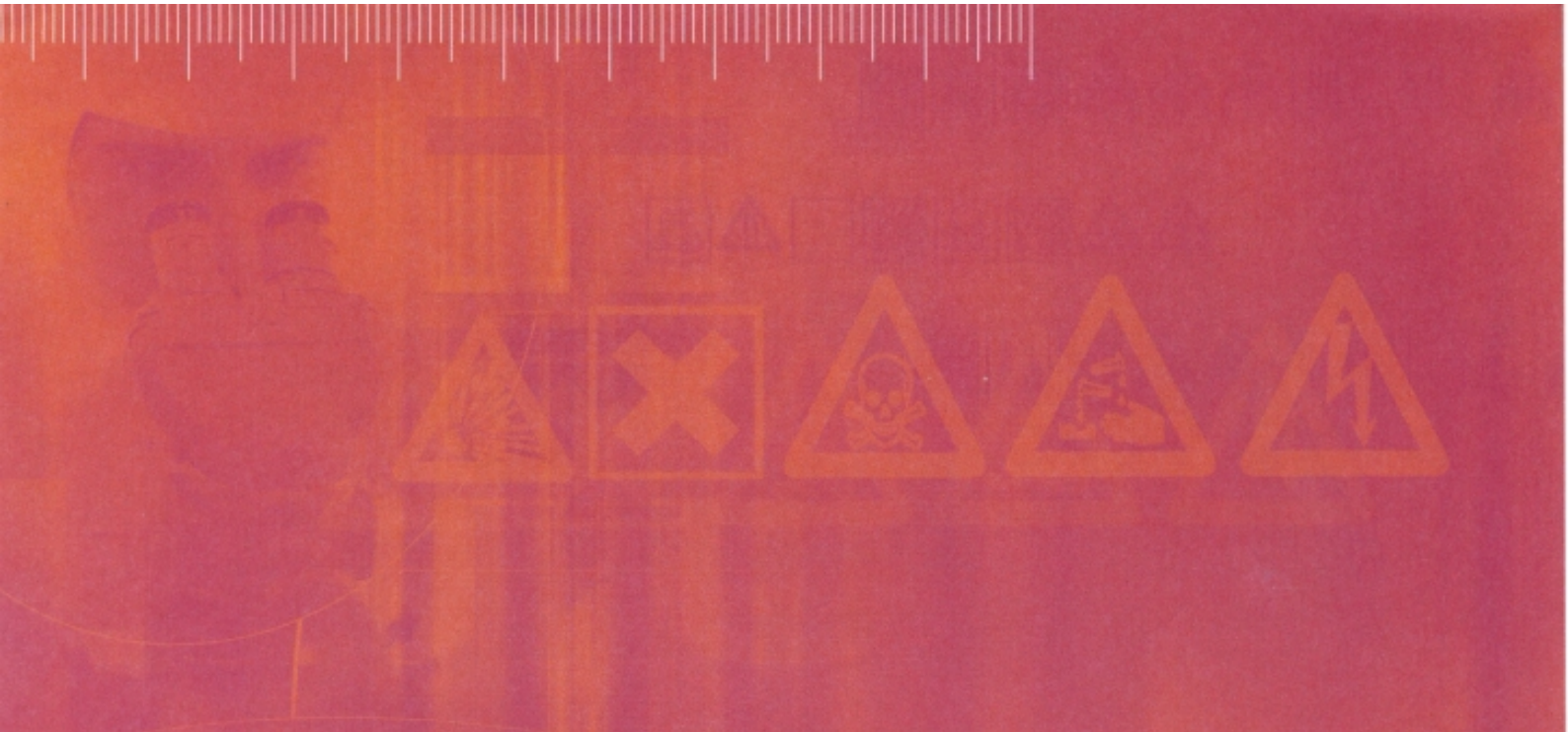




RAPPORT D'ÉTUDE

03/12/2013

N° - DRA-13-133158-12929A-

**Règles méthodologiques applicables aux
études de danger des stockages souterrains**

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |

Règles méthodologiques applicables aux études de danger des stockages souterrains

Liste des personnes ayant participé à l'étude : F. LAHAIE, A. LAHOZ, F. PRATS

PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Franck PRATS	Frédéric MERLIER	Sylvain CHAUMETTE
Qualité	Ingénieur d'étude au pôle AGIR Direction des Risques Accidentels	Responsable de l'unité DIAG Direction des Risques Accidentels	Responsable du Pôle Analyse et Gestion Intégrée des Risques Direction des Risques Accidentels
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

1. GLOSSAIRE	5
2. INTRODUCTION	7
2.1 Contexte	7
2.2 Objet.....	7
2.3 Structure du document.....	8
3. GENERALITES SUR LES STOCKAGES SOUTERRAINS	9
3.1 Cadre réglementaire.....	9
3.2 Situation des stockages souterrains en France.....	10
3.3 Description d'un stockage souterrain	15
3.3.1 Le réservoir.....	15
3.3.2 Les puits	19
3.3.3 Les collectes	24
3.3.4 La station centrale	24
3.4 Description des grandes phases d'exploitation d'un stockage souterrain ...	24
3.4.1 Opérations d'injection et de soutirage.....	24
3.4.2 Opérations de maintenance.....	25
4. DEMARCHE POUR L'ELABORATION D'UNE ETUDE DE DANGERS (EDD) DANS LE CONTEXTE DES STOCKAGES SOUTERRAINS	27
4.1 Démarche générale pour la réalisation d'une EDD	27
4.2 Parties descriptives	29
4.3 Identification, caractérisation et réduction des potentiels de dangers	29
4.4 Accidentologie et retour d'expérience	30
4.5 Evaluation des risques	30
4.5.1 Analyse préliminaire des risques	30
4.5.2 Etude détaillée de réduction des risques	34
4.6 Classement des accidents majeurs.....	39
5. LES INSTALLATIONS OBJETS DE L'EDD	43
5.1 Le réservoir	43
5.1.1 Accidentologie	43
5.1.2 Analyse préliminaire des risques	48
5.2 Les puits d'exploitation et de contrôle	55

5.3	Les puits d'exploitation et de contrôle.....	55
5.3.1	Accidentologie.....	55
5.3.2	Analyse préliminaire des risques	59
5.3.3	Etude détaillée des risques.....	63
5.4	Les collectes.....	65
5.4.1	Accidentologie.....	65
5.4.2	Analyse préliminaire des risques	67
5.4.3	Etude détaillée des risques.....	69
5.5	La station centrale	71
5.6	Les effets dominos	71
6.	DEMARCHE POUR L'ELABORATION DU PPRT DANS LE CONTEXTE DES STOCKAGES SOUTERRAINS	73
6.1	Phénomènes dangereux retenus	73
6.2	Détermination de l'aléa.....	74
6.3	Principes de réglementation	74
7.	DEMARCHE POUR L'ELABORATION DES PLANS D'URGENCES DANS LE CONTEXTE DES STOCKAGES SOUTERRAINS	75
8.	LISTE DES ANNEXES	77

1. GLOSSAIRE

AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité
APR	Analyse Préliminaire des Risques
ARIA	Analyse, Recherche et Information sur les Accidents
AS	Autorisation avec Servitudes d'utilité publique
BARPI	Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industrielles
BSSS	Bureau du Sol et du Sous-Sol
CLIC	Comité Locaux d'Information et de Concertation
CRIGEN	Centre de Recherche et d'Innovation Gaz et Energies Nouvelles
DGPR	Direction Générale de la Prévention des Risques
DREAL	Direction Régionale de l'environnement, de l'Aménagement et du Logement
EDD	Etude De Dangers
EGIG	European Gas pipeline Incident data Group
EI	Evénement Initiateur
ERC	Evénement Redouté Central
GESIP	Groupe d'Etudes de Sécurité des Industries Pétrolières et chimiques
GT	Groupe de Travail
HAZOP	HAZard and OPerability study
IC	Installation Classée
INERIS	Institut National de l'Environnement industriel et des RISques
MMR	Mesure de Maîtrise des Risques
PhD	Phénomène Dangereux
POI	Plan d'Opération Interne
PPI	Plan Particulier d'Intervention
PSI	Plan de Surveillance et d'Intervention
PPRT	Plan de Prévention des Risques Technologiques
SGS	Système de Gestion de la Sécurité
UVCE	Unconfined Vapour Cloud Explosion

2. INTRODUCTION

2.1 CONTEXTE

La loi n°2003-699 du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages a instauré la mise en œuvre de Plans de Prévention des Risques Technologiques (PPRT) des stockages souterrains visés à l'article L211-2 (anciennement 3-1) du Code Minier.

Dans ce contexte, l'Administration a souhaité mettre en place des règles méthodologiques d'élaboration des études de dangers et des PPRT spécifiques aux stockages souterrains.

Après plusieurs années de travaux et d'échanges, notamment en groupe de travail, la DGPR a diffusé le 15 septembre 2009 une circulaire définissant les « règles méthodologiques relatives aux études de dangers, à l'acceptabilité de la démarche de maîtrise des risques et aux PPRT des stockages souterrains de gaz ». Cette circulaire a posé le cadre général d'élaboration des études de dangers (EDD) et des PPRT dans le contexte des stockages souterrains de gaz naturel.

La diffusion de cette circulaire a été suivie, en décembre 2009, par une journée d'échanges entre les DREAL concernées, la DGPR et l'INERIS.

La circulaire du 10 mai 2010, récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003, reprend entre autres les dispositions de la circulaire du 15 septembre 2009, qu'elle abroge.

Par ailleurs, ce document s'appuie en partie sur les travaux de recherche menés par l'INERIS en liaison notamment avec le CRIGEN de GDF-Suez concernant la méthodologie à appliquer pour la modélisation des effets de surpression consécutifs à une fuite de gaz naturel.

2.2 OBJET

Le présent guide a pour champ les stockages souterrains visés à l'article L211-2 du Code Minier, à savoir les stockages souterrains « de gaz naturel, d'hydrocarbures liquides, liquéfiés ou gazeux ou de produits chimiques à destination industrielle. »

Il a pour objectif de constituer un guide récapitulant les règles méthodologiques relatives à l'élaboration des études de dangers, à l'appréciation des risques et à la maîtrise de l'urbanisation liés à ces stockages. Son champ d'application est volontairement restreint aux installations spécifiques aux stockages souterrains, à savoir le réservoir, les puits et l'interface sous-sol/surface et les collectes. Les autres installations de surface, implantées en particulier sur les stations centrales, ne sont pas traitées.

Le présent guide s'adresse aux exploitants ou aux instructeurs, et n'a pour objet, de par son caractère générique, que de les guider dans l'élaboration ou l'instruction d'une étude de dangers. Il ne peut en aucun cas se substituer à l'analyse de risques spécifique qui doit être réalisée dans le contexte particulier d'un site. Dans tous les cas, seul l'exploitant a la responsabilité des conclusions de son étude de dangers.

2.3 STRUCTURE DU DOCUMENT

Le présent guide s'organise en 4 principales parties :

- Généralités sur les stockages souterrains : cette partie vise à décrire le cadre réglementaire ainsi que les différentes installations rencontrées sur les stockages souterrains visés à l'article L211-2 du Code Minier, ainsi que leurs différents modes d'exploitation ;
- Démarche d'élaboration d'une EDD : cette partie explicite les règles applicables à tous les stockages souterrains visés à l'article L211-2 du Code Minier pour l'élaboration d'une EDD ;
- Installations objet de l'EDD : dans cette partie, les installations spécifiques à un stockage souterrain sont étudiées plus en détail. Pour chacune d'entre elles, sont présentés une accidentologie, des ERC représentatifs avec des mesures de maîtrise des risques associées, ainsi que s'il y a lieu, des nœuds-papillons génériques ;
- Démarche d'élaboration d'un PPRT : cette partie présente les règles spécifiques aux stockages souterrains relatives à l'élaboration des PPRT.

Une dernière partie rappelle succinctement quelques éléments concernant l'élaboration des plans d'urgence, en lien avec le reste du document.

Les Annexes de ce guide comportent notamment :

- les nœuds-papillons auxquels renvoient certaines parties du document ;
- des éléments relatifs aux critères d'exclusion des phénomènes d'effondrement de cavités ;
- des éléments de modélisation relatifs aux phénomènes dangereux mettant en cause du gaz naturel.

3. GENERALITES SUR LES STOCKAGES SOUTERRAINS

3.1 CADRE REGLEMENTAIRE

Depuis la loi n°2003-8 du 3 janvier 2003, l'ensemble des stockages souterrains de gaz naturel, d'hydrocarbures liquides, liquéfiés ou gazeux ou de produits chimiques à destination industrielle, sont régis par le Code Minier (Livre II) et ses décrets d'application du 2 juin 2006.

Au-delà du Code Minier, les stockages souterrains sont également soumis aux dispositions de la directive européenne « Seveso II » relative à la prévention des accidents majeurs (directive 96/82/CE du 9 décembre 1996). Cette directive se traduit aujourd'hui en droit français par le décret du 2 juin 2006, et l'arrêté du 17 janvier 2003 relatif à la prévention des accidents majeurs dans les stockages souterrains de gaz, d'hydrocarbures liquides ou liquéfiés. A ce titre, les exploitants sont tenus notamment de :

- remettre une étude de dangers à la demande d'autorisation d'exploiter,
- réviser cette étude de dangers au minimum tous les 5 ans,
- mettre en place dans leur établissement un système de gestion de la sécurité,
- établir le plan d'opération interne et fournir les éléments permettant aux autorités d'élaborer le plan particulier d'intervention.

Les stockages souterrains sont par ailleurs concernés par la loi n°2003-699 du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages, et sont soumis aux Plans de Prévention des Risques Technologiques (PPRT). Ils sont donc concernés par le décret n°2005-1130 du 7 septembre 2005 qui en précise les modalités d'application.

La circulaire du 15 septembre 2009 a défini les règles méthodologiques relatives aux études de danger, à l'acceptabilité de la démarche de maîtrise des risques et aux PPRT des stockages souterrains de gaz, à l'issue de plusieurs années de travaux et d'échanges en groupes de travail. Les dispositions de cette circulaire sont reprises dans la circulaire du 10 mai 2010 (l'abrogeant) qui rassemble les textes réglementaires et les circulaires d'application qui ont suivis la loi du 30 juillet 2003, et s'appliquant à l'ensemble des stockages souterrains visés par cette loi.

Enfin, il est à noter que les installations de surface des sites de stockage souterrain visés au livre II du Code Minier comportent, pour la plupart, des Installations Classées. A ce titre, ces installations sont également soumises aux dispositions réglementaires du Code de l'Environnement (Code de l'Environnement - Livre V - Titre 1er et décret d'application n° 77-1133 du 21 septembre 1977).

La directive Seveso III qui entrera en vigueur le 1^{er} juin 2015 va entraîner des évolutions réglementaires pour les stockages souterrains qui relèveront ainsi d'un classement au titre des installations classées. Ces évolutions réglementaires n'ont pas d'influence sur les principes décrits dans le présent guide.

3.2 SITUATION DES STOCKAGES SOUTERRAINS EN FRANCE

Il existe en France de nombreux stockages souterrains de gaz naturel, de produits chimiques ou de produits pétroliers, que ce soit à l'état liquide ou de gaz. Le recours au stockage en souterrain a connu un développement croissant avec le premier choc pétrolier dans les années 1970. Afin de pouvoir résoudre, en toutes circonstances, les problèmes d'adéquation entre besoins et disponibilités et garantir la sécurité d'approvisionnement, plusieurs types de stockages se sont alors développés :

- **le stockage en milieu poreux** : utilisé uniquement pour le gaz naturel en phase gazeuse, ce type de stockage consiste à utiliser les vides présents dans une couche géologique poreuse et perméable, surmontée d'une couche imperméable qui interdit toute migration du gaz vers la surface. Principalement réalisé dans des couches **aquifères** n'ayant jamais piégé d'hydrocarbures, le stockage en milieu poreux peut également concerner des gisements de gaz ou de pétrole **déplétés** et réutilisés à des fins de stockage ;
- **le stockage en cavités lessivées** : il s'agit de cavités réalisées par dissolution (lessivage) dans des couches de sel, matériau très peu perméable et propice au stockage. Ces cavités peuvent être utilisées pour stocker du gaz naturel, des produits liquides ou liquéfiés (pétrole brut, propane, butane) ou des produits chimiques à destination industrielle (propylène, éthylène) ;
- **le stockage en cavités minées** : ce type de stockage est constitué d'un réseau de chambres creusées en profondeur, par des techniques minières, dans une roche compétente à une profondeur et dans des conditions hydrogéologiques garantissant le confinement du produit. Il est utilisé pour stocker des produits liquides ou liquéfiés (propane, butane).

Ces trois techniques sont mises en œuvre en France dans des proportions relativement comparables, avec toutefois une légère prédominance du stockage en milieu poreux.

<i>Type de stockage</i>	<i>Nombre de sites en France</i>
En milieu poreux	13
En cavités lessivées	8
En cavités minées	7
Total	28

Tableau 1 : Répartition en nombre des différents types de stockages souterrains en France (2011)

Géographiquement, les sites de stockage souterrain se concentrent essentiellement dans trois grandes régions : le grand bassin parisien, la vallée du Rhône et le bassin aquitain.

Les substances exploitées en France peuvent être classées en trois grandes catégories :

- le gaz naturel ;
- les hydrocarbures ou produits chimiques liquéfiés, c'est-à-dire à l'état liquide sous pression. Appartiennent à cette catégorie les gaz de pétrole liquéfiés (GPL) tels que le butane ou le propane ainsi que le propylène et l'éthylène (état supercritique) ;
- les hydrocarbures liquides, c'est-à-dire à l'état liquide lorsqu'ils sont à pression atmosphérique : le pétrole brut appartient à cette catégorie, tout comme le fuel, l'essence ou le naphta.

Le gaz naturel et les hydrocarbures liquéfiés (GPL) sont les produits les plus concernés par le stockage en souterrain.

Les localisations ainsi que les caractéristiques principales des stockages actuels sont présentées sur la carte suivante et dans le tableau suivant.

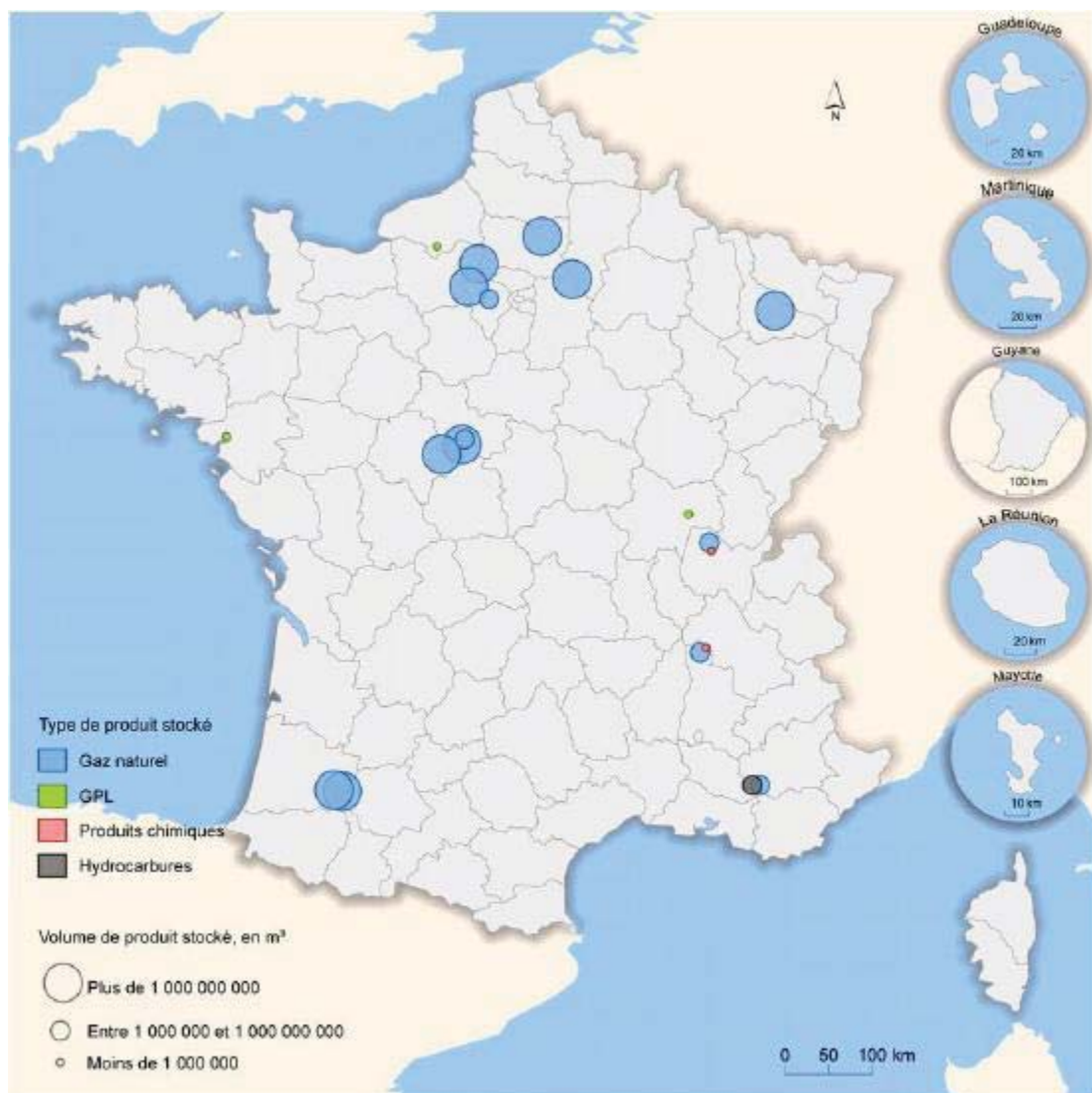


Figure 1 : Localisation des sites de stockage souterrain en France (2011)

Nom de l'exploitant	Département	Nom du stockage	Type de stockage	Année de mise en service	Profondeur du toit* (en m/sol)	Nb de cavités	Stock total* (en Nm ³ pour le gaz en aquifère ou en m ³ pour les cavités)	Produit stocké	Surface du périmètre de stockage* (en km ²)
STORENGY	78	BEYNES profond	Aquifère	1975	740	1	800 000 000	Gaz naturel	17,4
STORENGY	78	BEYNES supérieur	Aquifère	1956	405	1	475 000 000	Gaz naturel	17,4
STORENGY	37	CERE LA RONDE	Aquifère	1993	905	1	1 200 000 000	Gaz naturel	61,8
STORENGY	54	CERVILLE VELAIN	Aquifère	1970	470	1	1 500 000 000	Gaz naturel	28,4
STORENGY	41	CHEMERY	Aquifère	1968	1120	1	7 000 000 000	Gaz naturel	52,5
STORENGY	77	GERMIGNY SOUS COULOMBS	Aquifère	1982	892	1	2 600 000 000	Gaz naturel	252,2
STORENGY	60	GOURNAY SUR ARRONDE	Aquifère	1976	750	1	2 200 000 000	Gaz naturel	116,0
TIGF	32	IZAUTE	Aquifère	1981	510	1	3 000 000 000	Gaz naturel	19,9
TIGF	40	LUSSAGNET	Aquifère	1957	545	1	3 500 000 000	Gaz naturel	15,5
STORENGY	95	SAINT CLAIR SUR EPTÉ	Aquifère	1979	742	2	2 200 000 000	Gaz naturel	84,0
STORENGY	78	SAINT ILLIERS	Aquifère	1965	470	1	1 500 000 000	Gaz naturel	17,1
STORENGY	41	SOINGS EN SOLOGNE	Aquifère	1981	1135	1	800 000 000	Gaz naturel	32,0
STORENGY	51	TROIS FONTAINES	Déplété	2010	1634	1	2 000 000 000	Gaz naturel	180
STORENGY	1	ETREZ	Cavité lessivée	1979	1400	21	3 771 000	Gaz naturel	28,0

Nom de l'exploitant	Département	Nom du stockage	Type de stockage	Année de mise en service	Profondeur du toit* (en m/sol)	Nb de cavités	Stock total* (en Nm ³ pour le gaz en aquifère ou en m ³ pour les cavités)	Produit stocké	Surface du périmètre de stockage (en km ²)
STORENGY	26	HAUTERIVES	Cavité lessivée	2011	1160	1	2 250 000	Gaz naturel	9,5
GEOMETHANE	4	MANOSQUE	Cavité lessivée	1993	1000	7	2 200 000	Gaz naturel	29,1
STORENGY	26	TERSANNE	Cavité lessivée	1970	1400	14	1 566 000	Gaz naturel	15,0
TOTAL (arrêté)	64	CARRESSE CASSABER	Cavité lessivée	1968	300	4	43 350	GPL (propane)	-
GEOSEL	4	MANOSQUE	Cavité lessivée	1967	300 à 900	32	13 000 000	HC liquides, pétrole brut, GPL	-
TOTAL	1	VIRIAT	Cavité lessivée	1970	1000	2	150 000	Pdt chim liquéfiés (éthylène)	-
NOVAPEX	26	GRAND SERRE	Cavité lessivée	1972	1250	1	60 000	Pdt chim liquéfiés (propylène)	0,8
GEOGAZ LAVERA	13	LAVERA	Cavité minée	1984	80	2	183 000	GPL (butane)	-
GEOGAZ LAVERA	13	LAVERA	Cavité minée	1971	110	1	120 000	GPL (propane)	-
PRIMAGAZ	13	LAVERA	Cavité minée	1998	142	1	98 200	GPL (propane)	-
SOCIETE DES PETROLES SCHELL	76	PETIT COURONNE	Cavité minée	1966	150	2	65 000	GPL (butane, propane)	-
TOTAL	44	DONGES	Cavité minée	1977	120	2	77 000	GPL (propane)	-
GEOVEXIN (arrêté)	78	GARGENVILLE	Cavité minée	1977	130	1	130 000	GPL (propane)	-

Nom de l'exploitant	Département	Nom du stockage	Type de stockage	Année de mise en service	Profondeur du toit* (en m/sol)	Nb de cavités	Stock total* (en Nm ³ pour le gaz en aquifère ou en m ³ pour les cavités)	Produit stocké	Surface du périmètre de stockage* (en km ²)
BUTAGAZ	71	SENECEY LE GRAND	Cavité minée	1996	133	1	8 000	GPL (propane)	-

Tableau 2 : Liste des stockages souterrains en France (2011)

3.3 DESCRIPTION D'UN STOCKAGE SOUTERRAIN

Un stockage souterrain type se compose des unités suivantes :

- le **réservoir**, c'est-à-dire la formation géologique ou les cavités souterraines renfermant le produit ;
- les **puits**, reliant le réservoir à la surface et utilisés pour l'injection et le soutirage du produit (puits d'exploitation), ou dans certains cas pour surveiller l'étanchéité du réservoir ou des puits, la pollution ou la présence de produit dans les aquifères supérieurs ou le niveau de produit dans le réservoir (puits de surveillance) ;
- les **collectes**, qui sont les canalisations reliant chaque puits à la station centrale ;
- la **station centrale**, qui assure le traitement du produit soutiré et injecté, l'éventuelle compression de ce produit, et sa préparation à l'expédition. Certaines installations de traitement peuvent également être présentes à proximité des têtes de puits.

