :

$$\Phi = 3 \text{ kW/m}^2$$

Il correspond également à des dégâts mineurs aux maisons d'habitation : dégâts occasionnels à l'huissierie des portes et fenêtres, vitres brisées.

Les critères retenus par l'UFIP pour les seuils de charge thermique en provenance d'une boule de feu correspondant à l'apparition de brûlures est de :

$$I = 1\,168 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3} \cdot \text{s} \quad \text{Pour les brûlures du second degré}$$

$$I = 390 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3} \cdot \text{s} \quad \text{Pour les brûlures du premier degré}$$

Les critères retenus par le SEI pour les seuils de charge thermique en provenance d'une boule de feu correspondant à l'apparition de brûlures est de :

$$I = 600 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3} \cdot \text{s} \quad \text{Pour les brûlures du second degré}$$

Le seuil $I = 600 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3} \cdot \text{s}$ est retenu comme seuil des effets létaux pour l'étude des phénomènes de feu flash.



5.1.2.4 Effets toxiques

1) *Seuils des effets létaux significatifs :*

La concentration maximale dans l'air pour un temps d'exposition de 30 min, à partir de laquelle on observe 5 % de létalité parmi les personnes exposées, est de

- 140 ppm pour l'acide sulfurique H_2SO_4
- 1025 ppm pour le dioxyde de soufre SO_2

2) *Seuil des effets létaux*

La concentration maximale dans l'air pour un temps d'exposition de 30 min, à partir de laquelle on observe 1 % de létalité parmi les personnes exposées, est de :

- 470 ppm pour l'acide chlorhydrique HCl
- 98 ppm pour l'acide sulfurique H_2SO_4
- 866 ppm pour le dioxyde de soufre SO_2

3) *Seuils des effets irréversibles*

La concentration maximale dans l'air pour un temps d'exposition de 30 min, à partir de laquelle on n'observe pas d'effets irréversibles chez la majorité des sujets exposés, est de :

- 80 ppm pour l'acide chlorhydrique HCl
- 11 ppm pour l'acide sulfurique H_2SO_4
- 96 ppm pour le dioxyde de soufre SO_2

5.1.2.5 Effets liés à l'impact d'un projectile ou "effets missiles"

L'impact d'un projectile est quantifié pour les types de missile suivants :

- Missile de 100 kg
- Calotte d'une capacité sous pression



Il est important de relativiser les résultats de modélisation des effets missiles car :

- en terme de gravité, il est très difficile de prendre en compte simultanément l'influence des paramètres, masse du missile, direction et angle d'éjection, forme, etc. De plus, il est également complexe de prévoir les effets du missile sur sa cible.
- en terme de probabilité, ce phénomène fait suite à un éclatement de capacité, scénario très peu probable, et l'impact du missile se fait en un point précis : la probabilité d'impact sur un point est donc extrêmement faible.

Au vu de ces éléments, ces effets, liés à la projection des projectiles sont évalués, mais non pris en compte dans l'analyse des effets domino.

5.2 METHODE DE QUANTIFICATION DES EFFETS

Cette partie permet d'exposer les méthodes qui sont utilisées pour l'évaluation des effets des phénomènes précédemment exposés.

Elle est structurée de la façon suivante :

- Calcul du débit à la brèche et du temps de fuite (nécessaire pour estimer les quantités de produits mises à l'air libre, ainsi que les débits gazeux et ou liquides alimentant soit les dispersions de produits soit les nappes de liquides),
- Calcul de dispersion atmosphérique (calculs de dispersion de gaz pouvant être soit toxiques, soit inflammables),
- Calculs d'explosion (calculs des effets d'explosions de nuages de gaz dispersé, ces explosions pouvant être confinées ou non),
- Calculs de feux (calculs des feux de nappe ou de cuvette, des feux flash ou des feux torches),
- Calculs d'effets projectiles.

Ces méthodes sont présentées dans les parties suivantes.

5.2.1 Débit à la brèche - Temps de fuite

5.2.1.1 Déroulement d'une rupture de ligne

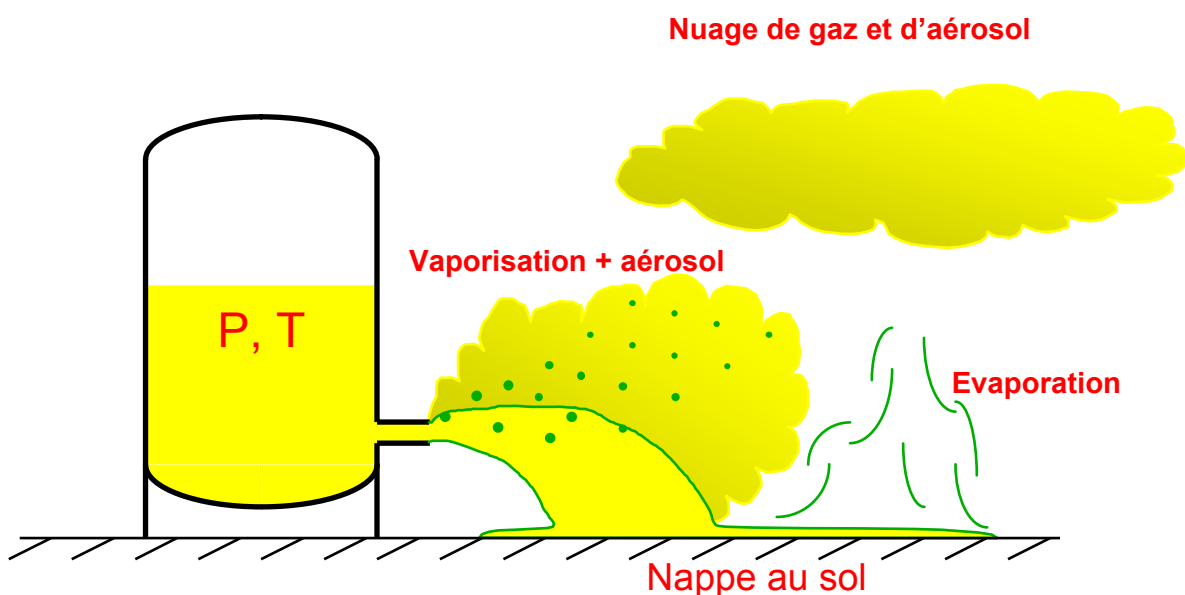
En cas de rupture ou de brèche sur une ligne il y a rejet du fluide contenu dans le système amont. Suivant la nature du fluide, les conditions de température et de pression dans le système amont et suivant la localisation de la brèche, le « débit à la brèche » peut être :

- Tout gazeux,
- Tout liquide,
- Mixte, c'est à dire qu'une partie sort à l'état gazeux et l'autre à l'état liquide.

Après la brèche le fluide rejeté peut changer d'état, suivant les conditions de température et de pression atteintes à la brèche. Une partie du liquide rejeté à la brèche peut se vaporiser après la brèche et entraîner avec lui, sous forme de fines gouttelettes, une partie du liquide non vaporisé ; ce phénomène revient à prendre en compte la vaporisation partielle (ou parfois totale) du liquide. Dans le cas d'une vaporisation partielle, la formation d'un aérosol (mélange de gaz et de fines gouttelettes de liquides) est souvent observée. Le débit de gaz rejeté à la brèche, celui généré par vaporisation du liquide après la brèche, ainsi que celui de liquide présent dans l'aérosol, une fois additionnés forment le « débit de gaz après la brèche » qui participe directement à la formation du nuage de gaz dérivant.

En simplifiant, le liquide restant (qui n'est ni vaporisé, ni présent dans l'aérosol) retombe au sol et forme une nappe de liquide en extension ; cette nappe, sous certaines conditions, peut s'évaporer et donner lieu à un troisième débit de gaz. Ce débit est cependant presque toujours négligeable devant les débits de gaz cités ci avant, sauf si ces derniers sont nuls ou très faibles (cas du débit liquide à la brèche sans vaporisation après la brèche). La figure ci-dessous résume l'ensemble des phénomènes mis en jeu.

Figure 2 : Schéma des phénomènes mis en jeu suite à une rupture de ligne



P : Pression, *T* : température

Suivant les conditions à la brèche et le fluide relâché, il peut y avoir un débit tout liquide à la brèche et, après la brèche, un phénomène de vaporisation, avec ou sans formation d'aérosol ; il peut aussi n'y avoir ni vaporisation ni formation d'aérosol après la brèche. La nappe au sol peut ou non donner lieu à un phénomène d'évaporation.