Le massif désigne l'ensemble des formations géologiques autres que le réservoir.

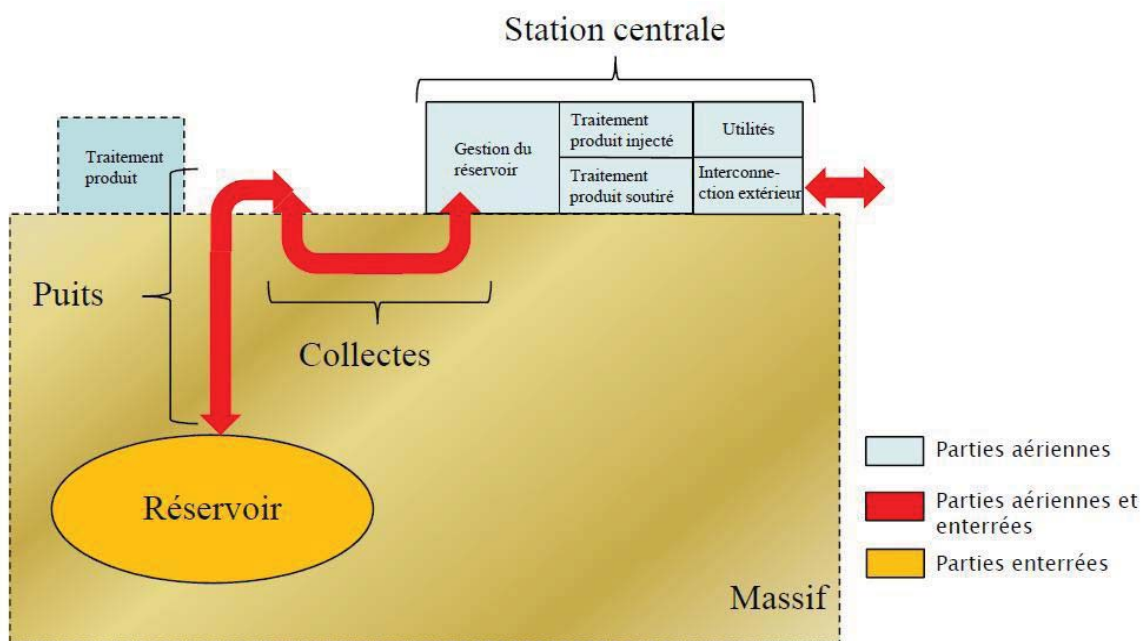


Figure 2 : Découpage fonctionnel d'un stockage souterrain type

Ce découpage est celui repris dans la suite de ce document, en vue de décrire et de fournir des éléments d'analyse et de caractérisation des risques liés aux stockages objets du document.

3.3.1 LE RESERVOIR

Les différents types de réservoirs sont présentés ci-après de manière succincte.

3.3.1.1 STOCKAGE EN MILIEU POREUX

Utilisée exclusivement pour le gaz naturel, la technique du stockage en milieu poreux consiste à utiliser les vides présents dans une couche géologique poreuse et perméable, et surmontée d'une couche imperméable qui interdit toute migration du gaz vers la surface. Cette couche imperméable est appelée couverture.

Il existe deux grands types de stockages en milieux poreux :

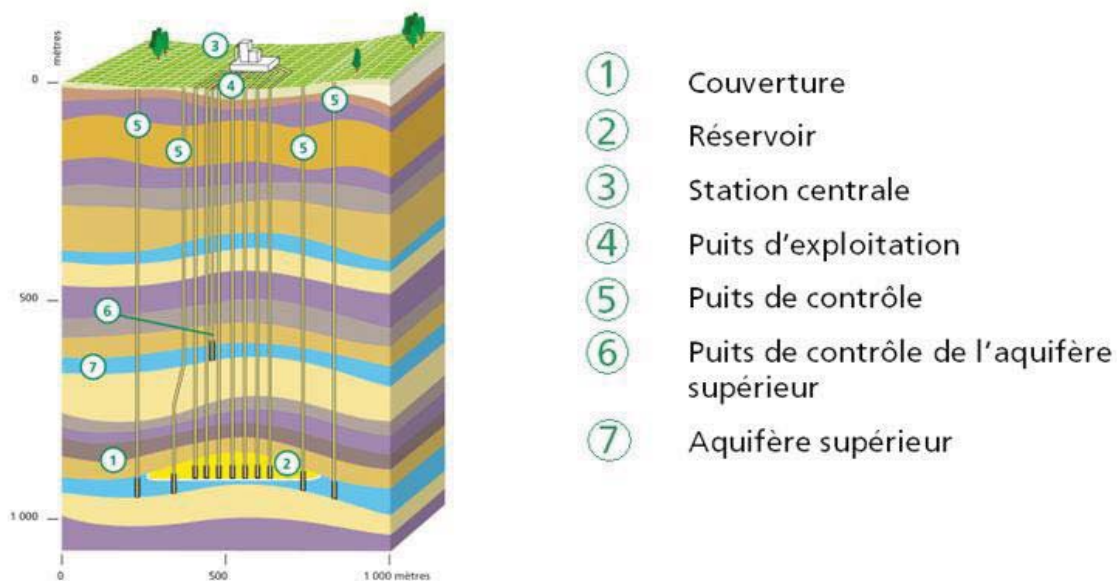
- les stockages en aquifères, c'est-à-dire dans des couches n'ayant jamais piégé d'hydrocarbures,
- les stockages en gisements déplétés, c'est-à-dire en gisements de gaz ou de pétrole déplétés et réutilisés à des fins de stockage.

Dans le cas d'un stockage en gisement déplété, l'étanchéité de la couverture est a priori garantie (à condition que celle-ci n'ait pas été compromise par des sollicitations excessives lors de l'exploitation) puisqu'elle a conditionné l'existence et la stabilité du réservoir d'hydrocarbures pendant plusieurs millions d'années. Un stockage en aquifère dit fermé, c'est-à-dire dont la couverture (généralement en forme d'anticlinal) constitue un scellement à la fois vertical et latéral, a une configuration proche d'un gisement d'hydrocarbures et offre a priori de bonnes garanties de confinement.

En phase de stockage, le gaz est comprimé et injecté à l'état gazeux dans le réservoir à une pression supérieure à la pression hydrostatique : il repousse le fluide occupant initialement les interstices de la roche (eau et/ou hydrocarbure selon le type de stockage) de sorte à être maintenu prisonnier entre la couche supérieure étanche et la nappe de fluide sous-jacent. Au déstockage, le gaz est soutiré sous l'effet de sa propre pression et le fluide d'origine peut reprendre sa place. Pour des raisons de perméabilité des terrains et de conditions d'exploitation, une quantité de l'ordre de la moitié du gaz stocké, appelée gaz coussin, reste à demeure dans le stockage.

Ce type de réservoir permet de stocker de très grandes quantités de gaz, de l'ordre de plusieurs milliards de mètres cubes. Il présente néanmoins une faible réactivité, liée à l'inertie importante des mouvements du gaz lors des opérations d'injection ou de soutirage.

Le stockage en milieu poreux est le mode de stockage souterrain le plus répandu en France (13 sites sur 28 soit 46% des stockages). Tous les stockages en milieux poreux actuellement exploités en France sont de type aquifère, à l'exception du stockage des Trois Fontaines (Meuse et Haute-Marne), en gisement déplété, mis en service en 2010.



**Figure 3 : Coupe schématique d'un stockage en milieu poreux
 (source : STORENGY)**

3.3.1.2 STOCKAGE EN CAVITE LESSIVEE

La technique du stockage en cavité lessivée consiste à créer par lessivage une cavité souterraine artificielle de grande taille dans une roche sédimentaire constituée uniquement ou pour partie de cristaux de chlorure de sodium (sel gemme ou halite). Les propriétés physiques et chimiques de cette roche, sa très faible porosité (de l'ordre du %), sa faible perméabilité (inférieure à 10^{-17} m^2 et plus généralement autour de $10^{-20} - 10^{-21}$), sa neutralité chimique et sa bonne tenue mécanique (en particulier résistance à la compression), y permettent le stockage de gaz naturel ou d'hydrocarbures liquides ou liquéfiés tels que le pétrole brut, le butane, le propane ou certains produits chimiques à destination industrielle tels que l'éthylène ou le propylène.

En pratique, le lessivage de la cavité s'opère par injection d'eau douce ou faiblement salée dans un puits foré. L'eau douce dissout progressivement le sel de façon contrôlée. C'est par ce même puits que la saumure produite est évacuée. Les cavités ainsi obtenues peuvent être de plusieurs centaines de mètres de hauteur et de plusieurs dizaines de mètres de diamètre, soit un volume géométrique allant de 15 000 à 1 000 000 m^3 environ. Les stockages sont généralement constitués de plusieurs cavités. La profondeur moyenne des cavités de stockage en France est de l'ordre de 1000 mètres, mais celle-ci peut varier entre 300 mètres (Manosque) et 1 400 mètres (Tersanne).

Une fois la cavité lessivée, le puits est « complété » en vue de la mise en exploitation. Il existe deux principes d'exploitation d'une cavité :

- par compression-détente : ce principe, utilisé exclusivement dans le cas du gaz naturel, est basé sur la compressibilité élevée de celui-ci. Il consiste à injecter le gaz dans la cavité à l'instar d'une bouteille de gaz comprimé. La pression du gaz doit :

- être suffisamment élevée pour compenser la forte pression du terrain et éviter une réduction du volume de la cavité,
- rester à un niveau raisonnable (entre 80 et 90% de la pression lithostatique) pour ne pas risquer une fracturation des terrains aux parements de la cavité.

Pour soutirer, il suffit ensuite d'ouvrir les vannes et de laisser le gaz sortir après l'avoir détendu à la pression du gaz des conduites ;

- par balancement de saumure : celui-ci consiste à compenser toute quantité de produit injectée ou soutirée par une quantité équivalente en volume de saumure soutirée ou injectée. Cette méthode est employée pour l'exploitation des fluides peu compressibles (hydrocarbures liquides, gaz de pétrole liquéfiés, produits chimiques).

Le stockage en cavités lessivées est très réactif : le passage d'une phase d'injection à une phase de soutirage est rapide. En revanche, la capacité de stockage est beaucoup plus faible que dans une couche aquifère.

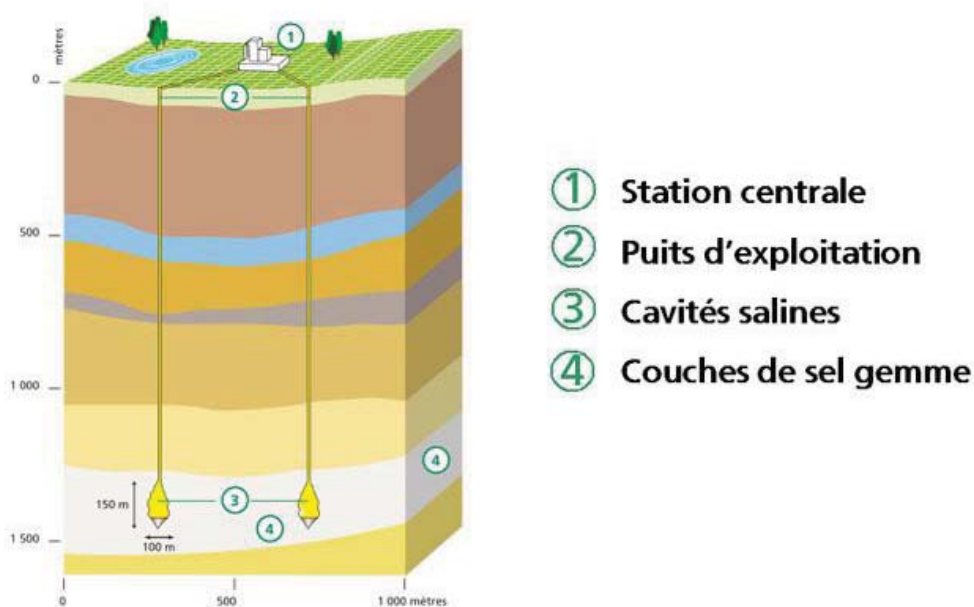


Figure 4 : Coupe schématique d'un stockage en cavités salines (source : STORENGY)

3.3.1.3 STOCKAGE EN CAVITE MINEE

Le principe du stockage en cavité minée consiste à creuser, selon des techniques minières, des ouvrages de quelques mètres à dizaines de mètres de diamètre, pour y stocker des hydrocarbures liquides ou liquéfiés. Ces ouvrages, qui prennent la forme de réseaux de tunnels, se situent à une profondeur généralement située entre 70 et 200 mètres, au sein d'une roche compétente et le plus souvent fracturée (granite, gabbro, granodiorite, andésite, gneiss ou encore craie), dans un contexte hydrogéologique garantissant le confinement du produit.

L'étanchéité de ce type de stockage est basée sur le principe du confinement hydraulique. Ce sont donc les paramètres hydrauliques locaux qui conditionnent la profondeur de la zone de stockage. Pour éviter que les produits stockés ne s'échappent, il faut que la cavité soit en dépression par rapport à la nappe. On impose ainsi un écoulement continu de l'eau de l'aquifère vers la cavité ce qui a pour effet de maintenir les hydrocarbures à l'intérieur de la cavité et ainsi d'éviter les fuites.

Pour garantir une bonne étanchéité du stockage, on met le plus souvent en place un rideau d'eau. Il s'agit d'un système composé d'une série de sondages non tubés généralement parallèles, réalisés à partir de la surface ou d'une galerie spécifique. Les séries de sondages sont placés le long de plans ou rideaux et permettent ainsi le contrôle voire la régulation du potentiel hydraulique à proximité de la cavité de stockage. L'existence de ce rideau d'eau s'impose en l'absence d'un système d'aquifère capable naturellement de maintenir une charge piézométrique suffisante face aux prélèvements dus à l'exhaure de la cavité de stockage ou à ceux d'une installation voisine préexistante. Son installation peut être décidée en phase de conception du stockage de manière à sécuriser et optimiser la marge hydraulique minimale d'exploitation et donc de ce fait la profondeur et le coût de l'ouvrage.

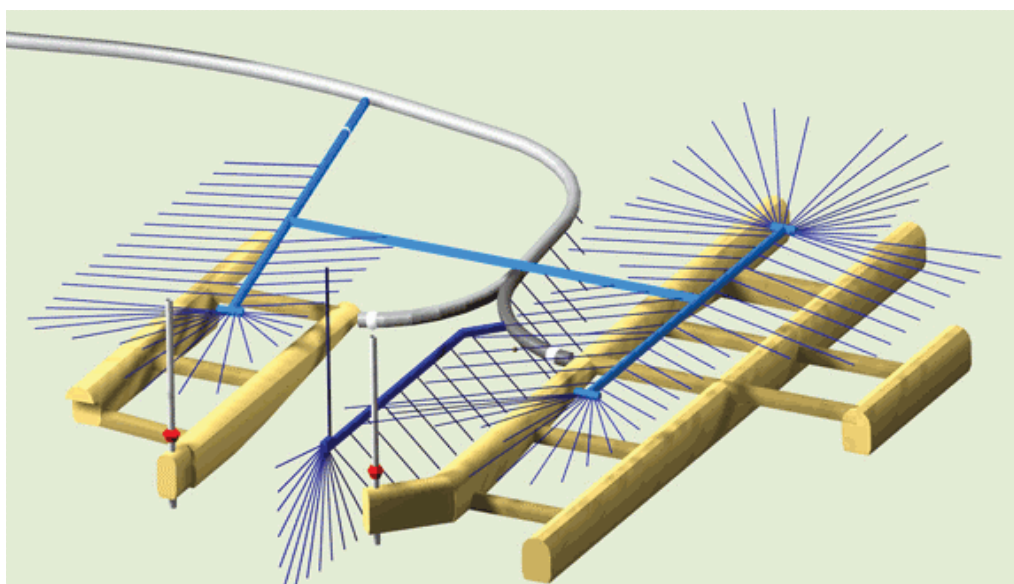


Figure 5 : Rideau d'eau pour le stockage en cavité minée (source : Geostock)

3.3.2 LES PUITES

Un puits est un ensemble de trous concentriques de diamètres décroissants, réalisés depuis la surface par forage, et revêtus de cuvelages en acier cimentés au terrain.

En fonction du type de réservoir et du produit stocké, on retrouve différents types de puits, décrits succinctement ci-après. Par ailleurs, en plus des puits d'exploitation, reliant la surface au réservoir et permettant le soutirage et l'injection de produit, les stockages en milieu poreux disposent de puits de surveillance.

3.3.2.1 Puits d'exploitation de gaz naturel : milieu poreux ou cavités lessivées en compression/détente

Les puits d'exploitation assurent alternativement l'injection et le soutirage du produit dans le réservoir. Pour un stockage de gaz naturel, qu'il s'agisse d'un stockage en milieu poreux (aquifère ou déplété) ou en cavité lessivée, ils sont constitués principalement :

- d'un ensemble de cuvelages concentriques, cimentés au terrain et traversant les différents horizons géologiques jusqu'au réservoir. Les cuvelages assurent un rôle de stabilité du puits et d'isolement des différentes couches traversées ;
- d'une colonne de production située à l'intérieur du dernier cuvelage cimenté, permettant la circulation du produit lors des phases d'injection et de soutirage. Cette colonne est entourée d'un espace annulaire contenant un gaz inerte, l'isolant de ce cuvelage ;
- d'une tête de puits, assurant la transition sous-sol/surface et reliant la colonne de production au réseau de collectes.

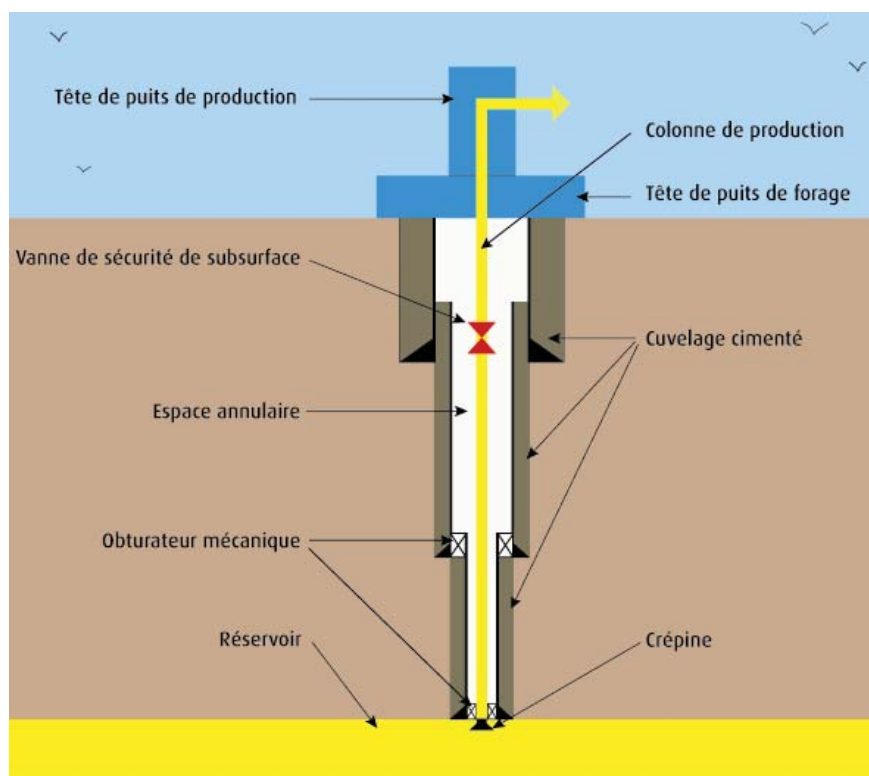


Figure 6 : Principe de fonctionnement d'un puits d'exploitation en milieu poreux

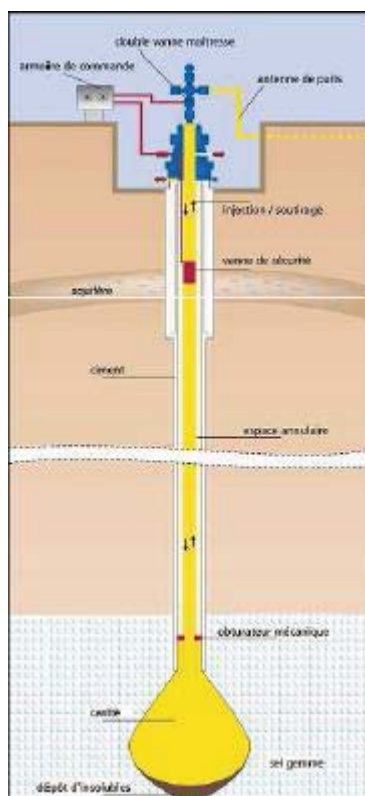


Figure 7 : Principe de fonctionnement d'un puits en compression/détente

La colonne de production comporte en général :

- un tubage descendant jusqu'au niveau du réservoir ;
- un certain nombre d'éléments de sécurité (vanne de subsurface isolant automatiquement le puits en cas de chute de pression anormale en tête de puits, obturateur annulaire permettant d'assurer l'ancrage du tubage sur le cuvelage et l'isolement de l'espace annulaire le cas échéant, etc.) ;
- un certain nombre d'éléments de fond (crépines, dispositif de fermeture et d'ancrage, dispositif de raccordement).

3.3.2.2 Puits en balancement de saumure

Utilisés pour les stockages de produits liquides ou liquéfiés en cavités salines, les puits d'exploitation des stockages exploités en balancement de saumure sont principalement constitués :

- d'un ensemble de cuvelages concentriques, cimentés au terrain ;
- d'une colonne de production, dans laquelle circule le produit ; Cette colonne peut-être constituée par le dernier cuvelage cimenté, ou bien distincte de celui-ci : dans ce cas, l'espace annulaire entre le dernier cuvelage cimenté et la colonne de production est en général rempli d'un fluide inerte ;
- d'une colonne centrale, située à l'intérieur de la colonne de production, par laquelle transite la saumure pendant les injections et les soutirages ;
- d'une tête de puits.

La base de la colonne centrale doit être située au plus près possible du fond de la cavité pour minimiser la perte de capacité de stockage. La colonne de production comporte un certain nombre d'éléments de sécurité et d'éléments de fond.

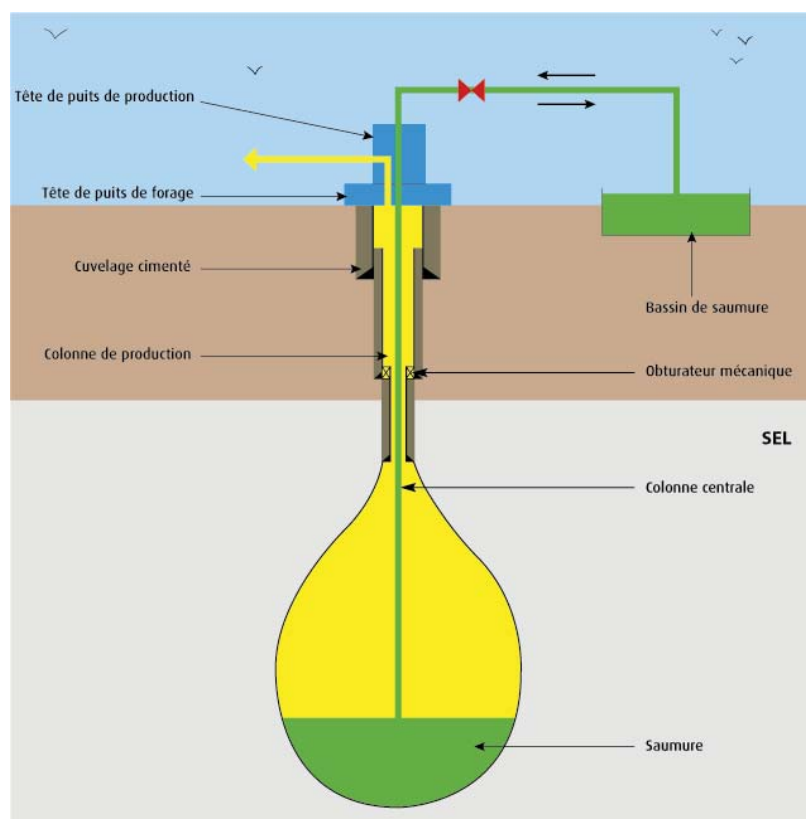


Figure 8 : Principe de fonctionnement d'un puits en balancement de saumure

La colonne centrale de circulation de la saumure est reliée en surface à un stockage tampon de saumure.

3.3.2.3 Puits de cavités minées

Plus complexe du fait du principe d'exploitation et de maintien de l'étanchéité d'une cavité minée, les puits d'exploitation de tels stockages comportent en général plusieurs circuits et tubages permettant de réguler les différentes phases du produit stocké, ainsi que la quantité d'eau présente dans la cavité. Un exemple est présenté ci-dessous.

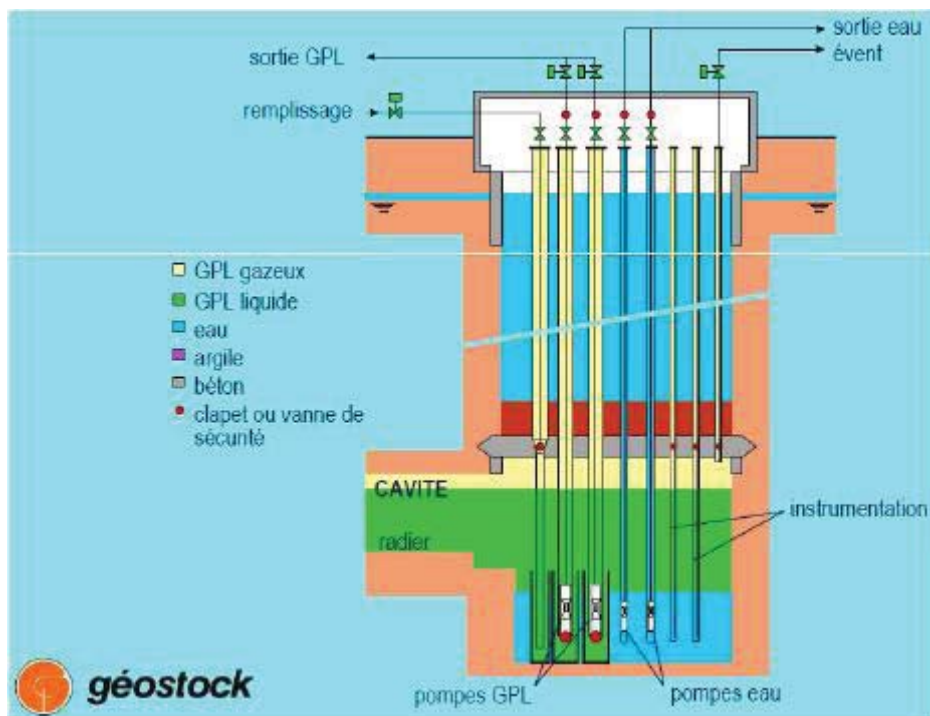


Figure 9 : Principe de fonctionnement d'un puits de cavité minée

3.3.2.4 Puits de surveillance

Pour les stockages en milieu poreux, des puits de surveillance permettent de surveiller la zone du réservoir et son confinement. Il existe différents types de puits de surveillance.