5.2.1.2 Description des types de scénarios retenus

Pour chaque équipement critique identifié, les scénarios appliqués sont décrits ci-après.

Pour chaque ligne retenue deux types de rupture ont été envisagés, correspondant à des causes différentes.

- Des ruptures 50% pour des lignes d'un diamètre supérieur à 50 mm (DN50 / 2 pouces), correspondant à une brèche de surface équivalent à 50% de la section droite de la ligne. Les causes de rupture de ligne de ce diamètre peuvent être soit une surpression interne, soit de la corrosion, soit une érosion, fatigue ou vieillissement de la métallurgie, soit un défaut de fabrication.
- Des ruptures guillotine double pour toutes les autres lignes.

Lorsque les lignes ont un diamètre de moins de 50 mm (DN50 - 2 pouces) les causes précédemment citées pour les ruptures 50% sont applicables.

Pour ce qui concerne les lignes de diamètre supérieur, les causes précitées ne peuvent expliquer des ruptures de type 100%. En effet, les inspections réalisées périodiquement sur les lignes, via le service Inspection de la raffinerie, garantissent la non possibilité de ce type de rupture.

Ainsi, les causes retenues pour les ruptures guillotine sur les lignes supérieures à 50 mm sont des causes d'origine extérieure au procédé. Les causes suivantes peuvent être listées :

- suite à effet domino,
- suite à un séisme,
- suite à un arrachement direct de la ligne par un véhicule ou un engin,
- suite à une chute d'avion,
- ou encore suite à un acte de malveillance.

Pour chaque capacité sélectionnée : le phénomène d'éclatement a été envisagé, lorsque cela s'applique ; on considère la perte totale et instantanée du confinement de l'enceinte sous pression ou de la capacité.

5.2.1.3 Définition du type de brèche sur une ligne

1) **Brèche guillotine**

Il s'agit d'une brèche de surface égale à la section droite de la ligne. La section de la brèche A_b s'écrit ainsi :

$$A_b^{100\%} = \pi \frac{D^2}{4} \text{ Avec } D, \text{ le diamètre de la ligne.}$$

Le coefficient de débit vaut : $CF=0.9$

2) **Brèche longitudinale 50% de la section droite**

Il s'agit d'une brèche de surface égale à la moitié de la section droite de la ligne. La section de la brèche A_b s'écrit ainsi :

$$A_b^{50\%} = \frac{1}{2} \pi \frac{D^2}{4} = \pi \frac{D_{eq}^2}{4} \quad \text{avec} \quad D_{eq} = \frac{D}{\sqrt{2}} \text{ Avec } D, \text{ le diamètre de la ligne.}$$

Le coefficient de débit vaut : $CF=0.61$

5.2.1.4 Méthode de calcul des débits à la brèche

Par débit à la brèche on entend la masse de fluide accidentel traversant la section ou orifice de la brèche par unité de temps. Ce débit dit à la brèche ne doit pas être confondu avec ce que nous appelons le débit après la brèche qui fait le bilan de ce qui flashe, s'évapore, forme un aérosol ou développe une nappe liquide sous conditions ambiantes, une fois relâché à l'atmosphère.

Pour ce dossier, la quantification de 3 types de débit à la brèche a été prise en considération:

- Débit à la brèche en phase liquide seule
- Débit à la brèche en phase gazeuse ou vapeur seule
- Débit à la brèche diphasique, consécutif à la brèche, le débit de service avant la brèche étant en phase liquide seule.

La démarche du calcul s'effectue en deux étapes :

- Calcul du débit maximum à la brèche sous conditions atmosphériques,
- Calcul du temps de vidange du système sous ce débit maximum.

Bien que le relâchement diminue en terme de débit (et de composition) au cours de la phase de dépressurisation, celui-ci est simulé comme étant à débit et composition constants, correspondant aux conditions initiales. Cette approche simplifiée reste majorante.

Les débits à la brèche sont calculés selon la méthode UFIP 2002.

Par ailleurs, les débits à la brèche dans Phast sont ajustés pour correspondre à ceux calculés avec la méthode UFIP.

Les paragraphes suivants présentent les méthodes de calcul du débit maximum à la brèche sous conditions atmosphériques.

1) **Débit à la brèche en phase gazeuse seule**

DEBIT A LA BRECHE GAZEUX SOUS-CRITIQUE

L'écoulement est considéré comme sous-critique pour $P_{SER} < P_c$ (Pression Critique). Ainsi, pour un tel écoulement, le débit à la brèche est calculé de la façon suivante :

$$DBREG = C_F A_b DENS_G (T_{SER}) \left(\frac{P_{ATM}}{P_{SER}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{\frac{2\gamma P_{SER}}{(\gamma - 1) DENS_G (T_{SER})} \left[1 - \left(\frac{P_{ATM}}{P_{SER}} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right]}$$

Avec :

- DBREG : Débit à la BRÈche Gazeux,
- DENS_G : DENSité du Gaz
- P_{ATM} : Pression ATMosphérique
- P_{SER} : Pression SERvice
- T_{SER} : Température de SERvice
- C_d : Coefficient de décharge
- A_b : Section de fuite
- γ : rapport des chaleurs spécifiques de la phase gazeuse ou vapeur

DEBIT A LA BRECHE GAZEUX CRITIQUE OU SONIQUE

Le débit à la brèche en phase gazeuse sera critique ou sonique si $PSER \geq Pc$. Ainsi, pour un tel écoulement, le débit à la brèche est calculé de la façon suivante :

$$DBREG = C_F A_b \sqrt{\gamma DENS_G (T_{SER}) \times PSER \left[\frac{2}{\gamma + 1} \right]^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}}$$

2) Débit à la brèche en phase liquide seule

Dans le cas d'une brèche en phase liquide, le débit à la brèche liquide se calcule de la façon suivante :

$$DBREL = C_F A_b DENS_L(T_{SER}) \sqrt{2 \left\{ \left[\frac{(PSER - PATM)}{DENS_L(T_{SER})} \right] + g\Delta h - g\phi \right\}}$$

Avec :

- DBREL : Débit à la Brèche Liquide,
- DENS_L : DENSité du Liquide,
- PATM : Pression ATMosphérique,
- PSER : Pression SERvice,
- T_{SER} : Température de SERvice,
- Φ : perte de charge dans la tuyauterie.

3) Débit à la brèche en phase mixte

Il s'agit d'un système qui est diphasique (une phase gazeuse et une phase liquide) sous conditions opératoires normales. Deux cas doivent être envisagés :

CAS D'UNE PHASE LIQUIDE NON SURCHAUFFEE

Ce cas est observé lorsque : $T_{SER} < T_{BUL}$. Le débit à la brèche s'exprime alors ainsi :

$$DBRE = C_F A_b u_2 DENS_M(T_{SER})$$

$$\begin{aligned} DBREL &= (1 - X_{GM}) DBRE \\ DBREG &= X_{GM} DBRE \end{aligned}$$



Avec :

- TBUL : Température d'éBULLition,
- DBRE : Débit à la BRÈche,
- DENSM : DENsité Mixte,
- X_{GM} : fraction massique vapeur,
- TSER : Température de SERvice,
- u_2 : vitesse d'écoulement lors de la brèche.

CAS D'UNE PHASE LIQUIDE SURCHAUFFEE

Ce cas est observé lorsque les conditions suivantes sont remplies

- $TSER \geq TBUL$
- $L \geq 12.D$
- $A_b / D^2 \geq 0.35$

Le débit à la brèche s'exprime alors ainsi :

$$DBRE = C_F A_b DENSM(TSER)u_2$$

$$DBREG = (X_{GM} + XX(1 - X_{GM}))DBRE$$
$$DBREL = DBRE - DBREG$$

Avec :

- L : longueur de la tuyauterie,
- XX : fraction de la phase liquide du mélange diphasique qui va flasher avant la brèche.

4) débit à la brèche au refoulement d'un compresseur

On calcule un débit à la brèche en phase gazeuse ou vapeur :

$$DBREG = Q_C \times (1 + X_C)$$

Avec :

- Q_C : débit nominal du compresseur,
- $X_C = 0$ si le compresseur est de type volumétrique,
- $X_C = k$ si le compresseur est de type centrifuge.

$$\frac{PASP}{PATM} = 1$$



Avec : $k = 0.8$ pour

$$k = 1.2 \text{ pour } \frac{PASP}{PATM} > 1$$

5) débit à la brèche au refoulement d'une pompe

On calcule un débit à la brèche en phase liquide :

$$DBREL = Q_p \times (1 + X_p)$$

Avec :

- Q_p : débit opératoire de la pompe,
- $X_p = 0.5 + 3 \times 10^{-7} \times (PREF - PATM)$ si la pompe est de type centrifuge,
- $X_p = 0$ si la pompe est de type volumétrique.

5.2.1.5 Définition des temps de fuite

L'évaluation des conséquences des scénarios de l'étude de danger nécessite de connaître les quantités de produit relâchées à l'atmosphère. Ces quantités dépendent du débit à la brèche, et de la durée d'alimentation de la fuite.

De ce fait, les temps de fuite retenus pour le calcul des quantités de produit répandues sont fonctions des temps de fermeture des vannes permettant d'isoler la fuite ou des temps d'arrêt de pompes en amont de la brèche. En tenant compte du retour d'expérience et des guides existants à ce sujet, le projet a retenu les temps réactionnels moyens suivants :

- 600 secondes pour la fermeture d'une vanne manuelle par un opérateur,
- 60 secondes pour la fermeture d'une vanne motorisée commandée par un automatisme,
- 300 secondes pour l'arrêt d'une pompe (débit considéré à plein régime jusqu'à l'arrêt total – pas de débits transitoires),
- un temps spécifique déterminé pour les cas particuliers.

5.2.1.6 Cinétique des phénomènes étudiés

L'estimation de la cinétique d'un accident permet de valider l'adéquation des mesures de protection prises ou envisagées.

On définit 3 niveaux de cinétique d'évènements accidentels :

- cinétique lente : le développement du phénomène accidentel, à partir de sa détection, est suffisamment lent (> 30 minutes) pour permettre de protéger les populations exposées avant qu'elles ne soient atteintes (exemple : feu de bâtiment, feu d'entrepôt).
- cinétique rapide : ≤ 30 minutes (exemple : feu de cuvette, BLEVE ou boil over (boule de feu), dispersion de produits ou de fumées toxiques),
- cinétique instantanée : phénomène instantané (quelques secondes) qui ne permet pas la mise en place de mesures de protection (exemple explosion d'un réservoir).

5.2.2 Dispersion atmosphérique

5.2.2.1 Données climatologiques

Les conséquences d'un accident dépendent, pour la plupart des phénomènes physiques et notamment dans le cas des dispersions de produits toxiques, des conditions météorologiques ou turbulence atmosphérique. Ces conditions sont principalement définies en termes de classes de stabilité atmosphérique, de vitesse et direction du vent.

La turbulence est l'irrégularité du mouvement du vent. Elle est caractérisée par le croisement des trajectoires des masses d'air et par la superposition d'une fluctuation irrégulière, aléatoire et non reproductible de l'écoulement moyen du vent.

La diffusion tourbillonnaire est le processus de mélange le plus important dans les basses couches de la troposphère. Il provoque la dispersion des polluants dans l'air.

On peut distinguer deux types de turbulence :

- la turbulence mécanique : tourbillons créés par la différence de vitesse des masses d'air, ou par le mouvement de l'air qui entre en contact avec des objets,
- et la turbulence thermique (tourbillons créés par la différence de température des masses d'air).

La détermination de la turbulence est importante pour les modèles gaussiens (de type PHAST) puisqu'elle sert à déterminer les écarts-type de la distribution des concentrations. On utilise la classification standard dite « des classes de Pasquill » pour déterminer (par méthode indirecte) l'état de stabilité de l'atmosphère.

Tableau 19 : Conditions météorologiques

Stabilité atmosphérique (catégorie de Pasquill)	Description
A	Conditions extrêmement instables : ensoleillement fort, vents légers
B	Conditions modérément instables : ensoleillement modéré, vents légers à modérés
C	Conditions légèrement instables : nuageux et vents modérés ou ensoleillé et venteux
D	Conditions neutres : ciel complètement couvert pendant la journée ou la nuit
E	Conditions légèrement stables : vents modérés et ciel clair
F	Conditions très stables : vents légers et ciel clair

Les calculs sont réalisés pour deux situations météorologiques à la fois représentatives du site et choisies pour couvrir les conditions moyennes aussi bien que pénalisantes en matière de dispersion :

Condition 3F

- vent faible (3 m/s) et atmosphère très stable (classe F de PASQUILL). Cette situation, peu fréquente, n'est rencontrée que de nuit ou au petit matin. Elle est très pénalisante du point de vue de la dispersion atmosphérique de gaz. Les températures ambiantes et au sol sont prises à 20°C,
- l'humidité relative à 70%,
- une rugosité moyenne au sol de 100 mm correspondant pour un champ plat avec présence de végétation basse et d'obstacles isolés.

Condition 5D

- vent moyen (5 m/s) et atmosphère thermiquement neutre (classe D). Cette situation est la plus fréquente de jour comme de nuit. Elle représente des conditions moyennes du point de vue de la dispersion atmosphérique de gaz. Les températures ambiantes et au sol sont prises à 30°C,
- rayonnement solaire de 0,5 kW/m² pour la condition 5D,
- une rugosité moyenne au sol de 100 mm correspondant pour un champ plat avec présence de végétation basse et d'obstacles isolés,
- l'humidité relative à 70%.

5.2.2.2 Calculs de dispersion atmosphérique

La dispersion est une étape clé dans l'évaluation des effets d'un accident. Le logiciel PHAST 6.5, mis au point par DNV Technica et validé dans sa version 6.0 et 6.1 par l'INERIS, permet d'effectuer ces calculs. Ce logiciel comprend le modèle UDM qui enchaîne plusieurs modèles différents en fonction des caractéristiques thermocinétiques du terme source et de l'évolution des caractéristiques physico-chimiques du mélange air/produit.

Les calculs permettent d'évaluer et de visualiser les caractéristiques du panache gazeux : forme, dimensions, concentrations en fonction de la distance et du temps écoulé. Ils prennent notamment en compte les conditions météorologiques, vitesse du vent et stabilité de l'atmosphère et le type de terrain environnant : terrain plat, zone agricole, zone industrielle ou urbaine. En revanche, l'effet du relief et des obstacles n'est pas modélisé (seul un indice de rugosité est pris en compte).

Le logiciel Phast 6.5 a été utilisé pour quantifier :

- les dispersions atmosphériques de mélanges gazeux toxiques (voire sous forme d'aérosols),
- les dispersions atmosphériques de mélanges gazeux inflammables (cas du feu flash et UVCE).

Ce logiciel est habituellement employé pour quantifier ce type de phénomène. Il modélise la dispersion de jets, de gaz denses, légers ou passifs. Nous avons utilisé les modules suivants :

- Module de rejet instantané (appelé « Catastrophic rupture »), dans le cas des éclatements de capacité et de fuites d'une durée inférieure à 10 secondes.

Dans le cas d'une fuite, on considère qu'un relâchement est instantané lorsque la durée du relâchement est inférieure au temps de transfert du gaz vers la cible, c'est à dire quand la durée de fuite est inférieure au temps d'arrivée du nuage à la cible.

Avec une vitesse de vent de 3 ou 5 m/s, la distance entre l'unité et les cibles potentielles (limites de propriété et plus proches populations) est atteinte en un temps nettement supérieur à 10 secondes.

- Module de rejet continu (appelé « Leak ») pour les autres cas.

Dans ce cas là, les débits à la brèche et vitesse d'éjection ont été déterminés grâce à la méthodologie UFIP, version 2001, qui donne des résultats plus proches de ce qui peut être observé dans la réalité. Ces données sont ensuite incorporées dans Phast comme les données d'entrée de la dispersion atmosphérique.

Concernant les rejets continus le module "long pipeline" a été utilisé dans le cas particulier de la canalisation de transfert de GPL entre le Port et l'Usine. Ce module est adapté pour les canalisations de grande longueur (celles dont le diamètre est supérieur à 300 fois le diamètre de la canalisation), car il permet de prendre en compte la variation de certains paramètres suite à la brèche (diminution des débits et pressions), mais également la fermeture de vanne ou l'arrêt d'équipements en amont.

5.2.3 Explosions

Le terme générique d'explosion regroupe plusieurs phénomènes qui sont les suivants :

- Explosions de nuages de vapeur,
- Eclatement de capacité sous pression,
- Eclatement de bac à toit fixe,
- BLEVE.

Les méthodes de calculs de ces phénomènes sont présentés dans les paragraphes suivants.

5.2.3.1 Explosion de nuages de vapeur

Le VCE (Vapour Cloud Explosion) est un phénomène de combustion rapide à l'air libre d'une masse d'hydrocarbures comprise entre ses limites d'explosivité. Cette explosion est confinée dans un espace clos ou non ; elle peut également être non confinée (cas de l'UVCE - Unconfined Vapour Cloud Explosion).