Ils peuvent être situés directement dans le réservoir, en périphérie de celui-ci pour vérifier son remplissage ou son étanchéité, ou bien encore dans les niveaux géologiques supérieurs.

Certains puits de surveillance, s'ils sont susceptibles de contenir du produit stocké, sont comme les puits d'exploitation équipés d'une vanne de subsurface assurant l'étanchéité vis-à-vis du milieu extérieur.

3.3.2.5 Les têtes de puits d'exploitation

Les têtes de puits comportent :

- la tête de puits de production (élément d'étanchéité) ;
- la tête de puits de forage, située sous la tête de production, sur laquelle s'ancrent les différents cuvelages du puits ;
- la manchette de liaison aérienne (col de cygne) entre la tête de puits et l'arrivée de la collecte ;
- le cas échéant le stockage ou bassin de saumure.

L'accès aux têtes de puits est réglementé, les zones sont clôturées.

Nota : Dans la suite du document, l'ensemble tête de puits de production/tête de puits de forage/manchette de liaison aérienne sera appelé « tête de puits ».

3.3.3 LES COLLECTES

Chaque puits d'exploitation est relié à la station centrale par un réseau de canalisations appelées collectes.

Ces collectes sont enterrées sur la majeure partie de leur tracé, posées en nappes et souvent reliées entre elles par des manifolds. Les collectes incluent l'ensemble des équipements nécessaires à leur fonctionnement (pot siphon, cave de point bas, etc.).

Les collectes sont caractérisées par leur diamètre, longueur, épaisseur et une pression maximale de service (PMS). Les longueurs de ces collectes dépendent naturellement de l'emplacement du puits (jusqu'à plusieurs kilomètres).

3.3.4 LA STATION CENTRALE

Les installations qui composent la station centrale peuvent être regroupées selon le type de fonction qu'elles remplissent (dépendant de la nature du produit exploité et du type de stockage) :

- Traitement du produit à injecter : pour injecter le produit dans le réservoir, un certain nombre de traitements peuvent être nécessaires ;
- Gestion du réservoir : il s'agit de gérer (mesurer et contrôler) les débits/pressions d'injection et de soutirage dans le réservoir ;
- Traitement du produit soutiré : selon la nature du produit exploité et du type de stockage, un traitement du produit soutiré peut être nécessaire (unités de déshydratation et de désulfuration, ...) ;
- Interconnexion avec les réseaux extérieurs au site de stockage.

On peut ainsi s'attendre à trouver sur cette station des stockages de produits dangereux (toxiques, inflammables, écotoxiques...), des installations de fournitures d'utilités (chaudières, air comprimé...), des compresseurs, des aires de chargement et de dépotage, etc.

Certaines unités de traitement de produit peuvent être déportées sur les plates-formes de tête de puits. C'est souvent le cas par exemple des unités d'injections d'inhibiteurs d'hydrates.

3.4 DESCRIPTION DES GRANDES PHASES D'EXPLOITATION D'UN STOCKAGE SOUTERRAIN

3.4.1 OPERATIONS D'INJECTION ET DE SOUTIRAGE

Suivant le type de stockage, le réservoir peut présenter des comportements différents : forte inertie pour les stockages en milieu poreux, forte réactivité pour les stockages en cavité.

Comme indiqué précédemment, pour permettre la circulation des fluides il est nécessaire de réaliser des opérations d'injection et de soutirage. Ces opérations peuvent être relativement simples (ouverture d'un puits sous pression pour le soutirage) ou plus complexes (exploitation d'une cavité par balancement de saumure).

En fonction du type de stockage et de ses modes d'exploitation, les différentes opérations doivent être étudiées car elles peuvent présenter des risques de nature différente.

3.4.2 OPERATIONS DE MAINTENANCE

Au-delà des opérations de maintenance ou d'entretien des installations de surface, certaines phases de maintenance sont spécifiques aux puits. On parle alors d'interventions sur puits. Certaines de ces interventions sont dites légères, au sens où elles n'impactent pas les barrières de sécurité essentielles du puits (cuvelages cimentés, tête de puits, vanne de subsurface), par opposition à des interventions plus lourdes qui nécessitent la dépose de la tête de puits. Ces différents types d'intervention doivent être envisagés séparément lors de l'analyse de risques car elles présentent des configurations et des risques associés spécifiques.

3.4.2.1 TRAVAUX EN PRESSION

Ces phases de travaux ne nécessitent pas la dépose de la tête de puits : l'intervention est donc réalisée sur le puits sous pression. En fonction de l'objectif recherché, il existe différentes techniques :

- le travail au câble lisse (ou slickline) consiste à utiliser des outils spécifiques reliés à la surface par un câble métallique de haute résistance d'un diamètre allant de 2 à 4 mm. Cette intervention permet la manœuvre de certains équipements au sein du puits ainsi que l'extraction et la remise en place d'éléments défectueux du puits pour remise en état ou remplacement. Cette intervention utilisée régulièrement sur les puits est une intervention légère.
- selon le même principe, la mesure au câble électrique (ou logging) consiste à descendre dans le puits des sondes de mesures électriques ou d'imagerie par un câble conducteur qui permet d'éditer et d'analyser les mesures in situ en surface. Les données acquises dans le puits peuvent concerner les caractéristiques physiques du produit (pression, température, échantillonnage,...) du puits (cement bond logging) ou de la cavité (forme, état de surface,...).
- le tube enroulé (ou coiled-tubing) consiste à introduire puis à extraire du puits sous pression un élément tubulaire continu en acier spécial de petit diamètre (19 à 44 mm, 3/4" à 1"3/4) et qui en surface s'enroule sur un touret. Toutes les opérations réalisées avec cette technique ont pour point commun d'obtenir la circulation d'un fluide liquide ou gazeux sur un niveau précis du puits (pour le nettoyage d'une complétion par exemple).

Les interventions se font par l'intermédiaire d'un sas, fixé sur la tête de puits, permettant l'utilisation d'appareils via la tête de puits sans mise en péril de l'intégrité du puits. Elles s'effectuent à vannes de sécurité ouvertes, permettant l'accès depuis le sas à la colonne de production.

3.4.2.2 INTERVENTIONS LOURDES

Certaines opérations de maintenance des puits plus lourdes nécessitent la dépose de la tête de puits.

A titre d'exemple, dans le cas de la dépose de l'ensemble de la complétion d'un puits de stockage en aquifère, le confinement du gaz dans le réservoir peut alors être garanti par une colonne de fluide dont la densité est soigneusement ajustée pour compenser la pression exercée par le gaz.

La fréquence de ces interventions étant très faible et inférieure à la fréquence de réactualisation des études de dangers, et ces interventions faisant par ailleurs l'objet d'un plan de prévention spécifique lorsqu'elles s'avèrent nécessaires, les phénomènes dangereux associés pourront ne pas être retenus à la suite de l'analyse de risques.

4. DEMARCHE POUR L'ELABORATION D'UNE ETUDE DE DANGERS (EDD) DANS LE CONTEXTE DES STOCKAGES SOUTERRAINS

4.1 DEMARCHE GENERALE POUR LA REALISATION D'UNE EDD

L'objectif d'une EDD est la démonstration par l'exploitant de la maîtrise des risques présentés par son site. Ainsi, l'EDD se doit :

- d'identifier l'ensemble des causes directes et indirectes de phénomènes dangereux qui pourraient conduire à des accidents majeurs,
- de caractériser les conséquences potentielles des phénomènes dangereux,
- d'évaluer la performance des barrières de sécurité permettant de maintenir le risque d'accident majeur à un niveau jugé acceptable.

Pour l'exploitant, l'EDD constitue un outil d'amélioration de la sécurité.

La démarche générale de réalisation d'une EDD est présentée sur la **Figure 10**.

L'étude de dangers doit ainsi traiter d'un certain nombre de points clés fondés sur une démarche d'analyse des risques. Ces points clés sont explicités au paragraphe 2.B « Contenu d'une d'étude de dangers » de la circulaire du 10 mai 2010. Il s'agit de :

- la description et caractérisation de l'environnement du site,
- la description des installations et de leur fonctionnement,
- la présentation du système de gestion de la sécurité (SGS),
- l'identification et caractérisation des potentiels de dangers,
- la réduction des potentiels de dangers,
- les enseignements tirés du retour d'expérience (accidents et incidents représentatifs),
- l'évaluation des risques présentés par le site,
- la caractérisation et le classement des différents phénomènes et des accidents potentiels en termes d'intensité des effets des phénomènes, de gravité des conséquences des accidents, de probabilité et de cinétique de développement en tenant compte des performances des mesures de prévention et de protection,
- les évolutions et mesures d'amélioration proposées par l'exploitant,
- une représentation cartographique,
- un résumé non technique.

Tous les points énumérés ci-dessus doivent être traités dans une étude de dangers mais n'en constituent pas pour autant un « plan type ».

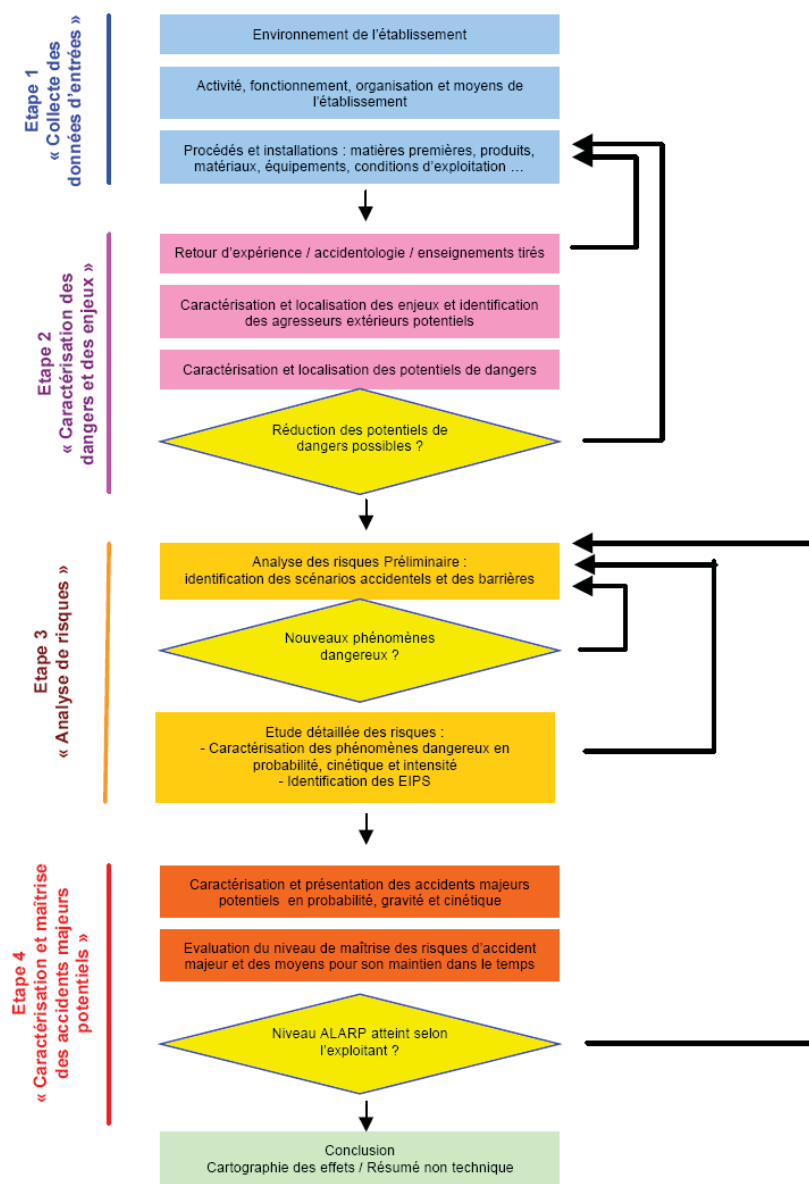


Figure 10 : Cheminement d'une étude de dangers

Sur la base du guide d'élaboration des études de dangers pour les établissements soumis au régime de l'autorisation avec servitudes, une EDD d'un stockage souterrain peut utiliser le plan type suivant :

- Résumé non technique et cartographie
- 1. Contexte et champ l'étude de dangers
- 2. Description et caractérisation de l'environnement
- 3. Description des installations et de leur fonctionnement
- 4. Identification et caractérisation des potentiels de danger
- 5. Réduction des potentiels de danger
- 6. Enseignements tirés du retour d'expérience (des accidents et incidents représentatifs)

- 7. Evaluation des risques
 - 7.1 Analyse préliminaire des risques
 - 7.2 Etude détaillée de réduction des risques
- 8. Caractérisation et classement des différents phénomènes et accidents, tenant compte de l'efficacité des mesures de prévention et de protection.

Plus de précisions sur le contenu de l'étude sont apportées dans les paragraphes suivants.

4.2 PARTIES DESCRIPTIVES

Les parties descriptives ont vocation à donner les informations nécessaires et suffisantes au lecteur pour la compréhension de l'analyse des risques.

La description de l'environnement a vocation à permettre l'identification :

- des enjeux à protéger (ERP, habitations, routes...),
- des facteurs environnementaux susceptibles d'être à l'origine, de manière directe ou indirecte, d'un accident majeur, ou bien d'être impactés par un tel accident (cours d'eau, nappes...).

Il est par ailleurs nécessaire de décrire les installations du site objet de l'étude ainsi que les différents modes d'exploitation, les dispositifs de sécurité mis en œuvre et l'organisation retenue par l'industriel au regard des objectifs de sécurité à respecter.

4.3 IDENTIFICATION, CARACTERISATION ET REDUCTION DES POTENTIELS DE DANGERS

Une liste des produits rencontrés sur les installations étudiées doit être fournie dans cette partie, que les produits soient des matières premières, des produits intermédiaires, des résidus, des utilités... Les propriétés physico-chimiques significatives, du point de vue de la maîtrise des risques, doivent être signalées, ainsi que leurs conditions d'exploitation, en particulier si celles-ci présentent des risques particuliers. Sur la base de cette liste, l'exploitant doit procéder à une étape d'évaluation des possibilités de diminution de ces potentiels de dangers.

Pour cela, les bonnes pratiques (souvent issues du retour d'expérience du secteur industriel concerné) et/ou les Meilleures Technologies Disponibles (relatives à la prévention et la réduction intégrées de la pollution et issues d'un travail européen entre experts, industriels et organisations de protection de l'environnement) peuvent être présentées.

Une phase de justification des choix techniques et économiques de mise en œuvre de substances dangereuses et de procédés présentant des dangers doit être réalisée dans l'étude de dangers.

Dans le cas d'un stockage souterrain visé à l'article L211-2 du Code Minier, le principal potentiel de dangers est le produit stocké. La quantité de produit stocké ne peut pas être réduite de par le caractère potentiellement stratégique de ces installations. Toutefois, d'autres produits peuvent être présents sur le site pour lesquels la démarche citée ci-avant doit être mise en œuvre.

4.4 ACCIDENTOLOGIE ET RETOUR D'EXPERIENCE

L'EDD doit présenter les incidents et accidents marquants du secteur d'activité étudié, ainsi que ceux survenus sur les installations du groupe, et éventuellement du site étudié.

La présentation de l'accidentologie relative au secteur d'activité a pour objectif :

- d'éclairer le lecteur sur les conséquences probables d'un accident,
- de préciser les mesures de sécurité mises en place par l'industriel pour éviter ce type d'accident,
- d'être un des éléments préalables à l'analyse de risques du site objet de l'étude.

Pour effectuer ce recensement, le rédacteur peut notamment s'appuyer sur la base ARIA du BARPI, ou toute autre base de données jugée pertinente.

4.5 EVALUATION DES RISQUES

L'évaluation des risques est un processus qui consiste à :

- identifier de la façon la plus exhaustive possible les phénomènes dangereux susceptibles de se produire, suite au déroulement de scénarios accidentels identifiés par la mise en œuvre d'une méthode adaptée aux installations et à leur mode d'exploitation. Ces scénarios accidentels peuvent être représentés sous forme de branches d'un nœud papillon construit autour d'un Evénement Redouté Central (ERC) avec, en amont, un arbre de causes (avec les événements initiateurs (EI)) et, en aval, un arbre de conséquences ;
- pour chaque phénomène dangereux, déterminer l'intensité des effets, la probabilité d'occurrence et la cinétique en tenant compte des mesures de maîtrise des risques mises en place par l'exploitant lorsque celles-ci sont performantes et en adéquation avec le risque ;
- caractériser la gravité de chaque accident majeur potentiel ;
- caractériser la maîtrise des risques pour chaque phénomène dangereux susceptible de conduire à un accident majeur et s'assurer que les fonctions de sécurité permettent autant que possible une défense en profondeur, c'est-à-dire qu'elles agissent tant en prévention, qu'en protection et en intervention.

L'évaluation des risques se décompose en deux étapes :

- l'analyse préliminaire des risques,
- l'étude détaillée des risques.

4.5.1 ANALYSE PRELIMINAIRE DES RISQUES

L'analyse préliminaire des risques a pour objectif d'identifier les séquences accidentelles susceptibles de conduire à un accident majeur. Pour cela, il s'agit de lister les causes admises comme pouvant conduire à un tel accident.

Cette analyse est généralement qualitative. En vue d'assurer l'exhaustivité d'une telle démarche, elle peut faire intervenir :

- des outils d'analyse de risques (APR, HAZOP, AMDEC...),
- une analyse de la conformité à des standards professionnels ou réglementaires,
- une analyse du retour d'expérience.

Pour plus de précisions sur la réalisation d'une analyse de risques, le lecteur est invité à se reporter au document : « Ω -7 Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle », rédigé par l'INERIS et disponible sur le site internet de l'institut (www.ineris.fr).

Les événements initiateurs (EI) peuvent être internes au site, mais également externes (agressions liées aux éléments naturels ou à l'activité humaine).

Une attention particulière doit être portée sur le traitement de la thématique des effets dominos internes et externes à l'établissement.

4.5.1.1 EVENEMENTS INITIATEURS LIES AUX EVENEMENTS NATURELS

Parmi ceux-ci, on retrouve notamment :

- les conditions climatiques. Elles peuvent avoir une incidence sur le fonctionnement des installations, en cas de températures extrêmes ou de forts vents ;
- la foudre. Le courant électrique se fraye un passage en choisissant, à partir de zone d'ionisations possibles (pointes métalliques, arbres, objets métalliques, objets organiques...) les trajets qui présentent la plus faible résistance électrique possible. La foudre peut donc parvenir aux installations soit directement, soit indirectement, par effet sur des éléments proches et transmission dans le sol. Cela peut donner lieu à des pertes de confinement en cas de détérioration d'une installation, mais aussi à une érosion du sous-sol ou à des perturbations électromagnétiques ;
- le séisme. Les secousses sismiques s'exercent sur une durée de temps très courte de l'ordre de la minute et s'accompagnent de vibrations horizontales et parfois verticales dans les couches superficielles. Toutes les installations sont donc sollicitées simultanément, soit indirectement par ruine des fondations, soit directement par mise en vibration des installations et de leurs équipements ;
- les mouvements de terrain d'origine naturelle (c'est-à-dire hors effondrements brutaux liés aux ouvrages souterrains). Le danger associé est la déformation des installations pouvant conduire à la perte de confinement par mouvements de terrains localisés, les installations subissant des contraintes de cisaillement ;
- les inondations. Les dangers associés sont une dégradation des caractéristiques mécaniques du terrain (pouvant provoquer des affaissements des installations) et un risque de dommages aux installations électriques (court - circuits). Pour les tuyauteries enterrées, la poussée

d'Archimède en cas de sol humide peut induire des contraintes et entraîner une perte de confinement ;

- les incendies de végétation. Un tel incendie est susceptible de se propager à l'intérieur du site et d'affecter les installations.

Cette liste est donnée à titre indicatif et n'est ni exhaustive, ni systématique.

4.5.1.2 EVENEMENTS INITIATEURS LIES AUX ACTIVITES HUMAINES EXTERIEURES AU SITE

Parmi ceux-ci, on retrouve notamment :

- la circulation routière et ferroviaire. Un accident sur des voies de circulation à proximité du site peut affecter les installations, notamment en cas de transport de matières dangereuses, pouvant être à l'origine d'un nuage inflammable ou toxique, mais aussi par agression mécanique ;
- le trafic aérien. Les risques sont ici liés à l'inflammation d'un rejet à l'atmosphère par un aéronef survolant le site à basse altitude, ou par la chute d'un aéronef sur une installation ;
- les travaux de tiers ou plus généralement l'agression mécanique externe. Il s'agit notamment d'agressions par un engin d'excavation ou encore d'une chute d'objet important (grue, pale d'éolienne) ;
- l'activité industrielle d'un site situé à proximité (effets dominos externes). Il s'agit alors d'une agression, thermique ou mécanique, liée à un accident survenant sur un site industriel extérieur situé dans l'environnement du stockage.

Cette liste est donnée à titre indicatif et n'est ni exhaustive, ni systématique.

4.5.1.3 EVENEMENTS INITIATEURS INTERNES AU SITE

Parmi ceux-ci, on retrouve notamment :

- la circulation routière sur le site. Un accident peut conduire à des détériorations et des pertes de confinement. La circulation d'engins au-dessus d'installations enterrées peut par ailleurs les détériorer par surcharge ;
- la corrosion, ayant pour origine un vieillissement des revêtements de protection, une insuffisance le cas échéant du courant de protection cathodique ou une agression par couplage galvanique entre deux pièces métalliques de compositions chimiques notablement différentes. La corrosion peut être à l'origine de pertes de confinement ;
- une dérive d'exploitation, ou une défaillance matérielle en conditions de fonctionnement normal. On regroupe dans « défaillance matérielle » une anomalie de conception, un défaut de fabrication, un défaut de pose ou un défaut de maintenance. Par ailleurs, il y a lieu d'identifier les dérives d'exploitation pouvant conduire à une perte de confinement : sur-remplissage en phase d'injection, fermeture impromptue de vanne donnant lieu à un coup de bélier, surpression interne aux équipements... ;
- les dangers spécifiques liés aux phases transitoires et aux opérations de maintenance, notamment sur les puits, ainsi qu'aux phases de travaux (choc par engin, chute de charges) ;

- les effets dominos internes. Il s'agit d'une agression, thermique ou mécanique, liée à un accident survenant sur autre installation du site située à proximité. Dans le cas d'un stockage souterrain il faut ajouter la possibilité d'un effondrement brutal de la surface du sol résultant de l'instabilité en profondeur d'un ouvrage propre au stockage ;
- la perte d'utilités. La perte d'alimentation en électricité ou toute autre utilité nécessaire au fonctionnement de l'installation induit un mode de fonctionnement dégradé susceptible d'être à l'origine d'un accident.

Cette liste est donnée à titre indicatif et n'est ni exhaustive, ni systématique.

4.5.1.4 TRAITEMENT PARTICULIER DE CERTAINS EVENEMENTS INITIATEURS

Le paragraphe 1.2.10 de la circulaire du 10 mai 2010 précise qu'à l'instar des règles définies pour les installations classées, certains événements initiateurs peuvent faire l'objet d'un traitement particulier dans l'étude de dangers d'un stockage souterrain. Ces événements initiateurs font en effet l'objet d'une réglementation déterministe par ailleurs. Sous réserve du respect de la réglementation idoine, la probabilité de l'événement initiateur ne sera pas évaluée et il ne sera pas tenu compte de cet événement dans la cotation de la probabilité du phénomène dangereux associé.

Pour rappel, les événements initiateurs concernés et réglementations associées susceptibles d'être étudiés dans l'analyse de risques d'un stockage souterrain sont présentés dans le tableau suivant :

<i>Evénement initiateur</i>	<i>Réglementation</i>
Séisme	Arrêté ministériel du 24 janvier 2011 modifiant l'arrêté du 4 octobre 2010 – Un projet d'arrêté est par ailleurs en cours afin de réglementer les règles de construction parasismiques applicables notamment aux canalisations, tuyauteries ou collectes minières de la classe dite normale.
Effets directs de la foudre	Arrêté ministériel du 19 juillet 2011 modifiant l'arrêté du 4 octobre 2010 et circulaire du 24 avril 2008 pour les installations où ils sont applicables
Crue	Dimensionnement des installations pour leur protection contre la crue de référence (indiquée dans le Plan de Prévention des Inondations). Une attention particulière doit être portée aux effets indirects.
Neige et vent (pour les chutes et ruines de structures)	Règles NV 65/99 modifiée (DTU P 06 002) et N 84/95 modifiée (DTU P 06 006). NF EN 1991-1-3 : Eurocode 1 – actions sur les structures – partie 1-3 : actions générales – charges de neige (avril 2004). NF EN 1991-1-4 : Eurocode 1 : actions sur les structures – partie 1-4 : actions générales – actions du vent (novembre 2005).
Défaut métallurgique structure d'un réservoir sous pression (applicable uniquement aux installations de la station centrale, hors tuyauteries, puits et massif)	Décret du 13 septembre 1999 modifié, arrêté du 21 décembre 1999, arrêté d'application du 15 mars 2000 pour les installations où ils sont applicables

Tableau 3 : Evénements initiateurs particuliers

A noter que ces événements initiateurs doivent cependant être pris en compte pour l'élaboration des plans d'urgence, si cela est pertinent pour le site étudié (voir partie 7).

4.5.1.5 EXCLUSION DE CERTAINS EVENEMENTS INITIATEURS

La circulaire du 10 mai 2010 précise également dans son paragraphe 1.2.10 les événements initiateurs spécifiques pouvant ne pas être pris en compte dans l'EDD en l'absence de règles ou instructions spécifiques. Il s'agit des événements suivants :

- chute de météorite ;
- séismes d'amplitude supérieure au séisme maximum de référence ;
- crues d'amplitude supérieure à la crue de référence,
- événements climatiques d'intensité supérieure aux événements historiquement connus ou prévisibles,
- chute d'avion hors des zones de proximité d'aéroport ou aérodrome, c'est-à-dire à plus de 2000 mètres de tout point des pistes de décollage ou d'atterrissage,
- rupture de barrage de classe A ou B ou d'une digue de classe A, B ou C, au sens des articles R. 214-112 et R. 214-113 du Code de l'Environnement,
- actes de malveillance.

Dans la plupart des cas, ces événements initiateurs exclus font l'objet d'une réglementation déterministe par ailleurs.

En revanche, ces événements sont également à considérer pour l'élaboration des plans d'urgence, si cela est pertinent pour le site étudié (voir partie 7).

4.5.2 ETUDE DETAILLEE DE REDUCTION DES RISQUES

Cette phase de l'EDD a pour objectif :

- de vérifier que les accidents potentiels identifiés lors de l'analyse préliminaire sont effectivement des accidents majeurs,
- de s'assurer que les dispositions de sécurité mises en œuvre par l'industriel sont suffisantes au regard des objectifs de sécurité à respecter.

Pour cela, il est nécessaire de caractériser chacun de ces accidents en probabilité, cinétique, intensité et gravité.

4.5.2.1 PROBABILITE

L'échelle de probabilité d'occurrence des accidents majeurs potentiels en 5 niveaux (A à E) est définie par l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005. La notion de probabilité servant de référence est celle de cet arrêté.

Plusieurs approches sont envisageables pour la détermination de cette probabilité d'occurrence : qualitative, semi-quantitative ou quantitative. Il s'agit par exemple de :

- cotation directe des phénomènes dangereux et des accidents majeurs associés,
- cotation des événements initiateurs ou des événements redoutés centraux (intégrant la défaillance des mesures de maîtrise des risques),
- utilisation de bases de données jugées pertinentes.

Classe de probabilité Type d'appréciation	E	D	C	B	A
Qualitative (pour un retour d'expérience suffisant)	« événement possible mais extrêmement peu probable » <i>n'est pas impossible au vu des connaissances actuelles, mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années et d'installations.</i>	« événement très improbable » <i>s'est déjà produit dans ce secteur d'activité mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement sa probabilité.</i>	« événement improbable » <i>un événement similaire déjà rencontré dans le secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis n'apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité.</i>	« événement probable » <i>s'est produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie de l'installation.</i>	« événement courant » <i>s'est produit sur le site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie de l'installation, malgré d'éventuelles mesures correctives.</i>
Semi-quantitative	Cette échelle est intermédiaire entre les échelles qualitative et quantitative, et permet de tenir compte des mesures de maîtrise des risques mises en place, conformément à l'article 4 du présent arrêté.				
Quantitative (par unité et par an)	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	

Tableau 4 : Echelle de probabilité telle que définie par l'arrêté du 29/09/2005

Dans le cas où tout ou partie du site serait concerné par le phénomène d'effondrement brutal, c'est-à-dire dans le cas celui-ci n'aurait pas été exclu de l'EDD après application des critères exposés au § 5.1.2.4.2, le tableau 5 propose une grille de correspondance entre l'échelle de prédisposition préconisée dans le guide PPRM et l'échelle de probabilité de l'arrêté du 29 septembre 2005.

Prédisposition du site au phénomène d'effondrement brutal	Classe de probabilité
<i>Peu sensible</i> : n'est pas impossible mais aucun événement similaire connu sur le site étudié ou sur un site similaire	E
<i>Sensible</i> : s'est déjà produit sur un site similaire ou le site étudié ou conjugaison de facteurs favorables à la survenue du phénomène redouté	C
<i>Très sensible</i> : s'est déjà produit sur un site similaire ou le site étudié et conjugaison d'un grand nombre de facteurs favorables à la survenue du phénomène redouté.	A

Tableau 5 : Correspondance entre l'échelle de prédisposition préconisée dans le guide PPRM et l'échelle de probabilité définie par l'arrêté du 29/09/2005

En pratique, et sauf circonstances exceptionnellement défavorables, les établissements éventuellement concernés par le phénomène d'effondrement brutal seront considérés comme « peu sensibles » à ce phénomène. Ce dernier sera donc généralement affecté de la classe de probabilité E.

4.5.2.2 CINETIQUE

L'arrêté ministériel du 29 septembre 2005 définit à ses articles 5 à 8 :

« L'adéquation entre la cinétique de mise en œuvre des mesures de sécurité mises en place ou prévues et la cinétique de chaque scénario pouvant mener à un accident doit être justifiée. Cette adéquation est vérifiée périodiquement, notamment à travers des tests d'équipements, des procédures et des exercices des plans d'urgence internes. »

« Les études de dangers fournissent des éléments de cinétique d'évolution des phénomènes dangereux et de propagation de leurs effets, tenant compte de la cinétique de mise en œuvre des mesures de sécurité, afin de permettre la planification et le choix des éventuelles mesures à prendre à l'extérieur du site. Ces éléments permettent notamment la définition par l'Etat des mesures les plus adaptées passives (actions sur l'urbanisme) ou actives (plans d'urgence externes) pour la protection des populations et de l'environnement. »

« Lors de l'évaluation des conséquences d'un accident, sont prises en compte, d'une part, la cinétique d'apparition et d'évolution du phénomène dangereux correspondant et, d'autre part, celle de l'atteinte des intérêts visés à l'article L. 511-1 du Code de l'Environnement puis de la durée de leur exposition au niveau d'intensité des effets correspondant. Ces derniers éléments de cinétique dépendent des conditions d'exposition des intérêts susvisés, et notamment de leur possibilité de fuite ou de protection. »

« La cinétique de déroulement d'un accident est qualifiée de lente, dans son contexte, si elle permet la mise en œuvre de mesures de sécurité suffisantes, dans le cadre d'un plan d'urgence externe, pour protéger les personnes exposées à l'extérieur des installations objet du plan d'urgence avant qu'elles ne soient atteintes par les effets du phénomène dangereux. »

4.5.2.3 INTENSITE

Afin de déterminer les distances d'effet liées aux phénomènes dangereux identifiés, des modèles de calcul sont à mettre en œuvre. Les hypothèses retenues pour cette détermination doivent être clairement exposées dans l'étude de dangers.

Les phénomènes dangereux ainsi caractérisés doivent permettre de déterminer les distances de PhD enveloppes.

En fonction de la nature et de l'état (sous pression, liquéfié...) des produits stockés, différents PhD peuvent être étudiés.

Il est à noter que dans le cas spécifique des stockages souterrains, aux trois types d'effets susceptibles de porter atteinte aux personnes que sont les effets thermiques, toxiques et de surpression, s'ajoute l'effet mécanique lié à un éventuel effondrement brutal de la surface du sol. La définition et les circonstances dans lesquelles un tel phénomène dangereux pourrait survenir dans le contexte d'un stockage souterrain est présentée dans la partie 5.1 spécifique au massif.

L'intensité des effets thermiques, de surpression ou toxiques d'un phénomène dangereux est définie par rapport à des valeurs-seuils de référence, définies dans l'Annexe II de l'arrêté du 29 septembre 2005. La notion d'intensité servant de référence est celle de cet arrêté. Ces valeurs sont présentées dans les tableaux suivants.

Zones de dangers pour la vie humaine	Seuils
Zone des dangers significatifs pour la vie humaine	Seuil des effets irréversibles (SEI)
Zone des dangers graves pour la vie humaine	Seuil des effets létaux (SEL) correspondant à une CL 1%
Zone des dangers très graves pour la vie humaine	Seuil des effets létaux significatifs (SELS) correspondant à une CL 5%

Tableau 6 : Valeurs de référence pour les seuils d'effets toxiques

Zones de dangers	Seuils d'effets sur les structures	Seuils d'effets sur l'homme
Destruction significative de vitres – zone des effets indirects par bris de vitres	20 mbar	20 mbar
Dégâts légers sur les structures – Zone des dangers significatifs pour la vie humaine (SEI)	50 mbar	50 mbar
Dégâts graves sur les structures – Zone des dangers graves pour la vie humaine (SEL)	140 mbar	140 mbar
Seuil d'étude des effets dominos – Zone des dangers très graves pour la vie humaine (SELS)	200 mbar	200 mbar
Dégâts très graves sur les structures	300 mbar	-

Tableau 7 : Valeurs de référence pour les seuils d'effets de surpression pour les structures et l'homme

Zones de dangers	Seuils d'effets sur les structures	Seuils d'effets sur l'homme
Zone des dangers significatifs pour la vie humaine (SEI)	-	3 kW/m ² ou 600 [(kW/m ²) 4/3].s
Destruction significatives de vitres – Zone des dangers graves pour la vie humaine (SEL)	5 kW/m ²	5 kW/m ² ou 1000 [(kW/m ²) 4/3].s
Seuil d'étude des effets dominos, dégâts graves sur les structures – Zone des dangers très graves pour la vie humaine (SELS)	8 kW/m ²	8 kW/m ² ou 1800 [(kW/m ²) 4/3].s
Dégâts très graves sur les structures, hors structures béton (seuil d'exposition prolongée)	16 kW/m ²	-
Dégâts très graves sur les structures béton (seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures)	20 kW/m ²	-
Seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes	200 kW/m ²	-

Tableau 8 : Valeurs de référence pour les seuils d'effets thermiques pour les structures et l'homme

Dans le cas où l'établissement serait concerné par le phénomène d'effondrement brutal, le tableau suivant propose une grille de correspondance entre l'échelle d'appréciation de l'intensité de l'effondrement (basée sur le caractère localisé ou généralisé de l'effondrement et le diamètre du cratère attendu en surface, en cohérence avec la démarche proposée dans le guide PPRM) et l'échelle d'intensité définie dans l'arrêté du 29 septembre 2005.

Zones de dangers pour la vie humaine	Seuils
Zone des dangers significatifs pour la vie humaine	-
Zone des dangers graves pour la vie humaine	Effondrement localisé de diamètre inférieur à 10 mètres
Zone des dangers très graves pour la vie humaine	Effondrement généralisé ou effondrement localisé d'un diamètre supérieur à 10 mètres

Tableau 9 : Correspondance aux seuils d'intensité pour le phénomène de mouvement de terrain brutal

Concernant les phénomènes dangereux mettant en jeu du gaz naturel, des éléments/hypothèses de modélisation sont fournis en **Annexe F**.

4.5.2.4 GRAVITE

L'échelle d'appréciation de la gravité servant de référence est celle de l'Annexe III de l'arrêté du 29 septembre 2005. Ces valeurs sont présentées dans les tableaux suivants.

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
Désastreux.	Plus de 10 personnes exposées (1).	Plus de 100 personnes exposées.	Plus de 1 000 personnes exposées.
Catastrophique.	Moins de 10 personnes exposées.	Entre 10 et 100 personnes.	Entre 100 et 1 000 personnes exposées.
Important.	Au plus 1 personne exposée.	Entre 1 et 10 personnes exposées.	Entre 10 et 100 personnes exposées.
Sérieux.	Aucune personne exposée.	Au plus 1 personne exposée.	Moins de 10 personnes exposées.
Modéré.	Pas de zone de létalité hors 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.

Tableau 10 : Echelle d'appréciation de la gravité telle que définie à l'Annexe III de l'arrêté du 29 septembre 2005

Pour le comptage de la population exposée, il convient de s'appuyer sur les règles définies dans la fiche n°1 de la circulaire du 10 mai 2010. Par ailleurs, des règles relatives à la cotation en probabilité-gravité pour le cas particulier de la dispersion atmosphérique sont définies dans la fiche n°5 de cette même circulaire.

4.5.2.5 PERFORMANCES DES BARRIERES DE SECURITE

Cette partie consiste à recenser les barrières de sécurité mises en œuvre par l'exploitant et à vérifier qu'elles sont en qualité et nombre suffisant pour arriver à un niveau de risque jugé acceptable.

La circulaire du 10 mai 2010 rappelle la définition de l'arrêté du 29 septembre 2005 des mesures de maîtrise des risques : « *Pour être prises en compte dans l'évaluation de la probabilité, les mesures de maîtrise des risques doivent être efficaces, avoir une cinétique de mise en œuvre en adéquation avec celles des éléments à maîtriser, être testées et maintenues de façon à garantir la pérennité du positionnement précité.* »

Par analogie avec les IC, la vérification de ces 4 critères doit être réalisée par l'exploitant dans l'étude de dangers, sur la base de toute méthode qu'il juge pertinente. On notera que l'exploitant peut s'appuyer, s'il le désire, sur les méthodes développées dans les documents « Ω -10 : Evaluation des Barrières Techniques de Sécurité » et « Ω -20 : Démarche d'évaluation des Barrières Humaines de Sécurité », rédigés par l'INERIS et disponibles sur son site internet ; ou encore sur la norme NF EN 61508 relative aux Systèmes Instrumentés de Sécurité.

Par ailleurs, la fiche n°7 de la circulaire du 10 mai 2010 fournit des éléments d'appréciation des mesures de maîtrise des risques fondées sur une intervention humaine.

4.6 CLASSEMENT DES ACCIDENTS MAJEURS

Cette étape constitue l'objectif réglementaire de l'EDD, à savoir la démonstration par l'exploitant de la maîtrise du risque que présente son site. Chaque accident majeur déterminé est placé dans une grille d'après son couple (probabilité, gravité) associé.

Gravité des conséquences	Probabilité (sens croissant de E vers A)				
	E	D	C	B	A
Désastreux					
Catastrophique					
Important					
Sérieux					
Modéré					

Tableau 11 : Grille probabilité-gravité

L'appréciation de la maîtrise du risque est ensuite du rôle du préfet, qui peut pour cela s'appuyer sur les règles définies dans la circulaire du 10 mai 2010 et notamment la grille d'appréciation présentée ci-dessous :

Gravité des conséquences	Probabilité (sens croissant de E vers A)				
	E	D	C	B	A
Désastreux	NON partiel (sites nouveaux) / MMR rang 2 (sites existants)	NON Rang 1	NON Rang 2	NON Rang 3	NON Rang 4
Catastrophique	MMR rang 1	MMR Rang 2	NON Rang 1	NON Rang 2	NON Rang 3
Important	MMR rang 1	MMR Rang 1	MMR Rang 2	NON Rang 1	NON Rang 2
Sérieux			MMR Rang 1	MMR Rang 2	NON Rang 1
Modéré					MMR Rang 1

Tableau 12 : Grille d'appréciation de la circulaire du 10 mai 2010

- Cette grille délimite trois zones de risque accidentel :
- une zone de risque élevée, colorée en rouge et figurée par le mot « NON » ;
- une zone de risque intermédiaire, colorée en rose et figurée par le sigle « MMR », dans laquelle une démarche d'amélioration continue est particulièrement pertinente ;
- une zone de risque moindre, colorée en vert, qui ne comporte ni « NON » ni « MMR ».

La gradation des cases « NON » et « MMR » en rangs correspond à un risque croissant. Cette gradation correspond à la priorité que l'on peut accorder à la réduction des risques, en s'attachant d'abord à réduire les risques les plus importants (rangs les plus élevés).

Une fois les accidents placés dans cette grille de criticité, trois situations sont possibles :

- Un ou plusieurs accidents sont situés en zone « NON »

Pour un nouveau site, le risque est présumé trop important pour pouvoir autoriser l'installation en l'état.

Pour un site existant, des propositions de mise en place de mesures de réduction complémentaire du risque à la source doivent être formulées par l'exploitant, cette mise en place devant se faire dans un délai défini par arrêté préfectoral. Ces mesures doivent permettre de sortir de la zone « NON ». Dans le cas où ces mesures ne permettraient pas de sortir de la zone « NON », le risque peut justifier une fermeture du site, sauf si le PPRT permet de ramener, dans un délai défini, l'ensemble des accidents identifiés hors de la zone « NON ».

- Un ou plusieurs accidents sont situés en zone « MMR », et aucun n'est situé la zone « NON »

L'exploitant devra alors s'assurer qu'il a analysé toutes les mesures de maîtrise du risque envisageables et mis en œuvre celles dont le coût n'est pas disproportionné par rapport aux bénéfices attendus.

En outre, si le nombre total cumulé d'accidents situés dans l'ensemble des cases « MMR Rang 2 » est supérieur à 5, il faut considérer le risque global comme équivalent à un accident situé en case « NON Rang 1 ». Peuvent être exclus de ce compte les accidents dont le niveau de probabilité est conservé dans sa même classe lorsque, pour chacun des scénarios menant à ces accidents, la probabilité de défaillance de la mesure de maîtrise des risques de plus haut niveau de confiance s'opposant à ce scénario est portée à 1 (en pratique, ce critère n'est possible que pour les accidents de classe de probabilité E). A noter que cette exclusion n'est pas applicable aux stockages souterrains de gaz pour lesquels une autre matrice et d'autres règles spécifiques s'appliquent tel que précisé au point 2.2.9 de la circulaire du 10 mai 2010.

Par ailleurs, pour les installations existant déjà le 29 septembre 2005, on ne comptabilisera que les accidents classés en « MMR Rang 2 » du fait de leurs effets létaux et on exclura donc ceux classés « MMR Rang 2 » en raison d'effets irréversibles.

- Aucun accident n'est situé en zone « NON » ou en zone « MMR »

Le risque résiduel, compte tenu des mesures de maîtrise du risque, est modéré et n'implique pas d'obligation de réduction complémentaire du risque d'accident.

En outre, dans le cas d'une demande d'extension ou de modification d'un stockage souterrain qui conduirait à augmenter les risques exposant des personnes extérieures au site, l'exploitant doit dans la mesure du possible s'assurer que cet accroissement des risques n'expose pas à des effets létaux des personnes qui n'y étaient pas exposées auparavant. A défaut, l'exploitant doit disposer des mesures techniques de maîtrise des risques permettant de conserver le niveau de probabilité de chaque accident dans sa même classe lorsque, pour chacun des scénarios y menant, la probabilité de défaillance de la mesure de maîtrise des risques de plus haut niveau de confiance s'opposant à ce scénario est portée à 1 (en pratique, ce critère n'est possible que pour les accidents de classe de probabilité E). A noter que cette exclusion n'est pas applicable aux stockages souterrains de gaz pour lesquels une autre matrice et d'autres règles spécifiques s'appliquent tel que précisé au point 2.2.9 de la circulaire du 10 mai 2010.

5. LES INSTALLATIONS OBJETS DE L'EDD

5.1 LE RESERVOIR

Le principe d'un stockage souterrain repose avant tout sur l'existence d'un réservoir, c'est-à-dire d'une cavité ou d'une formation poreuse dans laquelle est stocké le produit. Le réservoir est l'unité du stockage souterrain qui renferme la plus grande quantité de substances dangereuses et qui soumet, à ce titre, les stockages souterrains à la directive Seveso II. C'est donc en premier lieu aux risques liés à cette unité que l'on s'intéressera.

Bien que le réservoir soit situé en profondeur, ce qui éloigne le potentiel de dangers des cibles situées en surface (conférant ainsi au stockage souterrain un avantage considérable par rapport au stockage de surface du point de vue de la sécurité), l'accidentologie nous montre que ce stockage n'est pas exempt de risques. En effet, le réservoir peut être sujet à des fuites plus ou moins importantes, voire dans des circonstances exceptionnelles à des instabilités mécaniques, qui peuvent potentiellement avoir des répercussions importantes en surface. Il convient donc d'analyser les risques liés au réservoir au même titre que les autres unités d'un stockage (puits, collectes, station centrale), et de maîtriser ces risques par des mesures de prévention et de surveillance appropriées.

La circulaire du 10 mai 2010 a clairement exprimé, à cet égard, la volonté de l'Administration de renforcer la prise en compte des risques liés au réservoir dans les EDD de stockages souterrains. Elle définit, aux paragraphes 1.2.10.C et 1.2.10.D, les conditions dans lesquelles la maîtrise de ces risques par l'exploitant peut être jugée acceptable. Le présent chapitre rappelle et précise ces conditions.

Il est à noter que ces dispositions reprennent, en grande partie, les propositions d'un groupe de travail « GT massif » qui a procédé en 2009 à une analyse générique des risques liés au réservoir des stockages souterrains et qui a défini un ensemble minimal de mesures à mettre en œuvre en vue de leur maîtrise.

5.1.1 ACCIDENTOLOGIE

Le tableau ci-après rassemble l'ensemble des accidents ou incidents recensés dans le domaine des stockages souterrains de gaz ou d'hydrocarbures et mettant en cause, d'une manière plus ou moins directe, le réservoir. Ce recensement s'appuie essentiellement sur l'exploitation des sources suivantes :

- la base ARIA du BARPI,
- le rapport du Health and Safety Executive (HSE) : « An appraisal of underground gas storage technologies and incidents, for the development of risk assessment methodology » (Evans, 2008),
- le rapport « Etude bibliographique sur les accidents dans les bassins salifères résultant d'une dissolution volontaire ou non » (Brouard, 2002).

Les résultats du tableau sont fournis par type d'exploitation (aquifère, gisement déplété, cavités salines, cavités minées, mines reconverties) et pour chaque type d'exploitation, par ordre chronologique des accidents (du plus récent au plus ancien).

Type d'exploitation	Libellé de l'accident/incident	Fluide exploité	Date ou période de l'accident*	Pays	Région / Département	Lieu	Profondeur des formations du réservoir (m)	Opération en cours lors de l'accident*	Elément concerné	Phénomène	Type d'événement	Causes	Nb de morts	Nb de blessés	Observations	Sources
Aquifère	1978-Leroy	Gaz naturel	1978	Etats-Unis	Wyoming	Aquifère Leroy	900	Exploitation courante	Réservoir	Rejet dans le massif Rejet à l'atmosphère	Fuite à travers la couverture	Incertaines (fracturation possible de la couverture du fait d'une pression d'exploitation trop importante)	0	0	Rejet de 17 000 000 m3 pendant 10 ans (en cumulé avec 1973-Leroy)	Arakinci et al. (1984), Katz & Tek (1991) cité par Nelson et al. [2005].
Aquifère	1972-Pleasant Creek	Gaz naturel	1972 à 1976	Etats-Unis	Californie	Pleasant Creek, à l'ouest de Sacramento	760	Exploitation courante	Réservoir	Rejet à l'atmosphère	Non précisé	Non précisé	0	0		Evans, 2008 ; Jones & Drozd, 1983 ; Jones & Pirkle ; http://www.earthchemistry.com/FinalVersion1_10.htm
Aquifère	1971-Sciota	Gaz naturel	1971 à 1974	Etats-Unis	Illinois	Sciota		Exploitation courante	Réservoir	Rejet dans le massif	Fuite à travers la couverture	Défaut d'étanchéité de la couverture	0	0	Abandon du site en 1974	Buschbach & Bond (1974), Coleman et al. (1977), HSE (2008)
Aquifère	1970-Chalk Creek	Gaz naturel	Depuis 1970	Etats-Unis	Utah	Chalk Creek et Coalville		Exploitation courante	Réservoir	Rejet à l'atmosphère	Fuite à travers la couverture	Incertaines (failles ?)	0	0	Abandon du site	Jones & Drozd, 1983); Morgan (2004)
Aquifère	1968-Leaf River	Gaz naturel	1968 à 1971	Etats-Unis	Illinois	Leaf River, comté d'Ogle	250	Exploitation courante	Réservoir	Rejet dans le massif	Fuite à travers la couverture Fuite par une faille	Non précisé	0	0	Abandon du site	Buschbach & Bond (1974); Coleman et al. (1977); Hunt (2004), Chasser, 2004
Aquifère	1963-Pontiac	Gaz naturel	1963 à 1974	Etats-Unis	Illinois	Pontiac, comté de Livingston	900	Exploitation courante	Réservoir	Rejet dans le massif	Fuite à travers la couverture	Défaut d'étanchéité de la couverture	0	0	Abandon du site en 1974	Buschbach & Bond (1974), Coleman et al. (1977), Evans (2008)
Aquifère	1963-Brookville	Gaz naturel	1963 à 1966	Etats-Unis	Illinois	Brookville, comté d'Ogle	320	Exploitation courante	Réservoir	Rejet dans le massif	Fuite à travers la couverture Fuite par une faille	Non précisé	0	0	Abandon du site	Buschbach & Bond (1974); Coleman et al. (1977); Hunt (2004), Chasser, 2004
Aquifère	1961-Manlove	Gaz naturel	1961-1963	Etats-Unis	Illinois	Manlove, nord-ouest du comté de Champaign		Exploitation courante	Réservoir	Rejet dans le massif	Non précisé	Non précisé	0	0		Buschbach & Bond (1974); Coleman et al. (1977), Evans (2008)
Aquifère	1960-Waverley	Gaz naturel	Début 1960	Etats-Unis	Illinois	Waverley, comté de Morgan		Exploitation courante	Réservoir	Rejet dans le massif	Fuite à travers la couverture	Non précisé	0	0	Abandon du site	Buschbach & Bond (1974); Coleman et al. (1977), Evans (2008)
Aquifère	1960-Kezlin Knoblauch	Gaz naturel	1960	Allemagne	Non précisé	Kezlin, Knoblauch, 25 km à l'ouest de Berlin		Exploitation courante	Réservoir	Rejet à l'atmosphère	Fuite à travers la couverture Fuite par une faille	Non précisé	1	0	Evacuation de la ville de Knoblauch	Juhlin et al. (2007); NJ Riley (pers com., 2007) Evans, 2008 ; Ziegler, 1990 ; Kossovo, et al., 2000 ; Foster et al., 2006 http://www.mydellaquest.com/english/Archive-New-technology-would-store-carbon-underground ;
Aquifère	1957-Troy Grove	Gaz naturel	1957 à 1959	Etats-Unis	Illinois	Troy Grove, comté de La Salle	430	Exploitation courante	Réservoir	Rejet dans le massif Rejet à l'atmosphère	Fuite à travers la couverture	Non précisé	0	0		Evans (2008) Buschbach & Bond (1974); Coleman et al. (1977); Hunt (2004), Chasser, 2004
Aquifère	1953-Herscher	Gaz naturel	04/1953 à 06/1953	Etats-Unis	Illinois	Herscher		Exploitation courante	Réservoir	Rejet dans le massif	Non précisé	Non précisé	0	0		Evans (2008) Buschbach & Bond (1974); Coleman et al. (1977)
Aquifère	0000-Northern Indiana	Gaz naturel	Non précisé	Etats-Unis	Non précisé	Northern Indiana	457	Exploitation courante	Réservoir	Rejet dans le massif	Non précisé	Mauvaise sélection de site (réservoir trop près de la surface)	0	0	Abandon du site	Evans (2008) Buschbach & Bond (1974); Coleman et al. (1977)
Gisement déplété	1997-Southern Illinois	Gaz naturel	07/02/1997	Etats-Unis	Illinois	Southern Illinois		Exploitation courante	Réservoir	Rejet à l'atmosphère	Atteinte du réservoir par un forage tiers	Non précisé	0	3		Evans (2008) Findlaw (2002)
Gisement déplété	1980-Epps	Gaz naturel	1980 à 1990	Etats-Unis	Louisiane	Epps		Exploitation courante	Réservoir	Sans objet (incident)	Non précisé	Non précisé	0	0	Migration de gaz vers un autre gisement	Evans (2008)