Le phénomène était jusqu'alors modélisé selon la méthode TNT. Or, suite à l'expérience acquise par les données collectées et les dégâts observés, dans une série de VCE survenus dans l'industrie pétrolière, il est apparu que le modèle TNT est trop majorant, et donc non représentatif de la réalité.

Il s'avère, en effet, que pour les nuages gazeux «au repos» (sans déplacement), l'échelle et l'intensité de l'effet de souffle sont sans rapport avec la masse d'hydrocarbures présente dans le nuage. Ces paramètres sont, en réalité, essentiellement déterminés par la taille et la nature des zones partiellement confinées et encombrées (appelées îlots), englobées par le nuage.

Ces principes sont reconnus et appliqués dans la méthode multi-énergie élaborée par le TNO. Le principe se fonde sur l'accumulation de la masse participante évaporée dans l'environnement encombré de l'unité impliquée.

Chaque zone est ainsi caractérisée par une onde de pression, à laquelle est associé un degré de violence d'explosion sur une échelle graduée de 1 à 10, qui est fonction de :

- la réactivité du gaz concerné,
- du niveau de confinement ou d'encombrement de la zone.

Le modèle consiste donc à évaluer la surpression produite en chaque zone. Dans la réalité, la flamme transite d'une zone à une autre de telle façon que la contribution de chaque zone au développement de la surpression est individualisée dans le champ proche. Par exemple, si l'on considère deux zones encombrées séparées par une zone dégagée, la flamme dans la première zone encombrée va s'accélérer et produire des effets de pression, puis ralentir dans la zone dégagée, pour réaccélérer dans la seconde zone encombrée. La surpression générée dans le champ proche par chacune de ces zones est distincte dans le temps.

Il va être considéré que tout se passe en même temps.



Les effets de surpression seront donc quantifiés par la méthode multi-énergies explicitée dans le guide UFIP 2002. Les rayons de danger obtenus sont centrés sur l'îlot source.

Présentation des îlots

Le tableau ci-après présente les îlots, leurs dimensions et leur niveau d'encombrement.

Tableau 20 : Liste des îlots

N°	Description	Dimensions		Encombrement
		Longueur * largeur Hauteur	Volume	
1				
2				
3				

Cette valeur sera d'autant plus grande que la zone est riche en équipements et tuyauterie et surtout du nombre d'équipements alignés successivement le long d'un axe (accélérations successives de l'onde de choc). Dans des unités de traitement de minerais, les zones d'encombrement auront généralement une valeur de **5 ou 6**. Parfois, dans le cas d'une zone très fortement encombrée ou d'un mélange gazeux très explosif, on pourra attribuer un degré de confinement de **7**. De même, dans les zones peu confinées comme celle des stockages de GPL, le degré de confinement sera égal à **4**.

5.2.3.2 Eclatement de capacité sous pression

On considère pour ce type de scénario la perte totale et instantanée du confinement d'une enceinte sous pression ou capacité contenant un fluide inflammable.

Les équipements concernés par ce type de scénario sont les "enceintes sous pression" et "capacité" qui désignent en fait, les réacteurs, les colonnes, les ballons et éventuellement certains échangeurs contenant des produits inflammables.

La méthode UFIP 2002 est utilisée pour quantifier les effets de surpression associés à un éclatement de capacité sous pression. Deux types de rupture peuvent être envisagés :

- rupture fragile,
- rupture ductile.

Rupture fragile

Définition : La montée en pression de l'enceinte est extrêmement rapide. Aucun dispositif limiteur de pression ne peut éviter la rupture de la capacité sauf si elle est calculée pour résister à la détonation. La rupture est alors fragile et se caractérise par une modification structurelle du métal et la production d'un grand nombre d'éclats de faible dimension. Approximativement 20% de l'énergie est utilisé par les fragments, tandis que les 80% restants de l'énergie de l'explosion se retrouve dans l'onde de choc.

Rupture ductile



Définition : La montée en pression de l'enceinte est relativement lente. Si l'enceinte ne dispose pas de dispositifs limiteurs de surpression ou s'ils sont insuffisamment dimensionnés, on peut avoir rupture ductile de la capacité. Ce type de rupture se produit par sollicitation du métal à une contrainte supérieure à la limite élastique. Il se caractérise par la formation d'un nombre réduit de gros fragments. Approximativement 60% de l'énergie est utilisée par les fragments, tandis que les 40% restants de l'énergie de l'explosion se retrouve dans l'onde de choc.

La mise à l'atmosphère du contenu du réservoir après sa rupture entraîne deux phénomènes de surpression (effet de souffle) successifs :

- Le premier dû à la détente adiabatique du volume de vapeur contenu dans le réservoir de la pression de tarage à la pression atmosphérique;
- Le second engendré par le flash à l'atmosphère d'une fraction du liquide contenu dans la capacité.

Note : la répartition de l'énergie pour la surpression en fonction du type de rupture (80% pour une rupture fragile et 40% pour une rupture ductile) ne s'applique qu'au phénomène de détente de la phase vapeur et pas au flash du liquide.

De plus, des fragments de la capacité sont projetés très loin, (effet projectile) conséquence du seul phénomène de détente adiabatique du volume gazeux.

Ainsi, afin d'obtenir des résultats conservatifs il sera sélectionné :

- une rupture fragile pour la quantification de l'effet de surpression associé à l'éclatement,
- une rupture ductile pour la quantification de l'effet projectile.

5.2.3.3 Eclatement des réservoirs à toit fixe

5.2.3.3.1 Description du phénomène

Le phénomène "d'éclatement des réservoirs", à toit fixe et sans écran flottant peut se décomposer en plusieurs phases successives ou simultanées :

- réaction chimique de combustion interne,
- éclatement du réservoir avec destruction de la paroi,
- propagation d'une onde de pression dans l'environnement,
- échanges thermiques internes (conduction avec la paroi) et externes (rayonnement, convection).

Les réservoirs sont à pression atmosphérique, soit une pression de 101 325 Pa.



5.2.3.3.2 Causes possibles

Il y aura inflammation du mélange si le réservoir contient de l'air (respiration, entrée d'air...) et si la tension de vapeur est suffisante pour que le mélange air / vapeur soit dans ses limites d'inflammabilité. Il peut donc y avoir accroissement de la pression interne du réservoir jusqu'à la rupture du réservoir.

Dans le cas d'une réaction explosive, les sollicitations sont appliquées très rapidement, de l'ordre de la seconde pour la déflagration. Il y aura rupture du réservoir lorsque la pression due à l'explosion interne sera égale à la pression de rupture statique.

Pour aboutir à l'éclatement du réservoir, les deux causes suivantes doivent être combinées :

- La phase vapeur du réservoir doit être dans ses limites d'inflammabilité.
- Une source d'allumage est présente, celle-ci peut être :
 - la foudre,
 - une étincelle d'origine électrostatique,
 - une étincelle d'origine mécanique,
 - une étincelle d'origine électrique,
 - une source chaude amenant la phase vapeur au dessus de sa température d'auto-inflammation (incendie, travail par point chaud).

5.2.3.3.3 Description du modèle

Le modèle utilisé est celui du TNO YELLOW BOOK « Methods for the calculation of physical effects, resulting from releases of hazardous materials (liquids and gases) » Committee for the prevention of disasters Second Edition 1992.