Type d'exploitation	Libellé de l'accident-incident	Fluide exploité	Date ou période de l'accident	Pays	Région / Département	Lieu	Profondeur des formations réservoir (m)	Opération en cours lors de l'accident	Elément concerné	Phénomène	Type d'événement	Causes	Nb de morts	Nb de blessés	Observations	Sources
Gisement dépiété	1975-Castaic Hills	Gaz naturel	Depuis 1975	Etats-Unis	Californie	Gisements de Castaic Hills et Honor Rancho, à l'est de Ventura dans le comté de Los Angeles		Exploitation courante	Réservoir	Rejet à l'atmosphère	Fuite par une faille	Non précisé	0	0		Evans (2008) Davis et Namson (2004) ; Khlyuk et al. (2000)
Gisement dépiété	1970-El Segundo	Gaz naturel	Début 1970	Etats-Unis	Californie	El Segundo, au sud-ouest de Los Angeles	915 à 2210	Exploitation courante	Réservoir	Rejet à l'atmosphère	Non précisé	Non précisé	0	0	Gaz détecté dans un loissement à proximité Abandon du site	Evans 2008 ; Egleston, 1948 ; Landes et al., 1980 ; Khlyuk et al., 2000
Gisement dépiété	1970-East Whittier	Gaz naturel	Années 1970	Etats-Unis	Californie	East Whittier		Exploitation courante	Réservoir	Rejet dans le massif	Non précisé	Non précisé	0	0		Evans (2008) Benson et Hepple (2005) ; EIA (2006)
Gisement dépiété	1940-Playa del Rey	Gaz naturel	Depuis 1940	Etats-Unis	Californie	Gisement de Playa del Rey, à l'ouest de Los Angeles		Exploitation courante	Réservoir	Rejet à l'atmosphère	Non précisé	Non précisé	0	0	Migration du gaz de la structure "Playa del Rey" à la structure "Ventce"	Evans (2008) Reigle (1953) ; Exploration Technologies Inc. (2000) ; SoCal (2004) ; Chlingar et Endres (2005)
Cavités salines	1995-Mineola	Propane	1995 (1993?)	Etats-Unis	Texas	Mineola, Houston		Tests d'injection	Réservoir	Explosion Incendie	Mise en communication de cavités Fuite à travers le couvage	Fragilisation du piler par injections successives de saumure sous saturée. Rupture du couvage suite à augmentation de pression liée à la mise en communication des cavités	0	0		Evans (2008) Gebhardt et al. (1996); Bérest & Brouard (2003); Warren (2006); (http://www.wildwell.com/Firefighting/fr_nsa4.htm)
Cavités salines	1993-Mont Belieu	Propane	15/06/1905	Etats-Unis	Texas	Mont Belieu Barbers Hill	400 à 700 (couche de sel)	Non précisé	Réservoir	Effondrement	Eboulement de la cavité	Agrandissement de la cavité suite à une dissolution accidentelle engendrée par un puits fuyard	2	0	Effondrement localisé : ornière d'enfoncement de 12 m de diamètre et de 6 m de profondeur Evacuation de 2000 personnes	Brouard (2002), HSE(2008) Bérest et Brouard (2003)
Cavités salines	1980-Stratton Ridge	Gaz naturel	Années 1990	Etats-Unis	Texas	Stratton Ridge, Freepport		Essai en pression de la cavité	Réservoir	Rejet dans le massif	Fuite à travers les parois de la cavité	Rupture des parois de la cavité	0	0		Evans (2008) Hopper (2004)
Cavités salines	1980-Conway	Propane	1980-2002	Etats-Unis	Kansas	Conway, McPherson County		Exploitation courante	Réservoir	Rejet dans le massif	Fuite à travers le toit du sel	Dissolution au toit de la cavité (vet rockhead)	0	0	120 personnes déplacées de 1980 à 1981	Evans (2008) Ratigan et al (2002)
Cavités salines	1972-Eminence	Gaz naturel	avr-72	Etats-Unis	Mississippi	Eminence	1800	Exploitation courante	Réservoir	Sans objet (incident)	Convergence de la cavité par fluage	Pression d'exploitation trop faible			Perte de volume de la cavité de 40% en 2 ans Affaissement en surface	Fenix & Scisson Inc (1983) cité par Bérest et Brouard (2003)
Cavités salines	1970-Tersanne	Gaz naturel	1970 à 1979	France	26	Tersanne	1450	Exploitation courante	Réservoir	Sans objet (incident)	Convergence de la cavité par fluage	Sel très fluant			Perte de volume de 60% en 35 ans Affaissement en surface	Dunp (1991), Ghoreych et al. (1987), Vouille et al. (1984) cités dans Bérest et Brouard (2003), Dunp (2007)
Cavités salines	1960-Kiel	Gaz de ville Hydrogène	Depuis 1960	Allemagne	Non précisé	Kiel		Exploitation courante	Réservoir	Sans objet (incident)	Convergence de la cavité par fluage	Sel très fluant				Evans (2008)
Cavités salines	1954-Bayou Choctaw	Saumure	mai-05	Etats-Unis	Louisiane	Bayou Choctaw, Bâton Rouge		Lessivage	Réservoir	Effondrement	Rupture totale de cavité	Lessivage excessif				
Cavités salines	1950-Bryan Mound	Non précisé	Années 1950	Etats-Unis	Texas	Bryan Mound		Non précisé	Réservoir	Rejet dans le massif	Non précisé	Non précisé				Evans (2008)
Cavités salines	0000-Napoleonville	Saumure	Non précisé	Etats-Unis	Louisiane	Napoleonville		Lessivage	Réservoir	Rejet dans le massif	Fuite en paroi de la cavité	Cavité trop proche du bord du dôme de sel				

Type d'exploitation	Libellé de l'accident-incident	Fluide exploité	Date ou période de l'accident*	Pays	Région / Département	Lieu	Profondeur des formations réservoir (r)	Opération en cours lors de l'accident	Élément concerné	Phénomène	Type d'événement	Causes	Nb de morts	Nb de blessés	Observations	Sources
Cavités salines	0000-Clovelly	Saumure	Non précisé	Etats-Unis	Louisiane	Clovelly		Lessivage	Réservoir	Rejet dans le massif	Fuite au toit de la cavité	Epaississeur insuffisante de la planche de sel				
Cavité minée	1973-Ravensworth	Propane	24/08/1973	Etats-Unis	Virginie	Ravensworth		Non précisé	Réservoir	Rejet à l'atmosphère	Non précisé	Non précisé	0	0		Evans (2008)
Ancienne mine de charbon	1980-Andriettes	Gaz naturel	1980 à 2000	Belgique	Non précisé	Andriettes		Exploitation courante	Réservoir	Rejet dans le massif	Non précisé	Défaut d'étanchéité de la couverture	0	0	Arrêt des opérations en 2000 suite à une connexion avec des niveaux exploités peu profonds	Plessors & Duesar (2003)
Ancienne mine de charbon	1985-Crossville	Propane	1985 à 2000	Etats-Unis	Illinois	Crossville		Exploitation courante	Réservoir	Rejet dans le massif	Non précisé	Défaut d'étanchéité de la couverture	0	0		Evans (2008) Pirkle (1986), Pirkle & Price (1986), Jones & Burrell (1994)
Ancienne mine de charbon	1960-Leyden	Gaz naturel	1960 à 2000	Etats-Unis	Colorado	Leyden, Anada		Exploitation courante	Réservoir	Rejet dans le massif	Non précisé	Défaut d'étanchéité de la couverture	0	0	Formation d'un nuage de gaz au-dessus de la zone de stockage \$ 278.000 de dommages Abandon en 2001	Evans (2008) Raven Ridge Resources (1998)
Ancienne mine de fer	1995-May sur Orne	Gazole	1995	France	14	May sur Orne		Post-exploitation	Réservoir	Rejet à l'atmosphère	Emission de radon	Accumulation du radon dans les galeries minières laissées vides après le déstockage des hydrocarbures	0	0	Mise sous surveillance du site	Brocard H. (1983), cité par Kimmel (2004), Besnard (2006)
Ancienne mine de fer	1982-May sur Orne	Gazole	1982	France	14	May sur Orne		Exploitation courante	Réservoir	Rejet à l'atmosphère	Production accidentelle de méthane d'origine biologique	Introduction dans le réservoir d'une flore bactérienne via l'eau de compensation non traitée utilisée pour l'exploitation du stockage	0	0	Arrêt de l'exploitation	Brocard H. (1983), cité par Kimmel (2004), Besnard (2006)
Ancienne mine de sel par chambre et piliers	1995-Weeks Island	Pétrole brut	1995	Etats-Unis	Non précisé	Mine de sel de Weeks Island		Exploitation courante	Réservoir	Effondrement	Rupture au toit d'une galerie de stockage	Dissolution du sel au toit par des discontinuités naturelles	0	0	Effondrement localisé : cratère d'effondrement de 4,3 m de diamètre et de 3 m de profondeur	Bauer et al (2000), Ehgartner (1993), Hofman (1994) cités par Brouard (2002)
Ancienne mine de sel par chambre et piliers	1992-Weeks Island	Pétrole brut	1992	Etats-Unis	Non précisé	Mine de sel de Weeks Island		Exploitation courante	Réservoir	Effondrement	Rupture au toit d'une galerie de stockage	Dissolution du sel au toit par des discontinuités naturelles	0	0	Effondrement localisé : cratère d'effondrement de 11 m de diamètre et de 9 m de profondeur	Bauer et al (2000), Ehgartner (1993), Hofman (1994) cités par Brouard (2002)
Cavités salines	1980-Twenthe-Rijn	Sel	1980 à 1995	Pays-Bas	Non précisé	Twenthe-Rijn	350 à 400	Exploitation courante	Réservoir	Affaissement	Rupture au toit de la cavité	Instabilité non prévue des cavités due à la surestimation des propriétés mécaniques des roches de couverture	0	0	Alertance d'affaissements lents (12 mm/an) et rapides (5m/an) en fonction des formations rencontrées par la cavité lors de sa remontée vers la surface	Wassmann (1980 et 1995)
Cavités salines	2002-Heiligreee	Sel	2002	Pays-Bas	Non précisé	Heiligreee, nord-est des Pays-bas	700 à 1400	Exploitation courante	Réservoir	Affaissement	Convergence de la cavité par fluage	Non précisé			Vitesse d'affaissement maximal de 5,6 mm/an	Eckemeier et al. (2002)

Tableau 13 : Accidentologie des stockages souterrains : accidents liés au réservoir

Le recensement effectué fait état de 38 événements (accidents ou incidents) mettant en cause le réservoir souterrain. Ces 38 événements couvrent l'ensemble des types de stockages souterrains : aquifères (13), gisements déplétés (6), cavités salines (11), cavités minées (1), anciennes mines reconverties (7). On remarque que la majorité de ces événements sont relativement anciens (les deux tiers ont eu lieu avant les années 1980), c'est-à-dire à une époque où les technologies et les pratiques de sécurité n'étaient pas comparables à celles d'aujourd'hui.

Sur le plan de la typologie, on distingue deux grandes catégories d'événements :

- les fuites de produit (82% des cas). Sur l'ensemble des cas de fuites recensés, plus de la moitié (54%) n'ont pas atteint la surface : le produit s'est accumulé dans des formations superficielles, voire des aquifères, dans lesquels il est resté piégé ;
- les instabilités mécaniques de cavités (18% des cas). Ces instabilités se produisent essentiellement dans le contexte salin, et sont généralement liées à une dissolution accidentelle du sel ou à une convergence importante des cavités du fait du fluage du sel. On recense 4 cas où des cavités se sont éboulées (1954-Bayou Choctaw, 1993-Mont Belvieu, 1992-Weeks Island, 1995-Weeks Island) ; ces accidents ont tous donné lieu à un effondrement en surface.

En ce qui concerne les fuites de produit, les principales causes rapportées dans l'accidentologie sont :

- pour les stockages en aquifère et en gisement déplété : des fuites par des failles présentes dans la couverture ou des fractures liées à une pression d'exploitation trop importante. On recense également un cas de percement de la couverture par un forage tiers (1997-Southern Illinois) ;
- pour les stockages en cavités salines : une dissolution incontrôlée du sel en paroi de la cavité, des fuites de produit à travers des bancs plus perméables (insolubles) présents dans le sel ou encore, une fracturation du sel liée à une pression d'exploitation trop importante ;

Notons que nous n'avons recensé qu'un seul cas d'accident lié au réservoir dans des stockages en cavité minée (1973-Ravensworth). De plus, ce cas est très peu documenté. Enfin, on rapporte 7 accidents dans des stockages effectués dans d'anciennes mines reconverties (mines de fer, mines de charbon ou mines de sel par chambres et piliers). Notons que ce type de stockage est désormais abandonné en France.

5.1.2 ANALYSE PRELIMINAIRE DES RISQUES

Sur la base des enseignements tirés de l'accidentologie, de l'examen de la bibliographie et de l'expertise des participants, le GT massif a conduit une analyse générique des risques liés aux réservoirs des stockages souterrains. Cette analyse a mené à l'élaboration de nœuds-papillon (NP) génériques de scénarios d'accidents, reportés ici en **Annexe B**. Ces arbres indiquent, pour chaque type de stockage :

- les phénomènes dangereux redoutés,
- les séquences-types pouvant mener à ces phénomènes dangereux,

- les principales mesures de maîtrise des risques pouvant être mises en œuvre pour s'opposer au déroulement de ces séquences accidentelles.

Les mesures de maîtrise des risques explicitement citées dans la circulaire du 10 mai 2010 comme critères d'exclusion de phénomènes dangereux sont précisées dans ces nœuds-papillon.

Sans commenter ici en détail le contenu de ces NP, les paragraphes suivants apportent quelques éléments de précision.

5.1.2.1 PHENOMENES DANGEREUX

Le réservoir d'un stockage souterrain peut donner lieu à deux types de phénomènes dangereux :

- un rejet de gaz en surface engendrant une inflammation (jet enflammé) ou une explosion (VCE ou UVCE),
- un effondrement brutal de la surface du sol consécutif à l'éboulement d'un ouvrage souterrain (cavité de stockage, galerie de liaison fond-jour) ou d'un réseau de cavités. Cet effondrement peut prendre la forme d'un effondrement localisé ou généralisé selon le contexte du site.

Il convient de remarquer que les conceptions actuelles des stockages souterrains et leurs modes d'exploitation et de surveillance rendent le phénomène d'effondrement brutal extrêmement peu probable en phase d'exploitation.

Remarque : un affaissement progressif des terrains (voir définition en **annexe A**) n'est pas considéré comme un phénomène dangereux, au sens où il peut générer des désordres en surface (dommages aux bâtiments, modification du réseau hydrographique, etc.) mais ne présente pas de danger direct pour les personnes.

5.1.2.2 ERC REPRESENTATIFS

Pour le phénomène de rejet de gaz en surface, l'événement redouté central associé est la fuite du réservoir. Celle-ci est affichée dans les NP par l'événement « rejet de produit en surface », correspondant au phénomène de remontée de gaz explicité dans la circulaire.

Pour le phénomène d'effondrement brutal, l'événement redouté central est :

- dans le cas d'un stockage en cavité saline, la « rupture dépassant les limites de la couche ou du dôme de sel »,
- dans le cas d'un stockage en cavité minée, la « rupture de la galerie de stockage » ou la « rupture d'un tunnel d'accès ».

A noter que conformément aux dispositions de la circulaire, le phénomène d'effondrement brutal est écarté pour les stockages en milieu poreux.

5.1.2.3 EVENEMENTS INITIATEURS

Les causes (ou événements initiateurs) susceptibles de mener à une fuite du réservoir ou à un effondrement brutal sont très variées et diffèrent selon le type de stockage. La revue détaillée de l'ensemble de ces causes dépasse le cadre du présent guide. Nous renvoyons le lecteur aux NP de l'Annexe B, qui donnent une vue d'ensemble des principales causes possibles, et pour plus de détails, à la lecture des documents suivants :

- An appraisal of underground gas storage technologies and incidents, for the development of risk assessment methodology, D.J. Evans, Health and Safety Executive (HSE), rapport RR605, 2008 ;
- Storage of hydrocarbons in underground formations, Canadian Standards Association, Z341 Series -10, 2010.

5.1.2.4 CRITERES D'EXCLUSION

5.1.2.4.1 CRITERES D'EXCLUSION DU RISQUE DE REMONTEE DE GAZ

La circulaire du 10 mai 2010 définit, au paragraphe 1.2.10.D, un ensemble de mesures de maîtrise des risques (MMR) dont la mise en œuvre intégrale permet d'écarter le risque de rejet de produit en surface de l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source, du PPRT et du PPI. Ces mesures ne sont pas reprises ici mais apparaissent dans les NP de l'**Annexe B**. On notera que la mise en œuvre complète de ces MMR permet d'avoir au minimum deux MMR sur chaque séquence accidentelle menant à l'ERC.

Notons que toutes ces mesures sont rédigées sous forme d'objectifs (ou fonctions de sécurité). Leurs modalités pratiques de mise en œuvre ne sont pas précisées dans la circulaire ; celles-ci restent à l'appréciation de l'exploitant, qui doit démontrer, dans son étude de dangers, que les dispositions particulières prises dans le cas de son stockage permettent bien de remplir ces fonctions de sécurité.

5.1.2.4.2 CRITERES D'EXCLUSION DU RISQUE D'EFFONDREMENT BRUTAL

La circulaire du 10 mai 2010 définit, au paragraphe 1.2.10.C, un ensemble de mesures de maîtrise des risques (MMR) dont la mise en œuvre intégrale permet d'écarter le risque d'effondrement brutal de l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source, du PPRT et du PPI. Ces critères sont issus des recommandations formalisées dans la note INERIS référencée DRS-09-103911-09771A, reportée en **Annexe E** du présent document.

Notons que la démarche qui a prévalu dans la définition de ces critères était de définir des critères relativement simples, de préférence géométriques et indépendants de la configuration géologique propre à chaque site.

Les principes retenus sont les suivants :

- Pour les stockages en cavités minées :
 - En ce qui concerne la cavité proprement dite :

- Le phénomène d'effondrement généralisé peut être exclu si le rapport D/P est inférieur à 0,5, P étant la profondeur de la cavité et D la plus petite extension horizontale du stockage (Figure 11) ou si le taux de défrètement (voir définition ci-après) est inférieur à 50% ;
- Le phénomène d'effondrement localisé peut être exclu si le rapport P/H est supérieur à 15, P représentant la profondeur du toit de la cavité minée et H l'ouverture de cette cavité (voir Figure 11). Lorsque ce critère n'est pas respecté, le phénomène peut être considéré comme à cinétique lente sous réserve que des mesures de surveillance (parmi lesquelles doivent figurer a minima une écoute microsismique, un suivi piézométrique dans le périmètre du stockage et un contrôle des pressions interstitielles au toit de la cavité) soient mises en œuvre et qu'il soit fait la démonstration que ces dispositifs sont efficaces, correctement maintenus et qu'ils permettent d'alerter le préfet au moins 24 heures avant que le phénomène ne débouche en surface ;
- En ce qui concerne les ouvrages d'accès à la cavité (descenderies) :
 - Le phénomène d'effondrement généralisé ne s'applique pas ;
 - Le phénomène d'effondrement localisé doit faire l'objet d'un traitement intégral dans l'EDD, la démarche de maîtrise des risques et le PPRT.
- Pour les stockages en cavités lessivées :
 - Le risque d'effondrement généralisé peut être exclu si le nombre de cavités est inférieur à trois ou si le taux de défrètement (voir définition ci-après) est inférieur à un taux critique égal à :

$$T = 1 / [2 * \exp (0,00125 * P - 0,5) - 1] ;$$

où P est la profondeur du toit de la cavité exprimée en mètres.

- Le risque d'effondrement localisé peut être exclu si la profondeur du toit de la cavité est supérieure à 700 m ou si l'épaisseur de la planche de sel (en mètres) laissée au toit de la cavité est supérieure à chacune des grandeurs suivantes :

$$E1 = 0,5 * D_{eq} * [\exp (0,000625 * P - 0,333) - 1]$$

$$E2 = B/3$$

$$E3 = 25$$

où P est la profondeur du toit de la cavité, D_{eq} est le diamètre équivalent d'une sphère de même volume que la cavité et B est la largeur maximale de la cavité en tout point de son profil, ces quantités étant exprimées en mètres.

La définition du taux de défrètement à considérer pour l'application de ces critères est donnée au § 1.2.10.C-2 de la circulaire : « Ratio entre la surface totale des projections au sol des cavités et la surface du polygone reliant ces projections au sol dans lequel ces projections sont inscrites ».

Pour éviter toute confusion sur le tracé de ce polygone B, nous invitons à considérer, de manière systématique, celui de plus grande surface dont aucun sommet ne se situe en dehors des contours projetés des cavités. Cette définition est illustrée sur la Figure 12 et des exemples d'erreurs dans le tracé de ce polygone sont représentés sur la **Figure 13**.

Il convient de remarquer que cette définition du taux de défrètement peut avoir, du fait qu'elle ne prend pas en compte la contribution à la stabilité, des terrains extérieurs au polygone B précédemment défini, un caractère excessivement pénalisant dans certaines configurations. C'est le cas, par exemple, pour des stockages dont la géométrie est peu assimilable aux schémas de type 'chambres et piliers' (par exemple, ceux où le nombre de cavités, de galeries ou d'excavations principales tend vers un).

Au regard de ces éléments, dans le cas où l'exploitant jugerait que la définition du taux de défrètement proposée dans la circulaire est excessivement pénalisante et que de ce fait, le critère DFR-01 ne peut pas être rempli, il pourra proposer une démonstration étayée du caractère irréaliste d'un effondrement généralisé compte-tenu du contexte géomécanique du stockage concerné, justifiant que ce risque soit écarté de l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source, du PPRT et du PPI.

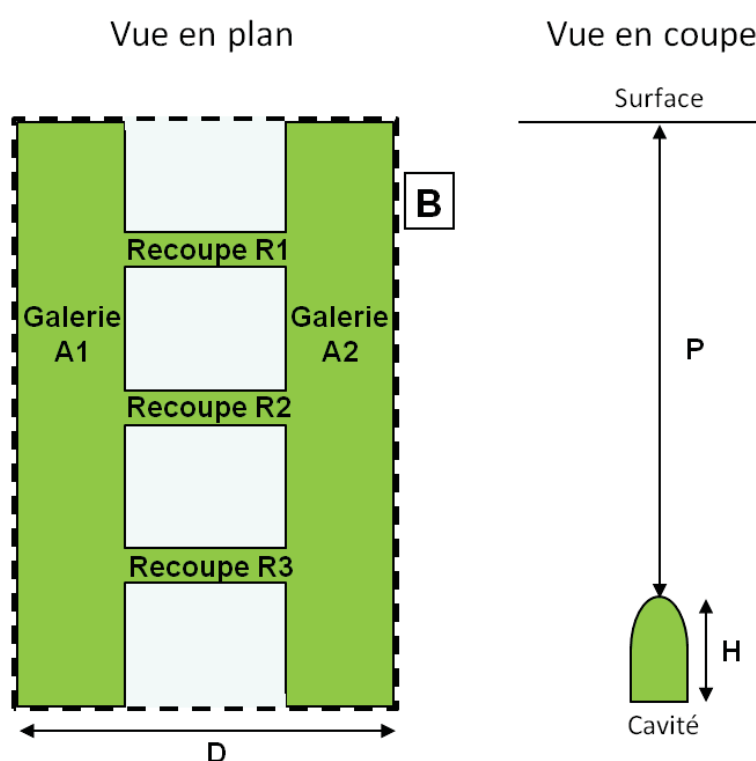


Figure 11 : Illustration de la définition de D, P et H dans le cas d'un stockage en cavités minées (les vides sont représentés en vert). B représente le polygone à utiliser pour le calcul du taux de défrètement.

Projections en surface des cavités

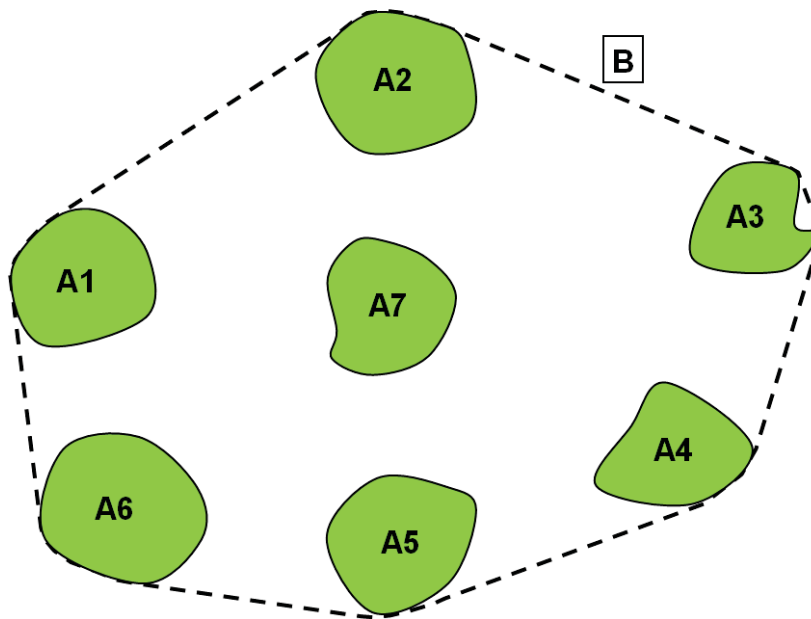


Figure 12 : Illustration schématique, dans le cas d'un stockage en cavités salines, du polygone B à considérer pour le calcul du taux de défrètement.

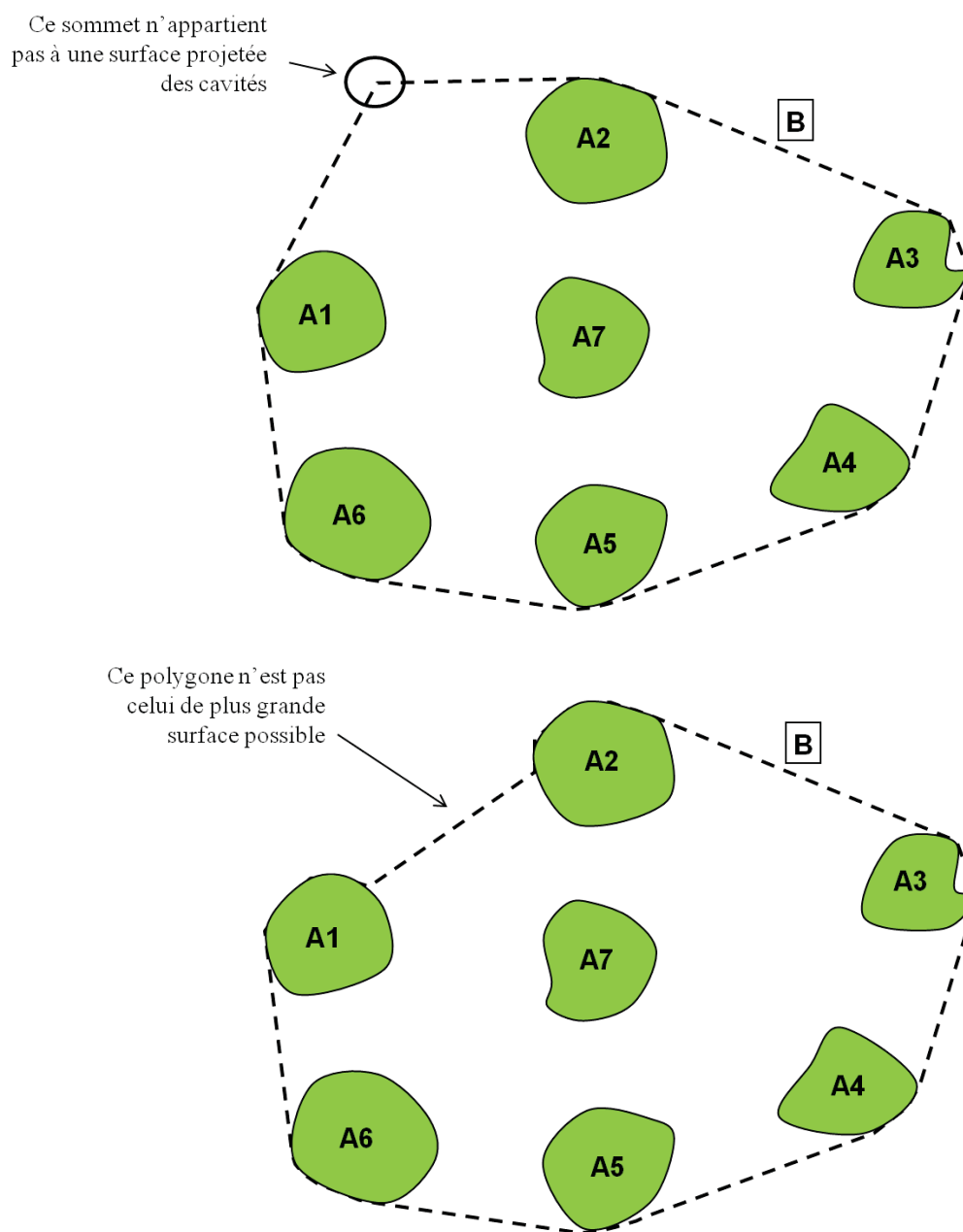


Figure 13 : Exemples d'erreurs possibles dans le tracé du polygone B

5.2 LES Puits D'EXPLOITATION ET DE CONTROLE

5.3 LES Puits D'EXPLOITATION ET DE CONTROLE

5.3.1 ACCIDENTOLOGIE

Les tableaux ci-après rassemble l'ensemble des accidents ou incidents recensés dans le domaine des stockages souterrains de gaz ou d'hydrocarbures et mettant en cause, d'une manière plus ou moins directe, le puits. Ce recensement s'appuie essentiellement sur l'exploitation des sources suivantes :

- la base ARIA du BARPI,
- le rapport du Health and Safety Executive (HSE) : « An appraisal of underground gas storage technologies and incidents, for the development of risk assessment methodology » (Evans, 2008),
- le rapport « Etude bibliographique sur les accidents dans les bassins salifères résultant d'une dissolution volontaire ou non » (Brouard, 2002).

Les résultats de chaque tableau sont fournis par type d'exploitation (aquifère, gisement déplété, cavités salines et indéfinies) et pour chaque type d'exploitation, par ordre chronologique des accidents (du plus récent au plus ancien).

Type d'exploitation	Libellés de l'accident-incident	Fluide exploité	Date ou période de l'accident	Pays	Région / Département	Lieu	Opération en cours lors de l'accident	Elément concerné	Phénomène	Type d'événement	Causes	Nb de morts	Nb de blessés	Observations	Sources
Cavités salines	2012- Manosque	Gazole	23/01/2012	France	04	Manosque	Injection	Puits	Sans objet (incident)	Rupture de la cobrine centrale	Non précisé				ARIA n°41801
Cavités salines	2007 - Manosque 3	Non précisé	09/11/2007	France	04	Manosque	Non précisé	Basin de saumure	Sans objet (incident)	Non précisé	Non précisé	0	0		ARIA n°38242
Cavités salines	2007 - Manosque 2	Fluide domestique	12/03/2007	France	04	Manosque	Non précisé	Tête de puits	Rejet au sol	Fuite sur les équipements de la tête de puits	Non précisé	0	0		ARIA n°38242
Cavités salines	2004-Odessa	Propane	16/03/2004	Etats-Unis	Texas	Odessa	Non précisé	Tête de puits	Rejet à l'atmosphère	Défaillance d'une bride de tête de puits	Non précisé	0	0	Rejet de 116,5 m³ de gaz pendant 4h	Hazardous Cargo Bulletin (June 2004); N Riley (pers com, 2007); http://www.accessmylibrary.com/consz/summary_0286-17925865_ITM
Cavités salines	2004-Moss Bluff	GPL	19/08/2004	Etats-Unis	Texas	Moss bluff	Injection	Puits Tuyauterie	Explosion Incendie	Fuite sur le circuit saumure	Rupture par coup de bélier de la tuyauterie corrodée suite à la fermeture de la vanne de sécurité du puits liée à une intrusion de gaz dans la cobrine centrale	0	0	Rejet de 170 000 000 m³ de gaz pendant 6,5 h. 360 personnes évacuées	ARIA n°23709 Evans (2008) Hopper [2004]; Sent & al [2005]
Cavités salines	2003-Magnolia	Gaz naturel	24/12/2003	Etats-Unis	Louisiane	Magnolia, Napoléonville	Non précisé	Puits	Rejet à l'atmosphère	Fuite par le cuvelage	Non précisé	0	0	Rejet de 9 900 000 m³ de gaz en quelques heures. 30 personnes évacuées	Evans (2008) Hopper (2004); http://www.bgt.com/sec/Pipeline%2010K%2012-31-05%20FINAL.pdf
Cavités salines	2001- Hutchinson	Gaz naturel	17/01/2001	Etats-Unis	Kansas	Hutchinson, Yaggy	Reprise de puits	Puits	Explosion Incendie	Remontée par la cimentation	Malfacon lors de la reprise du puits	2	1	Rejet de 2 000 000 m³ de gaz pendant 4 jours. Plus de 250 personnes évacuées	ARIA n°20712, Evans (2008) Allison [2001], Kansas Geological Survey Web Site [2001]; Berest et Brouard [2003]
Cavités salines	1992-Brenham	GPL	07/04/1992	Etats-Unis	Texas	Brenham	Injection	Puits	Explosion Incendie	Eruption de puits	Intrusion de gaz dans la cobrine centrale due au sur-remplissage de la cavité. Défaillance des systèmes de sécurité	3	23	Entre 500 et 1600 de gaz rejété. 50 personnes évacuées	ARIA n°5244, HSE(2008) National Transportation Safety Board (NTSB) [1993]; Berest et Brouard [2003]
Cavités salines	1988- Teutschental	Ethylène	mars-88	Allemagne	Non précisé	Teutschental	Non précisé	Puits	Rejet à l'atmosphère	Eruption de puits	Non précisé				Evans (2008)
Cavités salines	1988-Clute	Ethylène	1988 / 1989	Etats-Unis	Texas	Clute	Exploitation courante	Puits	Rejet dans le massif	Fuite à travers le cuvelage	Non précisé	0	0	Durée de la fuite : 125 jours	Evans (2008) Kometz (2007) http://kometz.com/pdf/EI-hylene-safety-incidents.pdf
Cavités salines	1985-Mont Belvieu	Propane	05/11/1985	Etats-Unis	Texas	Mont Belvieu, Barbers Hill	Non précisé	Puits	Explosion Incendie	Fuite à travers le cuvelage	Corrosion du cuvelage	2	0	Evacuation de 2000 personnes	Brouard [2002], HSE(2008) Berest et Brouard [2003]
Cavités salines	1982-Tersanne	Gaz naturel	09/08/1982	France	01	Tersanne	Intervention au câble	Tête de puits	Rejet à l'atmosphère Projection	Fuite au niveau du sas	Non précisé	0	0		ARIA n°34482
Cavités salines	1980-Mont Belvieu	GPL	17/09/1980	Etats-Unis	Texas	Mont Belvieu, Barbers Hill	Non précisé	Puits	Explosion Incendie	Fuite à travers le cuvelage	Corrosion du cuvelage	0	0	Evacuation de 50 familles (300 pers)	ARIA 20712 Brouard [2002], HSE(2008) Berest et Brouard [2003]
Cavités salines	1980- Mississippi	Gaz naturel	Au début des années 1980	Etats-Unis	Mississippi	Non précisé	Exploitation courante	Puits	Rejet dans le massif	Remontée par la cimentation	Mauvaise cimentation	0	0		Evans (2008) Pirkle (1986) ; Pirkle & Jones (2004)
Cavités salines	1978-West Hackberry	Pétrole brut	sept-78	Etats-Unis	Louisiane	West Hackberry	Intervention lourde	Puits	Incendie	Eruption de puits	Rupture du bouchon provisoire d'isolement de la cavité. Non dépressurisation de la cavité avant intervention	1	0	Rejet de 11500 m³ de gaz. Evacuation à grande échelle	ARIA n°21742 Evans (2008) DOE (1980) ; Berest et Brouard (2005)
Cavités salines	1977-Tersanne	Gaz naturel	13/07/1977	France	01	Tersanne	Intervention au câble	Tête de puits	Rejet à l'atmosphère Projection	Fuite au niveau du sas	Défaillance du sas suite à mauvais équilibrage des pressions avant ouverture de la vanne de sas	0	0		ARIA n°34481
Cavités salines	1974-Petal	Butane	août-74	Etats-Unis	Mississippi	Petal	Exploitation courante	Puits	Explosion Incendie	Eruption de puits	Surremplissage de la cavité	0	24	3000 personnes évacuées	ARIA n°14314
Cavités salines	0000- Goodyear	Propane	Non précisé	Etats-Unis	Arizona	Goodyear	Exploitation courante	Puits	Rejet dans le massif	Fuite à travers le cuvelage	Corrosion	0	0	Plusieurs dizaines de milliers de m³ de gaz rejétés	Evans (2008)

Tableau 14 : Accidentologie des stockages souterrains en cavité saline : accidents liés aux puits

Type d'exploitation	Libellé de l'accident-incident	Fluide exploité	Date ou période de l'accident	Pays	Région / Département	Lieu	Profondeur des formations réservoir (m)	Opération en cours lors de l'accident	Elément concerné	Phénomène	Type d'événement	Causes	Nb de morts	Nb de blessés	Observations	Sources
Gisement dépiété	2006-Fort Morgan	Gaz naturel	22/10/2006	Etats-Unis	Colorado	Fort Morgan, comté de Morgan		Exploitation courante	Puits	Rejet à l'atmosphère	Remontée par la cimentation	Non précisé	0	0	Evacuation de 13 familles (52 pers) Routes environnantes fermées	Evans (2008) State of Colorado (2006) http://onto.aria.doe.gov/o g/info/ngw/update.as p
Aquifère	2004-Spandau	Gaz naturel	04/2004	Allemagne	Non précisé	Spandau, à l'ouest de Berlin		Intervention sur puits	Puits	Explosion incendie	Fuite sur les équipements de la tête de puits	Incertaines	0	9	Evacuation de 500 personnes sur un rayon de 1 km	Evans (2008)
Gisement dépiété	2003-Breitbrunn	Gaz naturel	2003	Allemagne	Bavière	Gisement de Breitbrunn/Eggstätt		Exploitation courante	Puits	Sans objet (incident)	Pression annulaire anormale	Non précisé	0	0		Evans, 2008 ; Bary et al., 2002 ; Rohrer et al., 2004 ; Ueberer et al., 2004
Aquifère	1995-Stenille	Gaz naturel	1995	Danemark	Non précisé	Stenille, à environ 70 km au sud-ouest de Copenhague	1500	Forage	Puits	Rejet dans le massif Rejet à l'atmosphère	Fuite à travers le cuvelage	Non précisé	0	0		Evans (2008) Lalier et Øbro (2004) Lalier et Øbro (in press)
Aquifère	1989-Chémery	Gaz naturel	25/09/1989	France	41	Chémery	1120	Intervention sur puits	Puits	Rejet à l'atmosphère	Eruption de puits	Non précisé	0	0	Rejet de 150000 m3/h de gaz pendant 50 h Périmètre de sécurité de 300 m Circulation aérienne interdite sur un rayon de 10 km Lignes électriques fermées.	ARIA n°171 GDF, 1996 Evans (2008) NAWPC (1999); IAWOPSG (2005)
Aquifère	1973-Leroy	Gaz naturel	1973	Etats-Unis	Wyoming	Aquifère Leroy	900	Non précisé	Puits	Rejet dans le massif	Fuite à travers le cuvelage	Corrosion	0	0	Rejet de 17 000 000 m3 sur 10 ans (en cumulé avec 1973-Leroy)	Anaktingi et al. [1984], Katz & Tek [1981] cité par Nelson et al. [2005]
Gisement dépiété	1959-Pannink Sink	Saumure	01/04/1959	Etats-Unis	Kansas	Gisement de Barton County	1000	Exploitation courante	Puits	Effondrement	Dissolution accidentelle d'une couche de sel Injection de saumure sous-saturée	Cuvelage non cimenté au niveau de la couche de sel Corrosion du cuvelage	0	0		Walters (1978 et 1991), cité par Brouard (2002)
Gisement dépiété	1950-Montebello	Gaz naturel	1950 à 1980	Etats-Unis	Californie	Gisement de Montebello, à l'ouest de Los Angeles		Exploitation courante	Puits	Rejet à l'atmosphère	Non précisé	Conception des puits non adaptée aux pressions d'exploitation	0	0		Evans (2008) Benson et Hepple (2005) ; Chilingar et Endres (2005) ; EIA (2006) ; Barnes, 1968 ; Technologies d'exploration, 2000 ; SoCal, 2004 ; Reigle, 1953

Tableau 15 : Accidentologie des stockages souterrains en aquifère : accidents liés aux puits

Type d'exploitation	Libellé de l'accident-incident	Fluide exploité	Date ou période de l'accident	Pays	Région / Département	Lieu	Opération en cours lors de l'accident	Elément concerné	Phénomène	Type d'événement	Causes	Nb de morts	Nb de blessés	Observations	Sources
Non précisé	0000-Californie 3	Gaz naturel	Non précisé	Etats-Unis	Californie	Non précisé	Intervention lourde	Puits	Sans objet (incident)	Perforation du cuvelage	Manœuvres d'outils Corrosion	0	0		Evans (2008) Vector Magnetics (http://www.vectormagnet ics.com/ casehistories.pdf)
Non précisé	0000-Californie 2	Gaz naturel	Non précisé	Etats-Unis	Californie	Non précisé	Intervention lourde	Puits	Sans objet (incident)	Perforation du cuvelage	Manœuvres d'outils	0	0		Evans (2008) Vector Magnetics (http://www.vectormagnet ics.com/ casehistories.pdf)
Non précisé	0000-Californie 1	Gaz naturel	Non précisé	Etats-Unis	Californie	Non précisé	Non précisé	Puits	Sans objet (incident)	Effondrement du puits	Séisme	0	0		Evans (2008) Vector Magnetics (http://www.vectormagnet ics.com/ casehistories.pdf)

Tableau 16 : Accidentologie des stockages souterrains (type d'exploitation non précisée) : accidents liés aux puits

Le recensement effectué fait état de 28 événements (accidents ou incidents) mettant en cause le puits. Ces 28 événements couvrent les différents types de stockages souterrains suivants : aquifères (4), gisements déplétés (4), cavités salines (17), non précisés (3). Il convient de noter à ce stade l'absence d'événement dans les cavités minées.

On distingue deux grandes catégories d'événements :

- les fuites de produit (78,5% des cas). Sur l'ensemble des fuites recensées, cela conduit :
 - à des fuites dans l'atmosphère ou pollution dont environ la moitié à dégénérée en incendie ou explosion,
 - à une fuite dans le massif,
- des incidents divers (18% des cas), qui seraient susceptibles de dégénérer en fuite dans l'atmosphère,
- pour un cas un effondrement. Concernant ce dernier accident, il convient de préciser que l'effondrement s'est produit suite à la formation involontaire d'une cavité dans une couche de sel située à une profondeur proche (~300 m) de la surface. Cette cavité s'est formée suite à une perte d'étanchéité de la cimentation du cuvelage du puits, le produit stocké étant de la saumure. Cet accident est symptomatique d'un incident lié au puits qu'il semble intéressant de présenter pour la suite de l'analyse.

En ce qui concerne les fuites de produit, les points de fuite rapportés dans l'accidentologie sont :

- pour les stockages en aquifère et en gisement déplété : des fuites au niveau de la tête de puits, ou dans le massif;
- pour les stockages en cavités salines : des fuites au niveau de la tête de puits, dans le massif et également via le circuit de saumure.

In fine, notons que ces accidents/incidents sont susceptibles de survenir dans toutes les phases d'exploitation des puits (forage, exploitation normale, ou en phase de travaux). L'étude de dangers doit donc envisager ces différentes phases dans son analyse de risques.

5.3.2 ANALYSE PRELIMINAIRE DES RISQUES

En règle générale, les Evénements Redoutés Centraux susceptibles de survenir sont des pertes de confinement de produit, c'est-à-dire des fuites de débit plus ou moins important. Ces fuites sont susceptibles de conduire, suivant la nature des produits dangereux impliqués, aux Phénomènes Dangereux suivants : feu torche, feu de nappe, UVCE, flash-fire.

5.3.2.1 EVENEMENTS INITIATEURS

Les différentes causes (ou Evénements Initiateurs - EI) pouvant conduire à une fuite au niveau du puits (d'exploitation ou de surveillance) doivent être envisagées, lors des différentes phases de fonctionnement du stockage : injection, soutirage, mais aussi intervention.

Les EI suivants, à adapter à la configuration des puits étudiés, sont notamment à considérer :

- Corrosion interne, corrosion externe : la tête de puits, et plus généralement les interfaces sous-sol/surface, sont des points sensibles particulièrement exposés au phénomène de corrosion. Le cuvelage et les différents éléments de la complétion sont également exposés, en particulier si ces éléments sont directement au contact de produits corrosifs (saumure) ;
- Erosion : les phénomènes d'érosion se manifestent en présence de particules solides dans une canalisation, en particulier au niveau de coudes (col de cygne). Du sable peut ainsi être présent dans le produit soutiré ;
- Phénomène de formation d'hydrates : un hydrate est la combinaison de molécules d'eau avec des molécules d'hydrocarbures légers, formant un solide ressemblant à de la glace. Les conséquences (bouchage, possibilité d'érosion) de la formation d'hydrates sont donc à envisager au cours de l'analyse de risques ;
- Choc d'origine externe : un choc par un véhicule ou une chute d'objet (lors de travaux de grutage à proximité de la tête de puits, par exemple) sont des causes courantes d'accidents industriels ;
- Défaillance matérielle : les conséquences d'un équipement fuyard ou mal installé suite à des opérations de maintenance, par exemple, sont à envisager lors de l'analyse de risques ;
- Agressions naturelles : il s'agit des événements de type séisme, mouvement de terrain, etc. si cela est pertinent pour le site étudié ;
- Coup de bélier : la fermeture inopinée d'un équipement à l'aval peut entraîner des phénomènes de coup de bélier ou être génératrice d'ondes de choc, en fonction du produit concerné et de sa pression de service ;
- Effets domino : en particulier, une tête de puits peut-être impactée par un incendie sur une unité de traitement déportée située à proximité (par exemple, injection de méthanol ou de glycol), ou par une perte de confinement survenue sur une canalisation ou un piquage de plus faible diamètre situé à proximité.

5.3.2.2 ERC REPRESENTATIFS ET PHENOMENES DANGEREUX

Les ERC susceptibles de survenir sur les puits sont des fuites de produit, en particulier :

- en tête de puits :
 - via un équipement de la tête de puits elle-même,
 - via l'espace annulaire situé entre le cuvelage et la colonne de production lorsqu'il existe,
 - via le circuit de saumure pour les stockages exploités en balancement de saumure,
 - via la cimentation du cuvelage,
- au niveau de la colonne de production dans le massif via le cuvelage.

Il est à noter que les phénomènes de fuite de produit dans le massif (via le cuvelage) ainsi que de remontée de produit via la cimentation du puits font l'objet de critères d'exclusions définis au paragraphe 1.2.10 de la circulaire du 10 mai 2010 sous l'intitulé de « risques de remontée de gaz ».

❖ Taille de brèche à considérer

Pour les ERC retenus, les diamètres de fuite doivent être déterminés au regard des causes potentielles de fuite (corrosion, rupture de piquage, agression mécanique...) et en fonction des dimensions caractéristiques des équipements impliqués. Pour chaque cas, on veillera à retenir des caractéristiques de rejets permettant de couvrir tous les effets susceptibles de se produire, et à déterminer des phénomènes aux effets « enveloppes ».

A titre d'information, dans le cas de tuyauteries d'usine, la circulaire du 10 mai 2010 indique dans sa Fiche n°6 que la fuite la plus pénalisante (en général, de pleine section) est à retenir systématiquement. Par ailleurs, d'autres diamètres de fuite peuvent être considérés :

- 50 % du diamètre de la tuyauterie (correspondant par exemple à une déchirure),
- 15 mm (correspondant par exemple à un trou de corrosion).

Dans le cas particulier des stockages de gaz naturel, la circulaire du 10 mai 2010 au paragraphe 1.2.10 indique que :

- les diamètres à retenir (pour les canalisations aériennes) sont de 25 mm et/ou 50 mm (si présence de piquage) ainsi que la fuite de pleine section ; cette dernière pouvant ne pas être retenue pour le classement de l'acceptabilité des risques suivant certaines conditions explicitées au paragraphe suivant ;
- la direction de rejet à considérer est horizontale, a minima. En effet, il s'avère que sur ce type d'installations, les effets des rejets verticaux sont généralement contenus dans les effets des rejets horizontaux. Cette assertion n'est a priori valable que pour le gaz naturel et doit être démontrée dans le cas d'autres produits.

❖ Phénomènes Dangereux associés

Les phénomènes dangereux associés à une telle perte de confinement peuvent être, en fonction de la nature du produit :

- un feu torche ou un feu de nappe (en cas d'inflammation immédiate), générant des effets thermiques,
- un UVCE ou VCE (en cas d'inflammation retardée), générant des effets de surpression, et des effets thermiques en cas de flashfire associé,
- une pollution des eaux souterraines ou de surface.

Dans le cas où il pourrait être démontré que l'inflammation du rejet sera immédiate (cas d'une brèche ne pouvant être générée que par un autre rejet enflammé à proximité, par exemple), le phénomène associé à une inflammation retardée pourra être écarté.

5.3.2.3 CRITERES D'EXCLUSION DE LA RUPTURE FRANCHE POUR LES Puits DE GAZ NATUREL

La circulaire du 10 mai 2010 définit, dans son paragraphe 1.2.10, la possibilité d'exclusion de l'événement de rupture totale des tuyauteries de gaz naturel, et en particulier des têtes de puits, pour la démarche de maîtrise des risques et du PPRT. Cette exclusion est justifiée sous réserve du respect de l'intégralité des conditions suivantes :

- les agressions mécaniques et thermiques susceptibles d'atteindre ces tuyauteries sont étudiées soigneusement dans l'EDD et toutes les dispositions nécessaires sont prises afin qu'elles soient rendues physiquement impossible, soit par suppression des sources susceptibles d'être à l'origine de ces agressions, soit par protection des tuyauteries ;
- les tuyauteries sont protégées d'agressions mécaniques par des tiers à hauteur d'une agression conventionnelle d'une pelle de 32 tonnes (la mise en place d'une clôture ne remplit pas cette exigence) ;
- les installations sont construites dans des nuances d'aciers compatibles avec les températures des fluides transportés ou, dans certains cas, des installations de réchauffage permettent de rendre compatible la température du gaz avec les caractéristiques mécaniques des installations ;
- l'adéquation entre les caractéristiques mécaniques des canalisations et la température du gaz qu'elles véhiculent est justifiée au cas par cas ;
- lorsque des systèmes de réchauffage sont requis, les dispositions relatives à la conception, l'exploitation, la maintenance, etc. de ces réchauffeurs pour garantir la compatibilité entre la température des fluides et la nuance d'acier des canalisations sont présentées ;
- les éléments techniques sur les dispositions de conception/prévention pour le défaut métallurgique, la corrosion, le coup de bélier, la préférence de la génératrice supérieure pour une brèche, l'absence d'accidentologie sur la rupture de tuyauterie pour ces événements initiateurs sont fournis. Les tuyauteries enterrées doivent en particulier être équipées d'une protection cathodique et faire l'objet de mesures électriques de surface ;
- les tuyauteries font l'objet d'un plan d'inspection compatible avec les exigences du GESIP applicable aux plans de surveillance et de maintenance des canalisations de transport reconnu par décision BSEI n°06-104 du 2 juillet 2009, ou avec celles des guides applicables aux équipements sous pression, en l'occurrence le guide UFIP-UIC DT 84 approuvé par la décision BSEI n°06-194 du 26 juin 2006 ou le guide professionnel d'établissement de plans d'inspection de Gaz de France approuvé par la décision DM-T/P n°33058 du 9 juillet 2004 ;

- les tuyauteries sont dimensionnées au séisme conformément à l'Eurocode 8 ou au guide AFPS 15 complément n°20, lorsqu'elles sont enterrées, et aux exigences de l'arrêté ministériel du 10 mai 1993 qui leur sont applicables lorsqu'elles sont aériennes ;
- les tuyauteries sont correctement lestées afin d'éviter toute perte de confinement en cas de crue correspondant à la crue de référence.

Attention, dans tous les cas, les scénarios de rupture franche des canalisations devront être modélisés et conservés pour l'élaboration du PPI (voir partie 7).

❖ Cas particuliers des piquages isolés :

Dans le cas particulier des piquages isolés, le scénario d'UVCE en DN 50 mm pourra être exclu des mesures de maîtrise de l'urbanisation, sous réserve de justification du caractère « isolé » de ces piquages et de la mise en œuvre de mesures de protection mécanique efficaces permettant d'exclure le risque d'arrachage par choc mécanique, y compris vis-à-vis d'un choc lourd type grue.