Les hypothèses suivantes ont été adoptées :

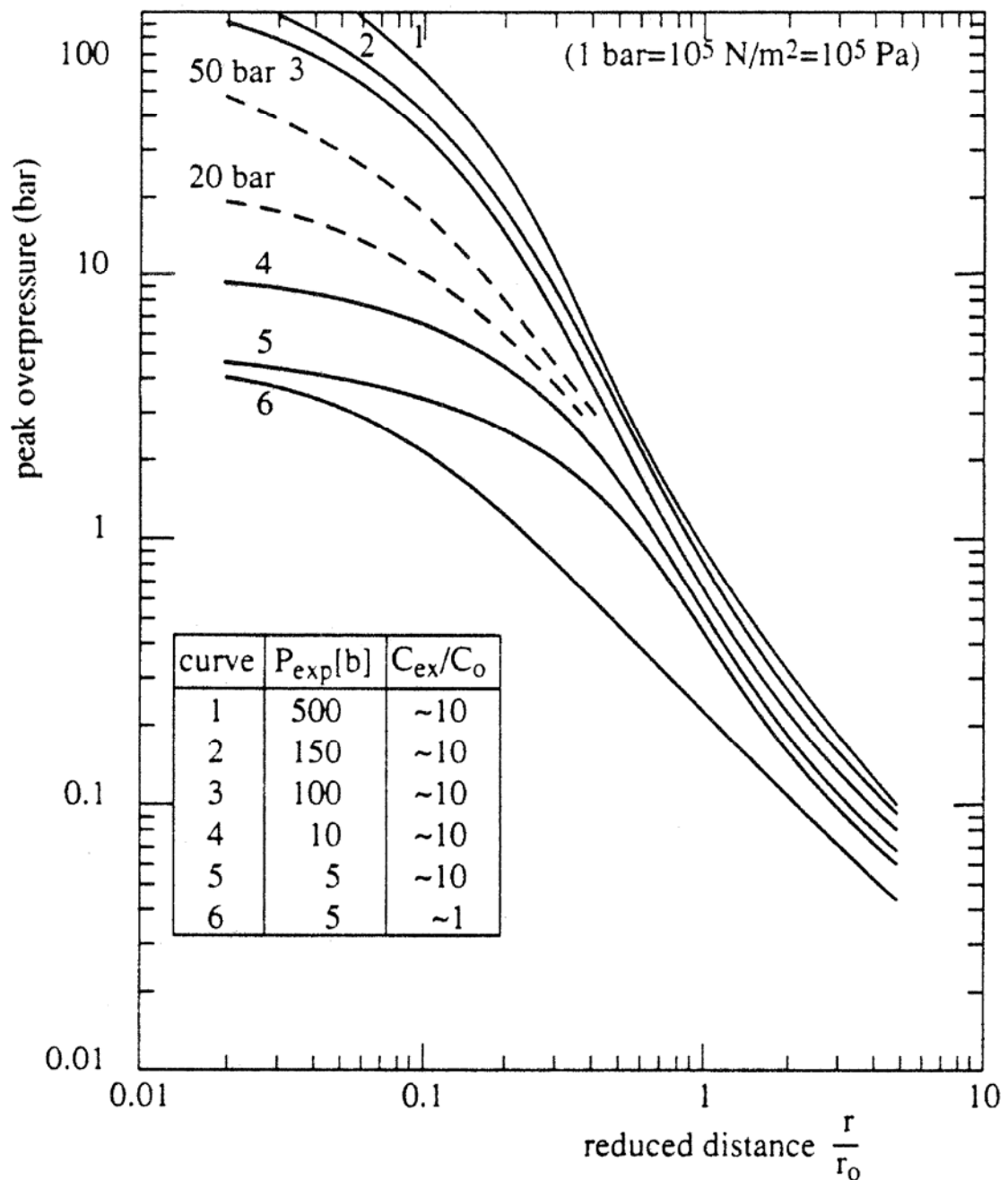
- Il a été considéré que la rupture du réservoir survenait à 2,5 fois la pression de service (ce qui est très vraisemblablement majorant dans le cas d'un réservoir atmosphérique).
- Les calculs sont effectués dans le cas le plus défavorable où tout le volume du bac est plein d'un mélange gazeux explosible.
- Le ratio des chaleurs spécifiques des gaz brûlés est pris à 1,314.
- L'élongation à la rupture est prise à 0,38 pour de l'acier au carbone.
- La rupture est ductile, $F = 0,6$.

Cette modélisation prend en compte :

- L'énergie disponible pour l'onde de choc
- La distance à la paroi en déformation R''
- La distance comptée depuis le centre du réservoir R

Le TNO fournit un faisceau de courbes donnant la surpression de l'explosion.

Figure 3 : Surpression d'explosion en fonction de la distance réduite
(source TNO-Yellow book)





Les équations finalisées donnent :

$$Z0(300 \text{ mbar}) = 0,821 \times (D^2 \times H)^{1/3} + 0,69 D$$

$$Z1(140 \text{ mbar}) = 1,952 \times (D^2 \times H)^{1/3} + 0,69 D$$

$$Z2(50 \text{ mbar}) = 4,11 \times (D^2 \times H)^{1/3} + 0,69 D$$

Les réservoirs ayant un diamètre supérieur à 16 mètres sont considérés comme frangibles.

5.2.4 BLEVE de capacité

Définition

Le terme BLEVE est l'acronyme de l'anglais Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion. Il s'agit de la vaporisation brutale d'un liquide surchauffé sous pression lorsque la capacité le contenant est dépressurisée à la pression atmosphérique de façon quasi instantanée.

Le phénomène de vaporisation instantanée est assimilable à une violente déflagration provenant de la brutale détente de la masse de liquide passant à l'état vapeur, et multipliant son volume par 1700 fois dans le cas de l'eau pressurisée, et par 280 pour du propane liquéfié sous pression.

Trois conditions sont nécessaires pour qu'il y ait BLEVE :

- Surchauffe du liquide en cause
- Baisse rapide de pression dans le réservoir
- Nucléation spontanée (c'est-à-dire la formation spontanée de bulles de gaz dans une phase liquide surchauffée)

Description du BLEVE

La théorie considère qu'un liquide dont la température de service est supérieure à la température de bulle à la pression atmosphérique et qui est dépressurisé à la pression atmosphérique, donne lieu à un BLEVE. En effet, presque immédiatement après la dépressurisation, des bulles se forment, se développent, et en quelques millisecondes, une importante fraction de liquide se transforme en vapeur. Le volume massique de la vapeur étant de plusieurs centaines de fois supérieures à celui du liquide, ce phénomène assimilable à une explosion, est susceptible d'engendrer une onde de choc.

Cette explosion peut être qualifiée de physique en ce sens qu'elle correspond à un changement de phase, par opposition à une explosion « classique » qui correspondrait à une réaction d'oxydation (combustion). Le BLEVE donne également lieu à l'effet missile, et à la formation d'une boule de feu si le produit considéré est inflammable.

Un BLEVE peut se produire lorsqu'un réservoir partiellement rempli avec un liquide surchauffé sous pression, se trouve exposé à un feu. Le scénario peut être décrit par l'enchaînement des étapes suivantes :



- 1) Une capacité sous pression (par ex. une sphère ou un cylindre sous pression), partiellement remplie avec un liquide surchauffé (propane, propylène) est exposée au flux thermique élevé d'un feu (BLEVE chaud).
- 2) La température du liquide va augmenter progressivement engendrant une élévation de la pression dans le réservoir. Lorsque la tension de vapeur correspondant à la température du liquide atteint la valeur de la pression de tarage des soupapes, ces dernières vont s'ouvrir et relâcher une masse de vapeur (ou de liquide) à l'atmosphère.
- 3) Dans le même temps, la température de la coque du réservoir non en contact avec le liquide, c'est-à-dire l'enveloppe de la phase vapeur, augmente de façon dramatique.
- 4) Le métal en contact avec la phase vapeur est affaibli par le flux thermique et des tensions internes élevées prennent naissance dans la structure du réservoir à l'interface vapeur/liquide.
- 5) La combinaison des tensions d'origine thermique, de la dégradation des caractéristiques mécaniques de l'acier avec la température croissante (au contact de la phase vapeur), et de l'augmentation de la pression interne du réservoir, est à l'origine de la rupture du réservoir.
- 6) La mise à l'atmosphère du contenu du réservoir après sa rupture entraîne deux phénomènes de surpression (effet de souffle) successifs :
 - Le premier dû à la détente adiabatique du volume vapeur contenu dans le réservoir de la pression de tarage à la pression atmosphérique,
 - Le second engendré par le flash d'une fraction non négligeable du liquide surchauffé.
- 7) Des fragments du réservoir sont projetés très loin, (effet projectile) conséquence du seul phénomène de détente adiabatique du volume gazeux.
- 8) Une masse de fluide est libérée à l'atmosphère, comprenant :
 - La phase vapeur du réservoir
 - La vapeur générée par le flash d'une fraction non négligeable du liquide surchauffé
 - Le solde de liquide atomisé mécaniquement sous forme de fines gouttelettes par la force de l'explosion
- 9) Une boule de feu se développe par la combustion de la masse fluide inflammable relâchée à l'atmosphère.

Note : pour la sélection du type de rupture (fragile / ductile) se référer au paragraphe précédent sur les éclatements de capacités.



5.2.5 Feux

5.2.5.1 Feu flash

Il s'agit de la combustion en champ libre d'un nuage inflammable allumé par une source de faible énergie. Une source de faible énergie peut être assimilée à une étincelle électrique, mécanique ou électrostatique, ou à un point chaud de température supérieure à la température d'auto inflammation du mélange gazeux. Le front de flammes se déplaçant depuis le point d'ignition atteint une vitesse de flamme S de 1 m/s à 3 m/s. Ces vitesses n'entraînent aucun effet de souffle sur l'environnement, mais il est caractérisé par ses effets thermiques et seront quantifiés à partir de la limite inférieure d'inflammabilité (LIE). Les seuils d'effet quantifiés de référence sont :

- 100% de la LIE pour les effets létaux,
- 110% de la LIE pour les effets irréversibles.