Il appartient à l'exploitant de justifier du caractère isolé du piquage, en démontrant que dans la zone d'isolement qu'il a retenue, aucun effet domino en direction du piquage ou événement initiateur n'est susceptible d'engendrer une fuite de ce piquage.

Le scénario d'UVCE en DN 50 mm du piquage sera toutefois modélisé et pris en compte dans l'étude des dangers, notamment vis-à-vis des effets dominos qu'il pourrait avoir en direction des autres installations.

5.3.3 ETUDE DETAILLEE DES RISQUES

5.3.3.1 NŒUDS PAPILLONS

Des nœuds-papillon permettant de visualiser les scénarios accidentels susceptibles de survenir sur les puits de stockages souterrains sont proposés en **Annexe C**

Au vu du caractère générique de ces nœuds-papillon, il convient pour un site particulier de vérifier l'exhaustivité des différentes causes affichées dans ce guide : ces nœuds-papillon n'ont pas vocation à se substituer à l'analyse de risques qui doit être réalisée au cours de l'élaboration d'une étude de dangers. De la même façon, les barrières de sécurité indiquées le sont à titre d'exemple.

Par ailleurs, il n'a pas été réalisé de différenciation entre les différentes tailles de brèche pouvant être générées par ces différentes causes identifiées.

Ainsi, sont présentés les nœuds-papillon relatifs :

- Aux puits de stockages en milieux poreux :
 - Fuite au niveau de la tête de puits ;
 - Fuite vers le massif ;
- Aux stockages en cavités lessivées exploités en compression détente :
 - Fuite au niveau de la tête de puits ;
 - Fuite vers le massif ;
- Aux stockages en cavités lessivées exploités en balancement de saumure :
 - Fuite au niveau de la tête de puits ;

- Fuite via le circuit de saumure ;
- Fuite vers le massif ;
- Aux phases de travaux en pression, pour tout type de puits en milieu poreux ou cavités lessivées.

Pour rappel, les puits de stockage en cavités minées n'ont pas été examinés dans le cadre de ce guide.

La partie phénomènes dangereux associés à la fuite, en aval de l'ERC, n'a pas été développée. On notera l'absence de mesures de protection. En effet, ce guide n'aborde pas les moyens d'intervention suite à sinistre, hormis dans le cas où la cause potentielle d'un accident est un effet domino.

5.3.3.2 BARRIERES DE SECURITE

Pour faire face aux risques identifiés au moment de l'analyse de risques, et en vue de mettre en lumière les stratégies de maîtrise des risques, il est nécessaire de faire apparaître les barrières de sécurité mises en place sur les installations objet de l'étude.

Les barrières de sécurité ont vocation à agir :

- en prévention de l'Événement Redouté Central. Dans ce cas le fonctionnement de la barrière s'opposera à la survenue d'une cause et de ce fait en réduira la probabilité d'occurrence,
- en protection ou en aval de l'Événement Redouté Central. Dans ce cas le fonctionnement de la barrière s'opposera à la survenue des effets d'un phénomène dangereux et de ce fait en réduira la probabilité d'occurrence. Par exemple, la fermeture rapide d'une vanne de sécurité est susceptible de réduire le temps de fuite et donc la durée du phénomène dangereux associé.

Les barrières de sécurité ont donc pour objectif de remplir des fonctions de sécurité agissant en prévention ou en protection d'un événement redouté central. L'étude des performances des barrières permet donc de déterminer le nombre de barrières nécessaires pour maîtriser le/les risques à un niveau jugé acceptable. A minima, les performances des barrières de sécurité sont à étudier notamment sur les critères suivants (article 4 de l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005) : efficacité, cinétique, testabilité et maintenance.

Sur les nœuds papillon présentés en **Annexe C**, des barrières de sécurité génériques sont également présentées à titre d'exemple. Les barrières explicitées dans la circulaire du 10 mai 2010 comme critères d'exclusion de certains ERC sont signalées.

5.3.3.3 PROBABILITES DES ERC

L'objet de ce document n'est pas de fournir de manière exhaustive les probabilités à retenir pour les événements initiateurs et événements redoutés centraux évoqués ci-avant. En effet, au regard des différents types d'installations, des différents produits opérés et des diversités potentielles des modes d'exploitation ces chiffres pourraient ne pas être pertinents. Dans chaque étude de dangers, les probabilités exposées se doivent donc d'être justifiées au regard d'un travail préalable d'analyse des risques.

Les sources de données exploitables sont présentées dans le rapport d'étude référencé DRA-12-124789-07543A, intitulé « Panorama des sources de données utilisées dans le domaine des analyses quantitatives des risques – Mise à jour 2011 et 2012 ». Dans tous les cas, les probabilités retenues dans l'étude de dangers doivent être justifiées, au regard des caractéristiques du produit transporté et des conditions d'exploitation.

Dans le cas particulier des stockages de gaz naturel, la circulaire du 10 mai 2010 indique au paragraphe 1.2.10 que, pour les brèches, la probabilité à retenir est a priori la classe D, soit une probabilité d'occurrence annuelle comprise entre 10^{-5} et 10^{-4} .

Par ailleurs, compte-tenu de la probabilité d'occurrence du phénomène d'UVCE dans la configuration d'un site de stockage souterrain de gaz naturel, et sous réserve du respect des bonnes pratiques en matière de prévention des sources d'inflammation, une classe de probabilité E peut être retenue pour les phénomènes d'inflammation retardée (UVCE) sur l'ensemble des puits et stations. Cette assertion n'est a priori valable que pour le gaz naturel, et doit être démontrée dans le cas d'autres produits.

5.4 LES COLLECTES

5.4.1 ACCIDENTOLOGIE

Le tableau ci-dessous récapitule quelques accidents représentatifs recensés essentiellement sur l'exploitation de la base ARIA du BARPI.

Type d'exploitation	Libellé de l'accident-incident	Fluide exploité	Date ou période de l'accident	Pays	Région / Département	Lieu	Opération en cours lors de l'accident	Elément concerné	Phénomène	Type d'événement	Causes	Nb de morts	Nb de blessés	Observations	Sources
Cavités salines	2010- Manosque	Naphta	23/01/2012	France	04	Manosque	Injection	Collecte	Rejet au sol Rejet en rivière	Fuite sur une collecte	Perforation par corrosion	0	3	200 m3 rejetés POI déclenché Périmètre de sécurité de 1000 m Evacuation de 282 personnes	ARIA n°38242
Cavités salines	2007- Manosque 1	Naphta	31/01/2007	France	04	Manosque	Maintenance	Collecte	Sans objet (incident)	Intrusion de naphtha dans la collecte	Non précisé	0	0		ARIA n°38873
Aquifère	2007-Chénery	Gaz naturel	22/11/2007	France	41	Chénery	Maintenance	Installation de surface	Rejet à l'atmosphère	Fuite sur une installation de surface	Non précisé	0	1		ARIA n°34681
Aquifère	2003-Gournay sur Aronde	Gaz naturel	07/05/2003	France	60	Gournay sur Aronde	Soufflage	Local électrique	Explosion Incendie	Fuite sur une collecte	Fuite sur une collecte située hors du local puis cheminement par des gaines techniques	0	0	Rejet à l'atmosphère de 2500 à 25000 m3 de gaz	ARIA n°24548
Cavités salines	2001-Fort Saskatchewan 1980- Frankenthal	Ethane	août-01	Canada	Alberta	Fort Saskatchewan	Non précisé	Collecte	Incendie	Fuite sur une collecte	Non précisé	0	0	Rejet de 14500 m3 pendant 192 jours	ARIA n°21028
Aquifère		Gaz naturel	30/09/1980	Allemagne	Non précisé	Frankenthal	Forage	Installation de surface	Rejet à l'atmosphère	Fuite sur une collecte	Agression lors d'une opération de forage	0	0	Durée de la fuite : 17 jours	AEA (2005)

Tableau 17 : Accidentologie des stockages souterrains : accidents liés aux collectes

Au regard de cette accidentologie, il est à noter que les accidents significatifs susceptibles d'intervenir au niveau des collectes sont des pertes de confinement, associées ou non à une inflammation du rejet, ainsi que des pollutions par hydrocarbures.

5.4.2 ANALYSE PRELIMINAIRE DES RISQUES

Les ERC susceptibles de survenir sur les canalisations de collecte sont des pertes de confinement. Ces fuites sont susceptibles de conduire, suivant la nature des produits dangereux impliqués, à des phénomènes de feu torche ou feu de nappe, d'UVCE et de flash-fire.

5.4.2.1 EVENEMENTS INITIATEURS

Toutes les différentes causes (ou EI) pouvant conduire à une fuite sur une canalisation de collecte doivent être envisagées. En particulier, il faut s'assurer d'avoir pris en compte lors de l'analyse de risques les événements initiateurs suivants (liste non-exhaustive) :

- l'agression mécanique externe. Une canalisation enterrée est particulièrement exposée à une agression par travaux de tiers, notamment par un engin d'excavation. Une surcharge liée au trafic routier est également une cause recensée d'accidents sur des canalisations enterrées lorsque celle-ci passe sous une voie de circulation. Par ailleurs, les chute d'objets ou chocs avec véhicules sont à considérer, notamment pour les parties aériennes des collectes ;
- la corrosion interne, provoquée par le produit transporté, soit par sa nature intrinsèque, soit par la présence d'eau ou d'impuretés dans le produit ;
- la corrosion externe, qui peut être liée à un endommagement du revêtement de la canalisation par une agression mécanique ou chimique, un phénomène abrasif ou simplement un vieillissement du matériau ;
- l'érosion, liée à des fortes vitesses de transport associées à la présence de particules érosives dans le produit (hydrates, sable...) ;
- le mouvement de terrain, le séisme, et plus globalement tous les phénomènes qui peuvent entraîner un déplacement du sol dans lequel est enterrée une collecte, si cela est pertinent pour le site étudié ;
- la défaillance matérielle, suite à une anomalie de conception, de fabrication, de pose ou de maintenance ;
- le coup de bélier, en fonction du produit étudié, de sa pression de service et de la configuration des équipements à l'aval ;
- les effets dominos, en particulier les conséquences d'une perte de confinement sur une autre collecte à proximité.

Les points singuliers situés sur le traçage des collectes (tronçons aériens, points bas, canalisations en fosse) sont à étudier soigneusement lors de l'analyse de risques afin d'assurer l'exhaustivité des phénomènes dangereux étudiés.

5.4.2.2 ERC REPRESENTATIFS

L'ERC susceptible de survenir sur un réseau de collecte est la perte de confinement de produit.

❖ Taille de brèche à considérer

Si la perte de confinement sur une canalisation de collecte peut se produire en un nombre infini de points et par une brèche d'une infinité de diamètres possibles, le choix du nombre de phénomènes représentatifs à étudier dans l'EDD reste libre.

Il est toutefois demandé de faire apparaître a minima la configuration la plus pénalisante, en général la rupture de dimension caractéristique 100% du diamètre de la canalisation. En règle générale, l'analyse de risques fait ressortir le besoin de présenter des phénomènes liés à des fuites de taille inférieure (phénomènes de corrosion, arrachage de piquage).

Dans le cas particulier des stockages de gaz naturel, la circulaire du 10 mai 2010 au paragraphe 1.2.10 indique que :

- les diamètres de brèche à retenir sont la fuite de pleine section (pouvant ne pas être retenue suivant certaines conditions), ainsi que les brèches de 25 mm pour les canalisations aériennes, et de 12 mm pour les canalisations enterrées. En cas de présence de piquage, un diamètre de brèche de 50 mm sera également à considérer.
- Pour les portions aériennes, la direction de rejet à considérer est horizontale a minima. Pour les portions enterrées, par analogie avec les pratiques des canalisations de transport, le rejet sera considéré de direction verticale.

❖ Phénomènes Dangereux associés

Les phénomènes dangereux associés à une telle perte de confinement peuvent être, en fonction de la nature du produit :

- un feu torche ou un feu de nappe (en cas d'inflammation immédiate), générant des effets thermiques,
- un UVCE (en cas d'inflammation retardée), générant des effets de surpression, et des effets thermiques en cas de flashfire associé,
- une pollution des eaux souterraines ou de surface.

Pour les collectes de stockages de gaz naturel, la circulaire du 10 mai 2010 définit au paragraphe 1.2.10 les phénomènes dangereux à considérer pour l'élaboration de l'étude de dangers

Pour les canalisations aériennes, sont à envisager :

- les ruptures franches de canalisation, avec rejet horizontal enflammé et UVCE ;

- les brèches de 25 mm (performance limitée), et en cas de piquage, les brèches 50 mm, avec rejet enflammé horizontal, ainsi qu'UVCE par rejet horizontal.

Pour les canalisations enterrées, sont à envisager :

- les ruptures franches de canalisation, avec rejet vertical enflammé ;
- les brèches de 12 mm, par analogie avec la réglementation des canalisations de transport, avec rejet vertical enflammé.

Dans le cas où il pourrait être démontré que l'inflammation du rejet sera immédiate (cas d'une brèche ne pouvant être générée que par un autre rejet enflammé à proximité, par exemple), le phénomène associé à une inflammation retardée pourra être écarté.

A noter que le traitement des points singuliers du tracé peut faire apparaître des phénomènes dangereux spécifiques (exemple d'un passage de canalisation en fosse, pouvant donner lieu à une explosion en milieu confiné).

5.4.2.3 CRITERES D'EXCLUSION DE LA RUPTURE FRANCHE POUR LES COLLECTES DE GAZ NATUREL

La circulaire du 10 mai 2010 définit, dans son paragraphe 1.2.10, des critères d'exclusion de l'événement de rupture totale des tuyauteries de gaz naturel, et en particulier des collectes, pour la démarche de maîtrise des risques et du PPRT. Les critères relatifs à cette exclusion ont été cités au paragraphe 5.3.2.3.

Attention, dans tous les cas, les scénarios de rupture franche des collectes devront être modélisés et conservés pour l'élaboration du PPI (voir partie 7).

La vérification des critères d'exclusion de la rupture franche doit être justifiée sur toute la longueur du tracé de la canalisation. Cependant, le critère d'exclusion de la rupture franche peut ne s'appliquer que sur certains tronçons si la vérification des critères à respecter ne peut pas se faire sur l'intégralité du tracé.

5.4.3 ETUDE DETAILLEE DES RISQUES

5.4.3.1 NŒUDS PAPILLONS

Un nœud-papillon permettant de visualiser les scénarios pouvant mener à une perte de confinement d'une collecte est fourni en **Annexe D**.

Au vu du caractère générique de ce nœud-papillon, il convient pour un site particulier de vérifier l'exhaustivité des différentes causes affichées : ce nœud-papillon n'a pas vocation à se substituer à l'analyse de risques qui doit être réalisée au cours de l'élaboration d'une étude de dangers. De la même façon, les barrières de sécurité affichées le sont à titre d'exemple.

Par ailleurs, il n'a pas été réalisé de différenciation entre les différentes tailles de brèche pouvant être générées par ces différentes causes identifiées.

La partie phénomènes dangereux associés à la fuite, en aval de l'ERC, n'a pas été développée. On notera également l'absence de mesures de protection. En effet, ce guide n'aborde pas les moyens d'intervention suite à sinistre, hormis dans le cas où la cause potentielle d'un accident est un effet domino.

5.4.3.2 BARRIERES DE SECURITE

Comme indiqué précédemment, les barrières de sécurité ont vocation à agir :

- en prévention de l'Événement Redouté Central. Dans ce cas le fonctionnement de la barrière s'opposera à la survenue d'une cause et de ce fait en réduira la probabilité d'occurrence,
- en protection ou en aval de l'Événement Redouté Central. Dans ce cas le fonctionnement de la barrière s'opposera à la survenue des effets d'un phénomène dangereux et de ce fait en réduira la probabilité d'occurrence. Par exemple, la fermeture rapide d'une vanne de sécurité est susceptible de réduire le temps de fuite et donc la durée du phénomène dangereux associé.

Pour rappel, les performances des barrières de sécurité sont à étudier notamment sur les critères suivants (article 4 de l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005) : efficacité, cinétique, testabilité et maintenance.

Sur le nœud papillon présentés en **Annexe D** des barrières de sécurité génériques sont également présentées à titre d'exemple.

5.4.3.3 PROBABILITES

A titre indicatif, il peut être envisagé de s'appuyer sur les documents suivants :

- 8^{ème} rapport EGIG daté de décembre 2011 – fournit des chiffres pour le Gaz Naturel ;
- Guide GESIP 2008/01 de décembre 2012 intitulé « Guide méthodologique pour la réalisation d'une étude de sécurité concernant une canalisation de transport (hydrocarbures liquides ou liquéfiés, gaz combustibles et produits chimiques) » - fournit des chiffres tous produits.

Dans tous les cas, les probabilités retenues dans l'étude de dangers doivent être justifiées, au regard des caractéristiques du produit transporté et des conditions d'exploitation.

Dans le cas particulier du gaz naturel, la circulaire du 10 mai 2010 indique au paragraphe 1.2.10 que l'apparition d'une brèche sur une collecte de gaz naturel, avec rejet enflammé, se voit a priori attribuer une classe de probabilité D.

De plus, compte tenu de la probabilité d'occurrence du phénomène d'UVCE dans la configuration d'un site de stockage souterrain de gaz naturel, une classe de probabilité E peut être retenue pour le scénario d'UVCE sur l'ensemble des puits et des stations. L'application de cette probabilité doit s'accompagner du respect des « bonnes pratiques » en matière de prévention des sources d'inflammation : respect de la réglementation ATEX, plans de prévention ou interventions spécifiques pour les phases de travaux, etc.

5.5 LA STATION CENTRALE

Toutes les installations de la station centrale doivent être traitées au moment de la réalisation de l'étude des dangers. Ce guide ne développe pas les aspects d'élaboration de l'étude de dangers pour de tels équipements et la méthodologie à employée est celle mise en œuvre sur un site industriel classique.

5.6 LES EFFETS DOMINOS

Les effets dominos peuvent provenir d'installations internes au site mais aussi d'installations industrielles à proximité.

Au niveau des têtes de puits et des collectes, des phénomènes de feu torche, de feu de nappe ou d'UVCE peuvent se produire. Ces phénomènes peuvent se produire à des endroits relativement proches et donc être à l'origine d'effets domino internes, a priori par effet thermique, de surpression ou encore effet missile.

Cette étape de l'étude de dangers consiste à vérifier que ces effets dominos ne peuvent pas être à l'origine d'une augmentation de la probabilité d'occurrence d'un accident majeur. Il conviendra donc de les étudier.

Remarque : Les parties enterrées des collectes sont peu sujettes à l'agression par des effets dominos sauf si celle-ci est découverte par les effets de l'accident à l'origine de l'effet domino. Elles peuvent être concernées essentiellement par l'agression par des projectiles de taille et de poids importants qui s'enfonceraient dans le sol à une profondeur suffisante pour atteindre la canalisation (pale d'éolienne).

En vue d'aider le lecteur dans l'évaluation des effets dominos internes, on peut considérer qu'une rupture franche par effets dominos peut être provoquée ;

- thermiquement :
 - par la flamme d'un feu torche depuis une installation voisine : dans ce cas le jet est enflammé immédiatement, l'UVCE est donc écarté ;
 - par un feu de nappe à proximité, dû à une perte de confinement d'un produit inflammable ;
- mécaniquement :

- par un jet (non enflammé) depuis une installation voisine : sur les tuyauteries concernées, un endommagement est possible à partir d'une surpression de 500 bars. Cet événement peut donc a priori être exclu car de telles pressions ne sont pas atteintes dans les configurations classiques des sites concernés ;
- par une explosion à proximité : sur les tuyauteries concernées, un endommagement est possible à partir d'une surpression de 15 à 20 bars. Cet événement peut donc être exclu car de telles surpressions ne sont pas atteintes dans les configurations classiques des sites concernés ;
- par l'impact des projectiles accompagnant une explosion (où la vitesse d'impact est de l'ordre de 60 m/s).

Par analogie avec les Installations Classées, ce type d'événement a effectivement vocation à être analysé dans l'étude de dangers au titre des effets domino comme indiqué par la circulaire du 10 mai 2010 qui précise que « seuls les effets dominos générés par les fragments sur des installations et équipements proches ont vocation à être pris en compte dans les études de dangers ». Par ailleurs, cette circulaire précise également que, si le retour d'expérience connu en matière de projections est faible, « les informations recueillies n'ont pas pour autant à être prises en compte dans les démarches de porter à connaissance et de maîtrise de l'urbanisation ». Sur cette base, ces effets doivent être étudiés au titre des effets domino, dans les études de dangers, mais n'ont pas vocation à être retenus dans les démarches de maîtrise de l'urbanisation, sauf à ce que l'étude de danger conclue à une probabilité justifiant leur prise en compte.

Ainsi, si un effet domino est avéré, une étude particulière de protection locale de l'équipement devra être réalisée.

6. DEMARCHE POUR L'ELABORATION DU PPRT DANS LE CONTEXTE DES STOCKAGES SOUTERRAINS

Le PPRT délimite un périmètre d'exposition aux risques autour d'un stockage souterrain, à l'intérieur duquel différentes zones peuvent être réglementées en fonction des risques. En pratique, ce périmètre d'étude se détermine sur la base des phénomènes dangereux identifiés dans l'étude de dangers. C'est également l'EDD qui fournit les éléments nécessaires à la détermination de l'aléa en tout point de la zone ainsi définie.

Le principe d'élaboration d'un PPRT fait l'objet d'un guide méthodologique élaboré à l'initiative du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, et l'objectif n'est pas ici d'en reprendre les informations. Cette partie vise à présenter les spécificités des PPRT de stockages souterrains visés à l'article L211-2 du Code Minier, dans le choix des phénomènes dangereux retenus comme dans la détermination de l'aléa et des mesures à mettre en œuvre.

6.1 PHENOMENES DANGEREUX RETENUS

Comme pour les PPRT Installations Classées, les phénomènes dangereux dont la classe de probabilité est E, au sens de l'échelle de référence définie par l'arrêté du 29 septembre 2005 et déjà présentée dans ce document, sont exclus du PPRT à la condition que :

- cette classe de probabilité repose sur une mesure de maîtrise des risques passive vis-à-vis de chaque scénario identifié, ou que :
- cette classe de probabilité repose sur au moins deux mesures techniques de maîtrise des risques pour chaque scénario identifié et que la classe de probabilité de chacun des scénarios menant à ce phénomène dangereux reste en E même lorsque la probabilité de défaillance de la mesure de maîtrise des risques de plus haut niveau de confiance s'opposant à ce scénario est portée à 1.

Dans le cas où ces deux conditions s'avèreraient inadaptées, le préfet peut proposer d'autres critères d'exclusion de PhD du champ du PPRT après avis de la DGPR.

De plus, comme déjà précisé dans les parties relatives à l'élaboration de l'EDD de ce document, certains phénomènes dangereux étudiés dans l'EDD peuvent, sous réserve du respect de certains critères, être exclus de la démarche de maîtrise de l'urbanisation.

Pour rappel, ces phénomènes dangereux sont les suivants :

- effondrement brutal, sous réserve du respect des critères définis en partie 5.1 ;

- remontée de produit par le terrain, sous réserve du respect des critères définis en partie 5.1.

Par ailleurs, pour les stockages souterrains de gaz naturel, les fuites de pleine section de collectes et de puits, sous réserve du respect des critères définis en partie 5.3.2.2, sont également exclus du PPRT.

Le périmètre du PPRT est alors défini par la courbe enveloppe des effets des PhD retenus.

6.2 DETERMINATION DE L'ALEA

L'analyse de l'aléa a pour objectif de hiérarchiser les niveaux d'aléa. Les termes « aléa fort » ou « aléa très fort » signifient que les zones concernées sont plus prédisposées à l'apparition de manifestations importantes en surface que les zones « d'aléa moyen » ou « aléa faible ».

La détermination de l'aléa pour un PPRT de stockage souterrain est la même que pour un PPRT Installations Classées. L'aléa se fait pour chacun des effets : toxique, de surpression, thermique, et mouvement de terrain. On distingue les PhD à cinétique rapide et ceux à cinétique lente. Le lecteur est donc invité à consulter le guide méthodologique du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable pour plus d'informations sur ce point.

La spécificité des Stockages Souterrains consiste à considérer en plus des 3 types d'aléas précédents l'aléa « effondrement brutal », dans le cas où ce phénomène n'aurait pas été exclu en application des critères définis au § 5.1.

6.3 PRINCIPES DE REGLEMENTATION

Les principes d'analyse des enjeux, de superposition des aléas et des enjeux et d'établissement du zonage réglementaire sont identiques dans le cadre des PPRT « stockages souterrains » à ceux applicables à tout type de PPRT. Par conséquent, une nouvelle fois, le lecteur est invité à se rapporter au guide méthodologique général.

Pour les zones qui seraient concernées par des phénomènes dangereux liés au massif (effondrement brutal ou remontée de gaz à travers le massif) et qui n'auraient pas pu être écartés de la démarche de maîtrise de l'urbanisation en application des critères définis au § 5.1, la circulaire du 10 mai 2010 propose les principes réglementaires suivants :

- l'urbanisation future est interdite, à l'exception éventuelle des extensions de sites industriels existants pour les aléas d'effondrement à cinétique lente lorsque les conditions afférentes listées au paragraphe 5.1 sont respectées ;
- les biens sont expropriés dans les zones d'aléas, sauf pour les aléas d'effondrement à cinétique lente lorsque les conditions afférentes de la partie 5.1 sont respectées.

7. DEMARCHE POUR L'ELABORATION DES PLANS D'URGENCES DANS LE CONTEXTE DES STOCKAGES SOUTERRAINS

L'objectif des plans d'urgences est de préparer et planifier la réponse en cas d'accident. L'étape d'identification des scénarios à retenir dans le cadre des plans d'urgences est primordiale car à l'origine du dimensionnement des moyens d'intervention et de l'organisation retenue pour déployer ces moyens.

A la date de rédaction du présent document, il n'existe pas de guide méthodologique pour la sélection de ces scénarios. Toutefois, les considérations exposées au chapitre 5 permettent de recenser un certain nombre de scénarios, considérés pour le gaz naturel de probabilité d'occurrence suffisamment faible pour être écartés de la démarche de maîtrise des risques et du PPRT mais conservés pour l'élaboration du PPI :

- le phénomène d'éruption de puits (par analogie, une fuite majeure par le circuit de saumure pourrait également être retenue),
- la rupture franche des collectes,
- et de façon plus générale, les phénomènes dont les distances d'effets sont susceptibles de présenter des effets à l'extérieur du site. Etant entendu que le phénomène de pollution accidentelle est également à retenir.

Concernant les EI faisant l'objet d'un traitement particulier ou d'une exclusion comme défini au paragraphe 4.5.1 du présent guide, il est à noter que ces EI doivent potentiellement être pris en compte pour l'élaboration des plans d'urgence, si cela s'avère pertinent pour le site étudié.