5.2.5.2 Feu alimenté gazeux (feu torche)

Plusieurs méthodologies sont utilisées pour évaluer les effets des feux alimentés gazeux, elles sont présentées ci-après.

1) **Méthode UFIP corrigée CERCHAR**

Les calculs de flux thermique sont effectués en prenant en compte le débit de gaz généré par le scénario et en utilisant les formules de la méthode UFIP corrigée CERCHAR devenu INERIS, pour prendre en compte les seuils habituels du SEI, à savoir 5 et 3 kW/m².

Pour un **feu torche horizontal**, on obtient ainsi les rayons suivants :

$$\text{Effets létaux : } R_1 \text{ (m)} = 0.00325 (D_{\text{gaz}} \times Q_{\text{flu}})^{0.5}$$

$$\text{Effets irréversibles : } R_3 \text{ (m)} = 0.00399 (D_{\text{gaz}} \times Q_{\text{flu}})^{0.5}$$

Avec :

- D_{gaz} , le débit de gaz généré par le scénario, en kg/s
- Q_{flu} , la chaleur de combustion du gaz, en J/kg.

Les effets létaux correspondent à un flux thermique de 5 kW/m² et les effets irréversibles correspondent à un flux thermique de 3 kW/m².

Pour les **feux courts** :

La dose thermique correspondant aux effets létaux est de 1 000 [kW/m²]^{4/3}.s, c'est à dire qu'elle correspond à l'effet suite à une exposition à un flux de [1 000^{3/4}] kW/m² pendant une seconde, soit environ 178 kW/m² pendant 1 seconde.

De la même façon, la dose thermique correspondant aux effets irréversibles est de 600 [kW/m²]^{4/3}.s, et correspond à un flux reçu de [600^{3/4}] kW/m² pendant une seconde, soit environ 121 kW/m² pendant 1 seconde.

2) *Modèle tronconique monosource (modèle Shell)*

Un feu alimenté gazeux correspond à l'inflammation d'un jet alimenté en gaz suite à une rupture de ligne (de gaz, diphasique ou liquide qui flashe à la brèche).

La modélisation du feu alimenté gazeux généré par un feu de gaz alimenté est fondée sur le modèle tronconique mono-source (ou modèle Shell). Ce scénario est quantifié avec l'aide du logiciel Phast.

Le jet de flammes est modélisé par un tronc de cône avec une source ponctuelle localisée au barycentre du tronc de cône. Cette modélisation permet la prise en compte :

- de l'angle formé à la brèche entre le jet et l'horizontale,
- de la vitesse du vent qui entraîne une variation angulaire de l'axe de la flamme,
- de la masse molaire du gaz combustible,
- du nombre de Richardson de l'écoulement.

Le modèle calcule successivement :

- la vitesse du jet au travers de la brèche,
- le diamètre fictif de l'orifice du jet,
- les dimensions du tronc de cône,
- la position du barycentre du tronc de cône (source ponctuelle du rayonnement thermique),
- la longueur de flamme,
- la surface rayonnante du jet de flamme.

Ce modèle est inclus dans le module "Jet Fire" du logiciel Phast qui permet ainsi de quantifier les distances correspondantes aux seuils d'effets retenus.

A noter que pour les feux courts (temps de relâchement inférieur à 60 secondes), le calcul a été effectué avec les seuils SEI de dose thermique. Ce calcul est en effet plus représentatif.

5.2.5.3 Feux de surface liquide (feu de nappe ou de cuvette)

Un feu de surface liquide est dû à l'ignition d'une nappe de produit inflammable.

5.2.5.3.1 Trois types de feu de surface liquide

1) Les feux de réservoirs atmosphériques

Ces feux concernent l'inflammation de la surface totale du réservoir, ce qui implique l'effacement du toit fixe ou toit flottant :

- Explosion d'un bac à toit fixe avec éjection du toit et feu généralisé de la surface liquide,
- Foudroiement d'un bac à toit flottant avec destruction du toit flottant qui coule, et feu généralisé de la surface liquide.

La surface en feu est circulaire, de diamètre égal à celui du réservoir. Elle est localisée à une distance du sol égale à la hauteur du réservoir.

2) Les feux de cuvettes de rétention

Ces feux concernent la surface de la cuvette de rétention entourant les réservoirs de stockage. Cette cuvette de rétention peut se remplir de produits inflammables en cas de débordement ou perte de confinement d'un bac, ou en cas de rupture de tuyauterie.

Une méthode de calcul est basée sur *l'Instruction Ministérielle du 9 novembre 1989*, en recherchant les seuils 5 et 3 kW/m² :

$$\text{Pour le seuil } 5 \text{ kW/m}^2 : R_1 \text{ (m)} = 2.8 L^{0.85} (1 - 2.2 \times 10^{-3} \times L^{0.85})$$

$$\text{Pour le seuil } 3 \text{ kW/m}^2 : R_3 \text{ (m)} = 3.8 L^{0.85} (1 - 3 \times 10^{-3} \times L^{0.85})$$

Où L (en mètre) est la longueur du côté de la cuvette carrée de même surface que la surface examinée (longueur équivalente).

Les effets sur l'homme de ces rayonnements sont les suivants :

- le seuil de 5 kW/m² correspond à la zone de mortalité 1% par brûlures,
- le seuil de 3 kW/m² correspond à la zone de brûlures significatives.

3) Les feux de nappe en extension

Il s'agit de nappes de produits inflammables alimentées par une rupture de canalisation en unités notamment, avec extension non limitée sur le sol. L'extension et la propagation de la nappe sont supposées de révolution.



La surface en feu retenue correspond à la surface cylindrique recouverte par le produit inflammable après relâchement de l'inventaire du système rompu, compte tenu des phénomènes de vaporisation et d'évaporation.

5.2.5.3.2 Sources d'ignition

Les sources d'inflammation du combustible peuvent être de natures diverses :

- moteur électrique,
- travaux de soudage,
- étincelle (d'origine électrique, mécanique ou électrostatique),
- foudre, mauvaise équipotentialité.

5.2.5.3.3 Description du modèle

La modélisation du phénomène permet de calculer les distances de danger associées aux différents seuils d'effets thermiques.

La modélisation du feu de surface liquide utilise le modèle de la flamme solide dans lequel la flamme est assimilée à un volume opaque de géométrie simple (cylindre, parallélépipède rectangle selon la forme de la surface liquide) dont les surfaces rayonnent uniformément.

Cette modélisation permet de prendre en compte :

- La vitesse du vent,
- L'angle d'inclinaison de la flamme,
- L'atténuation de l'air,

Le modèle calcule successivement :

- Le débit massique de combustion,
- L'angle d'inclinaison de la flamme,
- Le diamètre équivalent de la flamme,
- La radiance du feu,
- La hauteur de la flamme,
- L'atténuation de l'air.

5.2.6 Incendie de solides en vrac

La modélisation concernant un feu de solide en vrac, en l'occurrence celui du stockage de soufre, a été réalisée par l'INERIS. Les méthodes de calcul sont présentées dans le rapport de modélisation : Annexe IV-C-18-2, du Volume IV, Section C, Chapitre 18.

Ces calculs ont été réalisés avec les logiciels FNAP (logiciel interne à l'INERIS) et Phast.

5.2.7 Boil Over

5.2.7.1 Description du phénomène

Le boil-over est un phénomène retardé dans le temps pouvant affecter les bacs de stockage d'hydrocarbures. En effet, il peut se produire en tant qu'effet domino plusieurs heures après le début d'un feu de bac. Il s'agit d'un scénario rare mais dont les conséquences peuvent être très importantes.

Par boil-over, on entend la vaporisation brutale d'eau (eau en fond du bac, eau libre ou en émulsion) au contact avec l'onde de chaleur descendante créée par le feu de bac. L'accroissement de volume issu de la création de vapeur d'eau au fond du bac expulse, par un effet de type "piston", l'hydrocarbure liquide du réservoir. Ce liquide se vaporise partiellement et alimente ainsi une boule de feu.

La principale conséquence d'un boil-over est le flux thermique généré par la boule de feu qui s'élève au-dessus du bac ainsi que, dans une moindre mesure, les retombées de liquide enflammé au sol qui tendent à propager l'incendie.

Note: Ce phénomène ne doit pas être confondu avec un frothover associé à un bac de stockage réchauffé (par exemple par un serpentin) et non en feu.

5.2.7.2 Propension au BOIL-OVER

5.2.7.2.1 Conditions nécessaires au boil-over

Pour qu'un boil-over se produise, l'ensemble des conditions suivantes doit être réalisé :

- Présence d'eau dans le bac de stockage d'hydrocarbure
- Hydrocarbure stocké suffisamment visqueux pour que la vapeur ne puisse pas facilement percoler dans le liquide (> 0.73 CSt à 120°C)
- Hydrocarbure stocké avec une température d'ébullition moyenne supérieure à celle de l'eau (à la pression hydrostatique du fond du bac, soit environ 120°C) et une plage d'ébullition suffisamment étendue (requis pour que l'onde de chaleur pénètre suffisamment profondément dans la couche d'hydrocarbure)
- Création d'une onde de chaleur (qui atteint l'eau liquide) générée par:



- Le feu du bac
- Le feu de la cuvette de rétention associée au bac
- Feu de bac et de la cuvette cumulé

Note 1 : Le feu de bac peut être consécutif à une explosion du ciel gazeux (bac à toit fixe).

Note 2 : La présence d'eau peut être due :

- A la teneur en eau de l'hydrocarbure
- A des infiltrations d'eau de pluie par les événements
- A de la condensation à l'intérieur du bac suite à sa respiration et aux cycles jours/nuits
- Aux moyens de lutte incendie (extinction/refroidissement) mis en œuvre suite à un sinistre
- À une absence de purge

Note 3 : Il suffit d'environ 1 cm d'eau en fond de bac pour en expulser son contenu.

5.2.7.2.2 Facteur de propension

Afin de prendre en compte de façon semi-empirique les conditions présentées ci dessus pour caractériser la propension de l'hydrocarbure à subir un boil-over, un facteur de propension (PBO) a été défini comme suit:

$$PBO = \left[\left(1 - \frac{393}{T_{BUL}} \right) \left(\frac{\Delta T_{BUL}}{60} \right)^2 \left(\frac{\nu_{HC}}{0,73} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad \text{Eq - 1}$$

Avec,

- T_{BUL} , la température de bulle moyenne de l'hydrocarbure [K]
- ΔT_{BUL} , plage d'ébullition de l'hydrocarbure [en °C ou K]
- ν_{HC} , viscosité cinématique de l'hydrocarbure à 120 °C (en CSt)

Le choix de considérer un scénario de boil-over se fera selon les critères suivants:

- $PBO > 0,6$: considérer un boil-over
- $PBO \ll 0,6$: ne pas considérer un boil-over
- $PBO <$ ou proche de 0.6 : par prudence considérer un boil-over (ex: cas limite de certains kérosènes)

Le tableau suivant reprend la valeur du facteur de propension pour quelques hydrocarbures.

Tableau 21 : Facteur de propension au BOIL-OVER

Hydrocarbure	PBO	Tendance au <i>boil-over</i>
Brut	4-7	OUI
Fuel Oil	3-4	OUI
Gazole	1	OUI
Kérosène	0,5	OUI
Essence	-0.3	NON

5.2.7.2.3 Description du modèle

Plusieurs théories ont été développées pour déterminer les effets des boules de feu. Elles procèdent toutes selon une démarche similaire et s'articulent autour des étapes suivantes :

- Masse de la boule de feu
 - Vitesse de combustion de l'hydrocarbure
 - Température de l'onde de chaleur
 - Temps de déclenchement du boil-over
- Caractéristiques de la boule de feu
 - Détermination du diamètre de la boule de feu;
 - Détermination de sa durée de combustion;
 - Estimation de son élévation;
- Distances d'effets thermiques
 - Calcul de la densité de flux thermique radiatif reçu par une personne exposée à son rayonnement;
- Détermination des effets sur l'homme.

Les effets thermiques du rayonnement d'une boule de feu sur une population donnée dépendent de l'intensité des radiations qu'elle reçoit, ainsi que de la durée pendant laquelle elle s'y trouve exposée.

Note : Les effets thermiques associés à des phénomènes de très courte durée, comme la boule de feu, ne sont pas dangereux pour les équipements situés au-delà de la proximité immédiate. La notion de dose thermique n'est donc pas applicable.



5.2.8 Effet projectile

Tout composant tournant peut se rompre et engendrer des fragments animés d'énergie cinétique élevée.

Les masses en rotation que l'on rencontre sur un site industriel peuvent engendrer les phénomènes suivants :

1. Rupture d'accouplements,
2. Satellisation de masses en rotation,
3. Ejection d'une ailette de turbine.

Pour cet effet, les formules du Guide UFIP 2002 sont utilisées pour déterminer la distance de projection.

5.3 ANALYSE DE LA CRITICITE

5.3.1 Gravité

L'évaluation des conséquences des scénarios d'accident majeur quantifie les rayons de dangers Z1, Z2 et autres. Une fois ces distances connues, les conséquences sur les personnels interne et externe à l'établissement, sur l'environnement et sur les biens sont réévaluées avec plus de précision. En effet, il est désormais possible de recenser dans chacune de ces zones, l'ensemble du matériel, du personnel et des éléments environnementaux qui peuvent être impacté. L'analyse de la gravité se fait, comme lors de l'analyse de risques, suivant la grille de cotation de la gravité suivante :

Tableau 22 : Critères de gravité en fonction des catégories

	Gravité				
	1	2	3	4	5
Personnel présent dans l'établissement hors unité ► Personne hors établissement (riverains, ERP ou voies de circulation) ►	Pas d'effets létaux ou premiers effets irréversibles	Premiers effets létaux ou effets irréversibles peu étendus	Effets létaux ou irréversibles peu étendus	Effets létaux ou irréversibles étendus	Effets létaux ou irréversibles largement étendus
Matériel ►	Pas de dommages	Domage matériel mineur réparable	Dommmages irréparables limité aux équipements de l'unité	Dommmages affectant les unités adjacentes (effet domino possible)	Dommmages étendus – Dommmages en dehors des limites du site
Dommmages sur l'environnement naturel ►	Pollution négligeable - Pas d'impact significatif* sur l'environnement – retour à l'état initial quasi immédiat	Impact significatif sur l'environnement et nécessitant des travaux de dépollution minimales – récupération dans une cuvette de rétention étanche	Atteintes sévères à l'environnement limité au site – récupération en bassin de contrôle - nécessitent des travaux importants de dépollution (retour état initial <1 an)	Atteintes majeures à des zones vulnérables hors du site avec répercussions à l'échelle locale - nécessitent des travaux lourds de dépollution (retour état initial > 1 an)	Atteintes catastrophiques dans une zone largement étendue hors du site - effets irréversibles nécessitant des travaux lourds de dépollution (dépollution > 5 ans)

Tableau 23 : Echelle d'appréciation de la gravité des conséquences humaines d'un accident à l'extérieur des installations

Niveau de gravité des conséquences		Zone délimitée par le seuil des effets létaux significatifs	Zone délimitée par le seuil des effets létaux	Zone délimitée par le seuil des effets irréversibles sur la vie humaine
5	Désastreux	Plus de 10 personnes exposées (1).	Plus de 100 personnes exposées.	Plus de 1 000 personnes exposées.
4	Catastrophiques	Moins de 10 personnes exposées.	Entre 10 et 100 personnes.	Entre 100 et 1 000 personnes exposées.
3	Important	Au plus 1 personne exposée.	Entre 1 et 10 personnes exposées.	Entre 10 et 100 personnes exposées.
2	Sérieux	Aucune personne exposée.	Au plus 1 personne exposée.	Moins de 10 personnes exposées.
1	Modéré	Pas de zone de létalité en dehors de l'établissement		Présence humaine exposée à des effets irréversibles inférieure à "une personne".

(1) personne exposée : en tenant compte le cas échéant des mesures constructives visant à protéger les personnes contre certains effets et la possibilité de mise à l'abri des personnes en cas d'occurrence d'un phénomène dangereux si la cinétique de ce dernier et de la propagation de ses effets le permettent.

Ainsi l'évaluation de la gravité des conséquences de l'événement redouté est plus précise que lors de l'analyse préliminaire de risques.

5.3.2 Fréquence selon le TNO "Purple Book"

Rappel : La circulaire n°DPPR/SEI2/MM-05-0316 du 7 octobre 2005 relative aux installations classées, définit que "la probabilité d'occurrence d'un accident est assimilée à sa fréquence d'occurrence future estimée sur l'installation considérée. Elle est en général différente de la fréquence historique et peut s'écarter, pour une installation donnée, de la probabilité d'occurrence moyenne évaluée sur un ensemble d'installations similaires."

Il est donc nécessaire de procéder, pour les scénarios d'accident majeur, à une nouvelle cotation de la probabilité d'occurrence spécifique à l'installation et non fondée sur une fréquence historique comme lors de l'analyse de risques.

L'analyse probabiliste **qualitative** a permis de sélectionner les scénarios d'accident majeur au niveau de l'analyse de risques quantifiée. Une fois ces scénarios quantifiés, leur niveau de gravité sont corrigés (paragraphe précédent).

Ensuite, une analyse probabiliste de chaque accident majeur sélectionné est réalisée de manière **quantitative**. Cette probabilité porte sur l'événement redouté central c'est-à-dire la perte de confinement, d'intégrité physique des équipements concernés.

Le "Purple book" du TNO propose une méthodologie pour évaluer cette probabilité et fournit des valeurs de référence pour les fréquences des événements tels que :

- Perte de confinement de canalisations,
- Perte de confinement de réservoirs,

- Perte de confinement de pompes,
- Perte de confinement d'échangeurs de chaleur,
- Perte de confinement de réservoirs sous pression,
- Décharges par organes de sécurité.

Dans la plupart des cas, les probabilités de perte de confinement données correspondent à celles des événements redoutés considérés. Cependant, dans le cas où la probabilité de l'événement redouté ne peut pas être extraite directement de la base de donnée du "Purple book", il faut reprendre l'arbre des causes établi pour le scénario considéré.

Il s'agit en effet de reprendre une partie du nœud papillon établi dans la fiche scénario (voir chapitre 4 de la section A du volume IV - Synthèse des EIPS), et pour chaque cause identifier, d'évaluer sa probabilité d'occurrence suivant la base de donnée du "Purple book". Ainsi, l'évaluation des probabilités de chacune des causes élémentaires de l'événement redouté, permet d'évaluer la probabilité de ce dernier.

Ces fréquences sont précisées dans les paragraphes suivants.

5.3.2.1 Probabilité d'ignition

La probabilité d'ignition dépend de la nature du produit inflammable mis en cause (liquide ou gaz) et des inventaires relâchés. Elles sont données dans le tableau suivant.

Tableau 24 : Fréquences d'occurrence des sources d'ignition

Fuite continue	Perte de confinement instantanée	Substance		
		Liquide	Gaz faiblement inflammable	Gaz inflammable, très inflammable
< 10 kg/s	< 1000 kg	0,065	0,02	0,2
10 à 100 kg/s	1000 à 10000 kg	0,065	0,04	0,5
> 100 kg/s	> 10000 kg	0,065	0,09	0,7

5.3.2.2 Perte de confinement des canalisations et des pompes

Ces fréquences tiennent compte de toutes les causes, incidents, événements qui ont pu créer la fuite ou la rupture. Ce sont celles que nous avons retenues pour notre analyse.

Tableau 25 : Fréquences d'occurrence de canalisations et de pompes

Equipement	Fréquences d'occurrence		
	Rupture guillotine 100%	Rupture de piquage équivalent à 50% de la section de la tuyauterie	Fuite à travers une brèche de 10 % du diamètre
Pompe en acier allié	5.0E-05 / an	1.0E-04 / an	2.5E-04 / an
Pompe scellée	1.0E-05 / an	2.0E-05 / an	5.0E-05 / an
<i>Tuyauterie</i>			
diamètre pipe < 3"	1.0E-06 / m / an	2.0E-06 / m / an	5.0E-06 / m / an
3" ≤ diamètre pipe ≤ 6"	3.0E-07 / m / an	6.0E-07 / m / an	2.0E-06 / m / an
6" < diamètre pipe	1.0E-07 / m / an	2.0E-07 / m / an	5.0E-07 / m / an

Si la ligne véhicule un produit corrosif avéré, une pondération sera nécessaire : multiplier la fréquence de rupture par 5 si des mesures spécifiques d'inspection sont en place, multiplier la fréquence par 10 sinon. Cependant, dans le cas de canalisations ou de capacités de stockage ou de procédé en matériaux non corrodables, aucune pondération ne sera conservée.

Le facteur de réduction de la probabilité d'une rupture pleine section par rapport à celle de la rupture d'un piquage (dont la surface de la section droite est égale à 50% par rapport à la surface de la section pleine) retenu par le TNO est de 2.

5.3.2.3 Perte de confinement des réservoirs

Tableau 26 : Fréquences d'occurrence de rupture de capacité

Equipement	Fréquences d'occurrence		
	Rejet instantané de l'inventaire complet	Fuite continue pendant 10 min à débit constant	Fuite à travers une brèche de 10 mm de diamètre
Stockage sous pression	5.0E-07 / an	5.0E-07 / an	1.0E-05 / an
Ballon, colonne, réacteur	5.0E-06 / an	5.0E-06 / an	1.0E-04 / an
Réservoir atmosphérique simple-peau	5.0E-06 / an	5.0E-06 / an	1.0E-04 / an
Réservoir atmosphérique double-peau	1.25E-08 / an	1.25E-08 / an	5.0E-08 / an (*)
Echangeurs	5.0E-05 / an	5.0E-05 / an	1.0E-03 / an

(*) Cette fuite est celle de la première enveloppe vers la deuxième.

Le "Purple book" du TNO stipule en outre qu'en présence de conditions particulières affectant les événements initiateurs de tels incidents ou réduisant leur probabilité d'occurrence ou leurs effets, la fréquence d'occurrence d'un rejet instantané de l'inventaire complet peut être revue à la baisse, sans descendre sous la valeur de 1.0E-07 / an.

5.3.2.4 Perte de confinement des échangeurs de chaleur

Ces fréquences tiennent compte de toutes les causes, incidents, événements qui ont pu créer la fuite ou la rupture sur des échangeurs de chaleur (perte de confinement de la calandre ou des tubes). Ce sont celles que nous avons retenues pour notre analyse.

Tableau 27 : Fréquences d'occurrence de perte de confinement d'échangeurs de chaleur

	Perte de confinement instantanée de l'inventaire complet	Relâchement continu et constant de l'inventaire en 10 mn	Relâchement continu par une brèche de diamètre de 10mm
Produits dangereux entre calandre et tubes	5.0E-05 /an	5.0E-05 /an	1.0E-03 /an
	Rupture complète simultanée de 10 tubes – flux sortant des deux cotés de la rupture	Rupture complète d'un tube - flux sortant des deux cotés de la rupture	Fuite – flux sortant par une fuite de diamètre effectif de 10% du diamètre nominal, avec un maximum de 50 mm
Produit dangereux dans les tubes, Pression de design de la calandre inférieure à la pression du produit (dans la calandre)	1.0E-05 /an	1.0E-03 /an	1.0E-02 /an
Pression de design de la calandre inférieure à la pression du produit (dans la calandre)	1.0E-06 /an		

5.3.2.5 Décharge par organe de sécurité

Le "Purple book" du TNO donne comme probabilité de décharge par l'intermédiaire d'un organe de sécurité (soupape par exemple), la probabilité suivante :

$$\text{Probabilité de décharge par un organe de sécurité} = 2.0E-05 / \text{an}$$

5.3.3 Fréquence - Probabilité

Une fois les fréquences estimées, elles sont converties en terme de probabilité.

Tableau 28 : Tableau de correspondance entre fréquence et probabilité

Probabilité	Qualification	Fréquence indicative
1	Extrêmement rare	$\leq 1 \times 10^{-5} / \text{an}$ (moins d'une fois tous les 100 000 ans)
2	Rare	de 1×10^{-5} à $1 \times 10^{-4} / \text{an}$ (une fois tous les 10 000 à 100 000 ans)
3	Peu probable	de 1×10^{-4} à $1 \times 10^{-3} / \text{an}$ (une fois tous les 1 000 à 10 000 ans)
4	Probable	de 1×10^{-3} à $1 \times 10^{-2} / \text{an}$ (une fois tous les 100 à 1 000 ans)
5	Fréquent	$> 1 \times 10^{-2} / \text{an}$ (au moins tous les 100 ans)



5.4 EFFETS DOMINO ET EIPS

Les parties relatives à l'analyse des effets domino et à la synthèse des EIPS sont traités dans des chapitres spécifiques décrivant pour chacun les méthodologies associées.

- Chapitre 3 : Analyse des effets domino
- Chapitre 4 : Synthèse des EIPS