La vocation de ce guide n'est pas d'indiquer une/démarches d'élaboration des plans d'urgences. Toutefois, le lecteur trouvera des informations utiles dans les documents suivants (liste non exhaustive):

- Textes réglementaires français :
 - article 17 du décret 77-1133 du 21/9/1977 modifié par l'article 4 du décret 89-837 du 14/11/1989,
 - instruction interministérielle du 12/7/1985 (Guide d'élaboration d'un POI),
 - circulaire du 06/05/99 relative à l'extinction des feux de liquides inflammables-Installations classées pour la protection de l'environnement,
 - arrêté du 02/01/08 relatif aux stockages contenant plus de 50 tonnes de gaz inflammables liquéfiés relevant du régime de l'autorisation au titre de la rubrique n° 1412 de la nomenclature des installations classées à l'exception des stockages réfrigérés ou cryogéniques,

- arrêté du 03/10/10 relatif au stockage en réservoirs aériens manufacturés de liquides inflammables exploités dans un stockage soumis à autorisation au titre de la rubrique 1432 de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement et modifié par l'arrêté du 10 février 2011,
- circulaire du 12/01/11 relative à l'articulation entre le plan d'opération interne, l'intervention des services de secours publics et la planification Orsec afin de traiter les situations d'urgences dans les installations classées.
- Bonnes pratiques issues du retour d'expériences des services de secours : Guide d'aide à l'élaboration du POI – SDIS 60 – Janvier 2009 (téléchargeable sur internet).
- Bonnes pratiques du secteur pétrolier :
 - Guide GESIP : Guide méthodologique du GESIP pour l'élaboration du POI d'un site industriel (raffinerie, usine chimique, complexe pétrochimique) - rapport 96/01,
 - Guide méthodologique du GESIP pour l'élaboration du plan d'opération interne d'un établissement de stockage de produits inflammables (dépôt) ou d'un petit établissement industriel- rapport 96/02,
 - Guide méthodologique du GESIP pour l'élaboration d'une courbe de montée en puissance – rapport 96/03.

8. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe A	Définitions	2
Annexe B	Nœuds Papillons relatifs au massif pour un stockage en milieu poreux, un stockage en cavités salines et un stockage en cavité minée	10
Annexe C	Nœuds Papillons génériques relatifs aux puits d'exploitation et de contrôle	18
Annexe D	Nœuds Papillons génériques relatifs aux collectes	2
Annexe E	Note technique relative à l'établissement de critères d'exclusion du risque d'effondrement au droit de stockages souterrains durant la phase d'exploitation	16
Annexe F	Eléments de modélisation	51

ANNEXE A : Définitions

Affaissement progressif [guide PPRM réf. INERIS-DRS-06-51198/R01] : Réajustement des terrains de surface induit par l'éboulement ou la convergence de cavités souterraines. Les désordres, dont le caractère est généralement lent, progressif et souple, prennent la forme d'une dépression topographique, sans rupture cassante importante, présentant une allure de cuvette. Dans le contexte d'un stockage souterrain, un affaissement progressif peut être lié, par exemple, à la convergence de cavité(s) saline(s) par fluage du sel. Compte-tenu de son caractère lent et progressif, ce phénomène ne présente pas de risque immédiat pour les personnes et en conséquence, il peut être exclu de l'étude de dangers. En revanche, il doit être examiné dans l'étude des impacts à long-terme du stockage après son abandon.

Mouvement de terrain : Mouvement de la surface du sol faisant suite à un événement d'origine naturelle (crue, forte pluie, ...) ou anthropique, c'est-à-dire lié à l'évolution instable d'un ouvrage en profondeur (cavité de stockage ou ouvrage d'accès). Dans cette deuxième catégorie, deux types de mouvements de terrain peuvent survenir, un *affaissement progressif* ou un *effondrement brutal*.

Fontis [guide PPRM réf. INERIS-DRS-06-51198/R01] : *Effondrement localisé* résultant de la remontée au jour d'un éboulement initié au sein d'une excavation souterraine (par exemple une cavité saline, une galerie de cavité minée ou un tunnel d'accès à une cavité minée dans le contexte d'un stockage souterrain). Lorsque la voûte initiée par la rupture du toit de l'excavation ne se stabilise pas mécaniquement du fait de la présence de bancs massifs au sein du recouvrement, elle se propage progressivement vers la surface et, si l'espace disponible au sein de l'excavation est suffisant pour que les matériaux éboulés et foisonnés puissent s'y accumuler sans bloquer le phénomène par « auto-comblement », la voûte peut atteindre la surface du sol. Si le développement d'une montée de voûte est un phénomène très lent qui peut prendre plusieurs années ou décennies, l'apparition du fontis en surface se fait, quant à elle, de manière soudaine, ce qui rend le phénomène potentiellement dangereux pour les personnes et les biens situés dans son emprise.

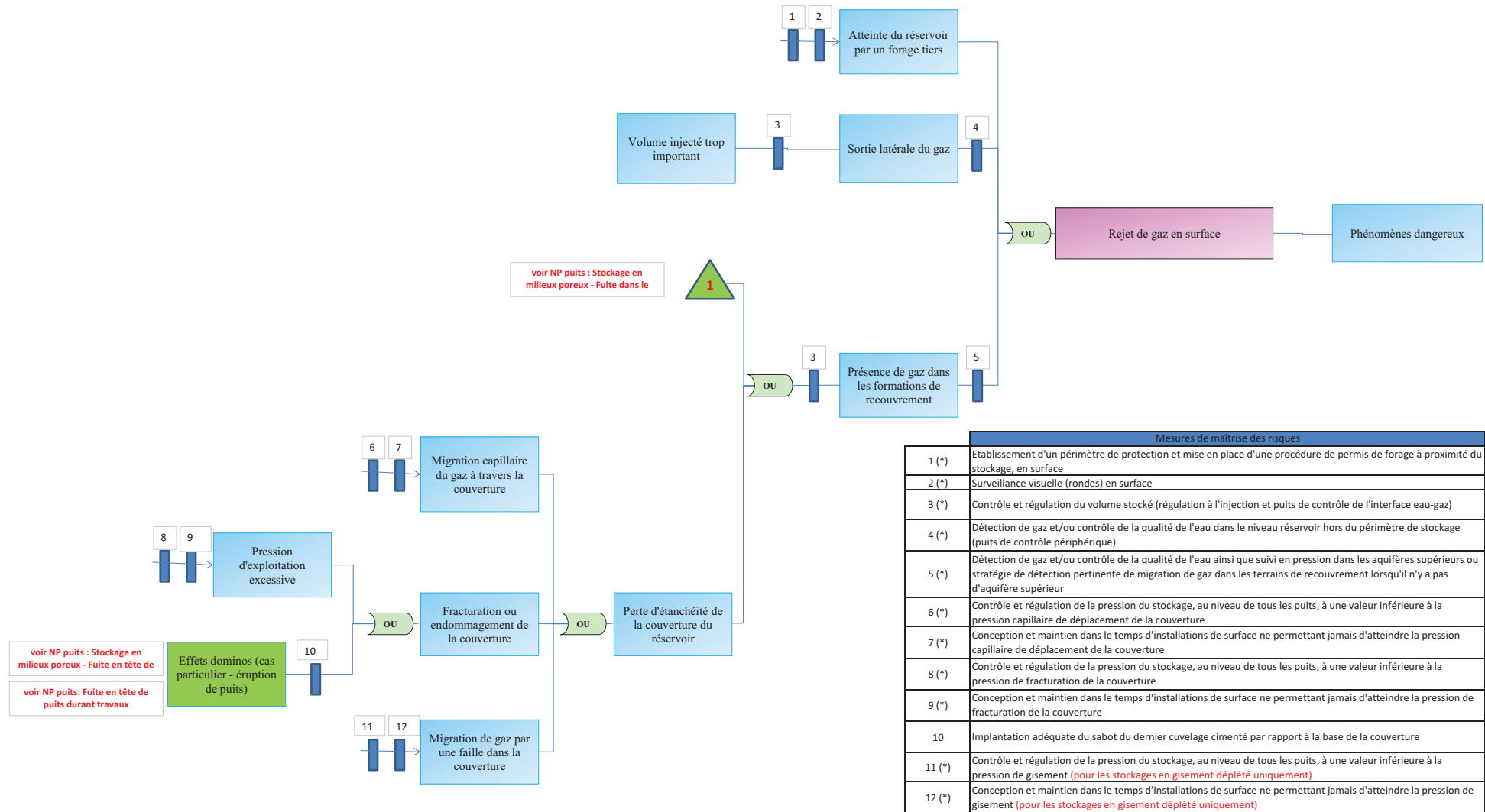
Effondrement brutal : *Mouvement de terrain* se caractérisant par l'apparition soudaine en surface d'un cratère dont l'extension horizontale peut varier de quelques mètres à plusieurs hectares, selon qu'il s'agit d'un *effondrement localisé* ou d'un *effondrement généralisé*.

Effondrement généralisé [guide PPRM réf. INERIS-DRS-06-51198/R01] : Rupture, souvent dynamique (quelques secondes), de tout ou partie d'une exploitation, affectant la stabilité des terrains de surface sur des étendues pouvant atteindre plusieurs hectares. Un tel phénomène exige une combinaison de critères défavorables à la stabilité et ne pourrait se développer, dans le contexte d'un stockage souterrain, que dans le cas où l'on aurait une rupture (simultanée ou en chaîne) de plusieurs piliers (entre cavités salines ou entre galeries de cavité minée) et une rupture concomitante des terrains de recouvrement. Une tel phénomène exige l'existence d'une configuration d'exploitation particulièrement « fragile » (taux de défrusement élevé, volumes de vides importants, piliers sous-dimensionnés présentant un fort élancement).

Effondrement localisé [guide PPRM réf. INERIS-DRS-06-51198/R01] : Apparition soudaine en surface d'un cratère d'effondrement dont l'extension horizontale peut varier de quelques mètres à quelques dizaines de mètres de diamètre et dont l'origine, dans le contexte d'un stockage souterrain, peut être soit la remontée au jour d'un *fontis* soit la rupture de pilier(s) isolé(s) (entre cavités salines ou entre galeries de stockage dans le cas d'une cavité minée).

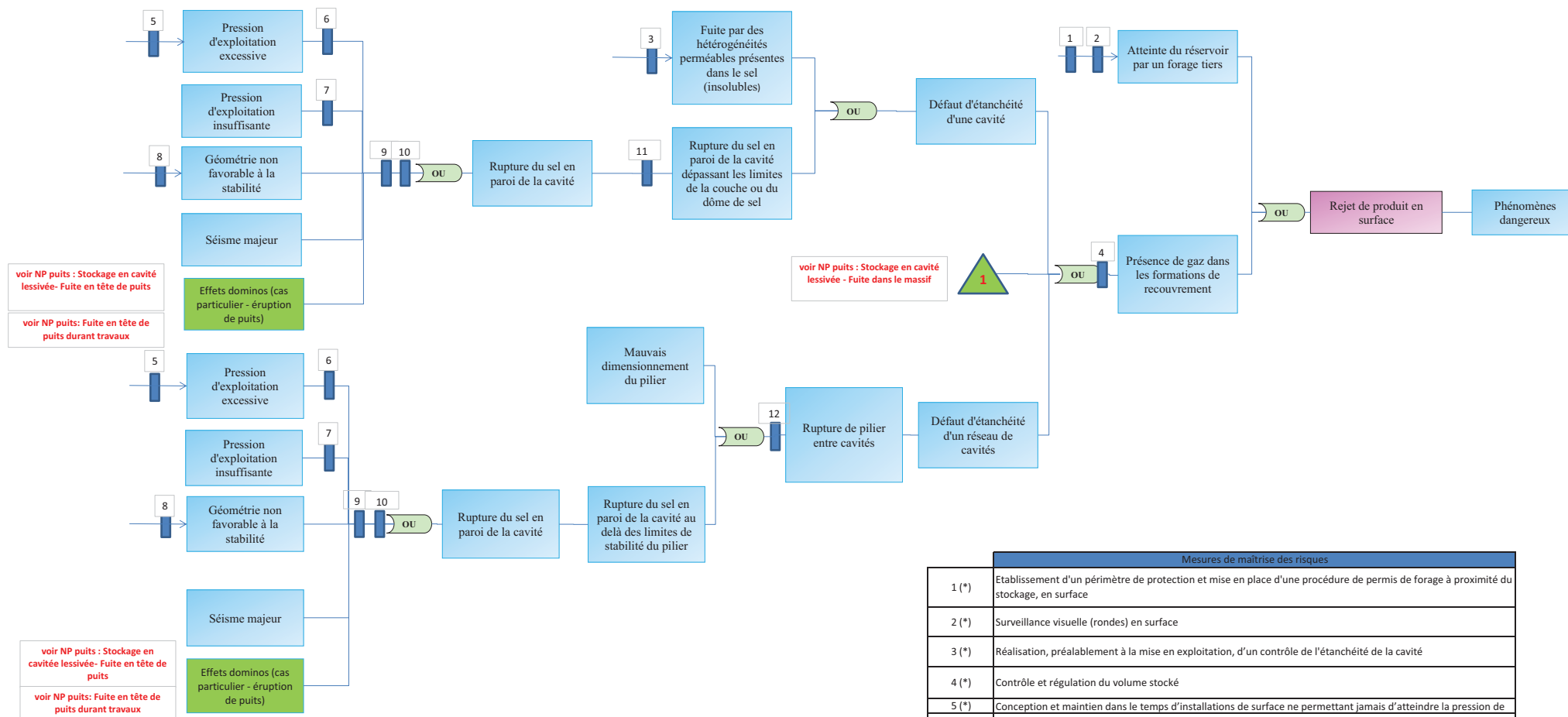
ANNEXE B :
Nœuds-papillons génériques relatifs au massif pour
un stockage en milieu poreux, un stockage en
cavités salines et un stockage en cavité minée

Stockage en milieu poreux de gaz naturel - Fuites liées au réservoir



(*) Mesures minimales à respecter pour exclure le risque de remontée de gaz en surface (circulaire du 10 mai 2010)

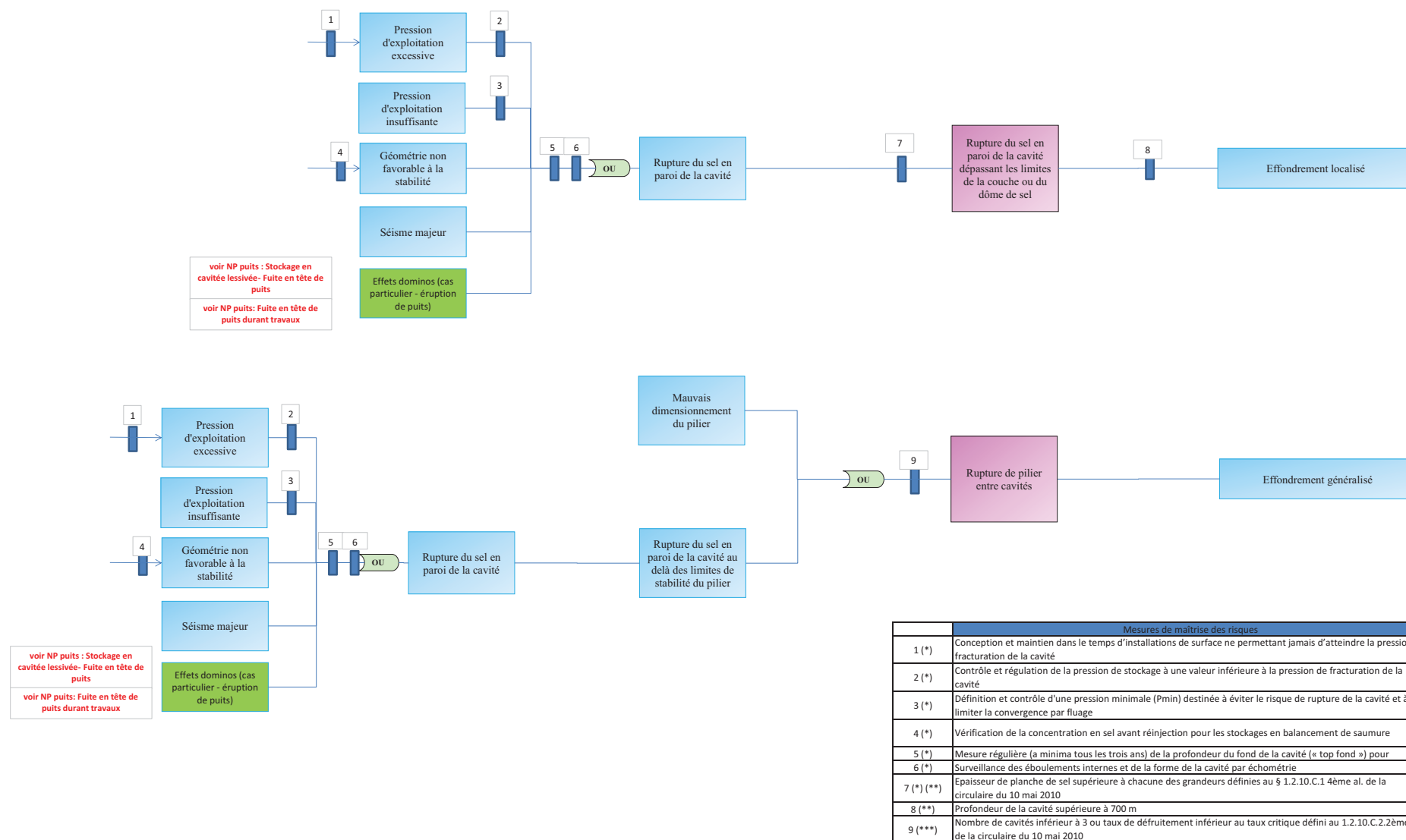
Stockage de de produits (gaz naturel, hydrocarbures, gaz liquéfiés) en cavité lessivée - Fuites liées au réservoir



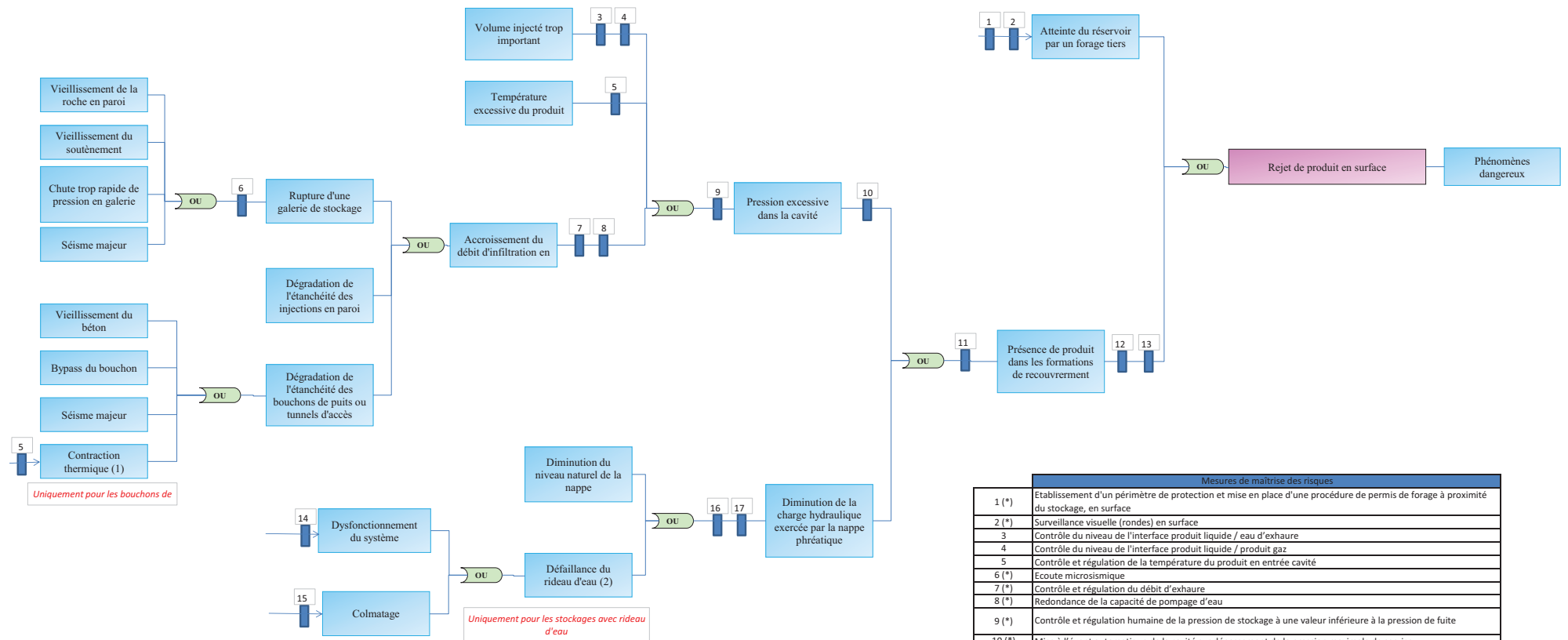
Mesures de maîtrise des risques	
1 (*)	Etablissement d'un périmètre de protection et mise en place d'une procédure de permis de forage à proximité du stockage, en surface
2 (*)	Surveillance visuelle (rondes) en surface
3 (*)	Réalisation, préalablement à la mise en exploitation, d'un contrôle de l'étanchéité de la cavité
4 (*)	Contrôle et régulation du volume stocké
5 (*)	Conception et maintien dans le temps d'installations de surface ne permettant jamais d'atteindre la pression de
6 (*)	Contrôle et régulation de la pression de stockage à une valeur inférieure à la pression de fracturation de la cavité
7 (*)	Définition et contrôle d'une pression minimale (Pmin) destinée à éviter le risque de rupture de la cavité et à limiter la convergence par fluage
8 (*)	Vérification de la concentration en sel avant réinjection pour les stockages en balancement de saumure
9 (*)	Mesure régulière (à minima tous les trois ans) de la profondeur du fond de la cavité (« top fond ») pour détecter des éboulements internes
10 (*)	Surveillance des éboulements internes et de la forme de la cavité par échométrie
11 (*)	Epaisseur de planche de sel supérieure à chacune des grandeurs définies au § 1.2.10.C.1 4ème al. de la circulaire du 10 mai 2010
12	Nombre de cavités inférieur à 3 ou taux de défrètement inférieur au taux critique défini au 1.2.10.C.2.2ème al. de la circulaire du 10 mai 2010

(*) Mesures minimales à respecter pour exclure le risque de rejet de produit en surface (circulaire du 10 mai 2010)

Stockage de produits (gaz naturel, hydrocarbures, gaz liquéfiés) en cavité lessivées - Effondrement brutal de la surface du sol



Stockage en cavité minée d'hydrocarbures liquides ou liquéfiés - Fuites liées au réservoir



Mesures de maîtrise des risques	
1 (*)	Etablissement d'un périmètre de protection et mise en place d'une procédure de permis de forage à proximité du stockage, en surface
2 (*)	Surveillance visuelle (rondes) en surface
3	Contrôle du niveau de l'interface produit liquide / eau d'exhaure
4	Contrôle du niveau de l'interface produit liquide / produit gaz
5	Contrôle et régulation de la température du produit en entrée cavité
6 (*)	Ecoute microsismique
7 (*)	Contrôle et régulation du débit d'exhaure
8 (*)	Redondance de la capacité de pompage d'eau
9 (*)	Contrôle et régulation humaine de la pression de stockage à une valeur inférieure à la pression de fuite
10 (*)	Mise à l'évent automatique de la cavité sur dépassement de la pression maximale de service
11 (*)	Contrôle et régulation humaine du volume injecté
12 (*)	Contrôle de l'absence de produit dans les horizons de surface
13 (*)	Contrôle du confinement du produit dans la cavité (détection de gaz dans la nappe)
14 (*)	Contrôle et régulation du débit d'alimentation du rideau d'eau
15 (*)	Traitement de l'eau d'alimentation des rideaux d'eau pour prévenir le colmatage de ce rideau d'eau
16 (*) (**)	Contrôle des pressions interstitielles au toit de la cavité
17 (*) (**)	Contrôle des niveaux piézométriques dans le périmètre du stockage

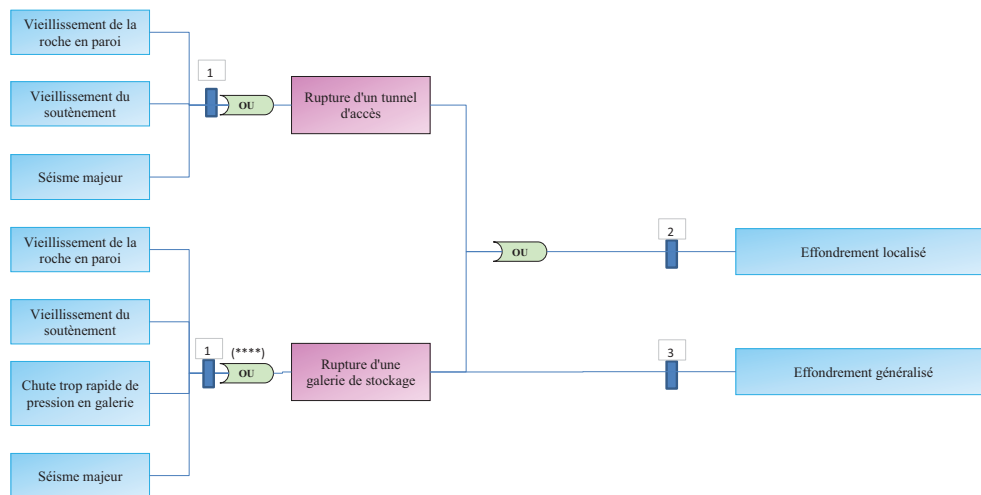
(1) uniquement pour les bouchons de puits

(2) uniquement pour les stockages avec rideau d'eau

(*) Mesures minimales à respecter pour exclure le risque de remontée de produit en surface (circulaire du 10 mai 2010)

(**) Mesures permettant de considérer l'effondrement localisé comme un phénomène à cinétique lente

Stockage en cavité minée d'hydrocarbures liquides ou liquéfiés - Effondrement de la surface du sol



Mesures de maîtrise des risques	
1 (*)	Ecoute microsismique
2 (**)	Rapport $P/H > 15$ (où P est la profondeur du toit de la cavité et H l'ouverture de la cavité)
3 (***)	Rapport $P/D > 2$ (où P est la profondeur du toit de la cavité et D la plus petite extension horizontale du stockage) ou taux de défrètement inférieur à 50%

(*) Mesures minimales à respecter pour exclure le risque de remontée de produit en surface (circulaire du 10 mai 2010)

(**) Critères d'exclusion du risque d'effondrement localisé (circulaire du 10 mai 2010)

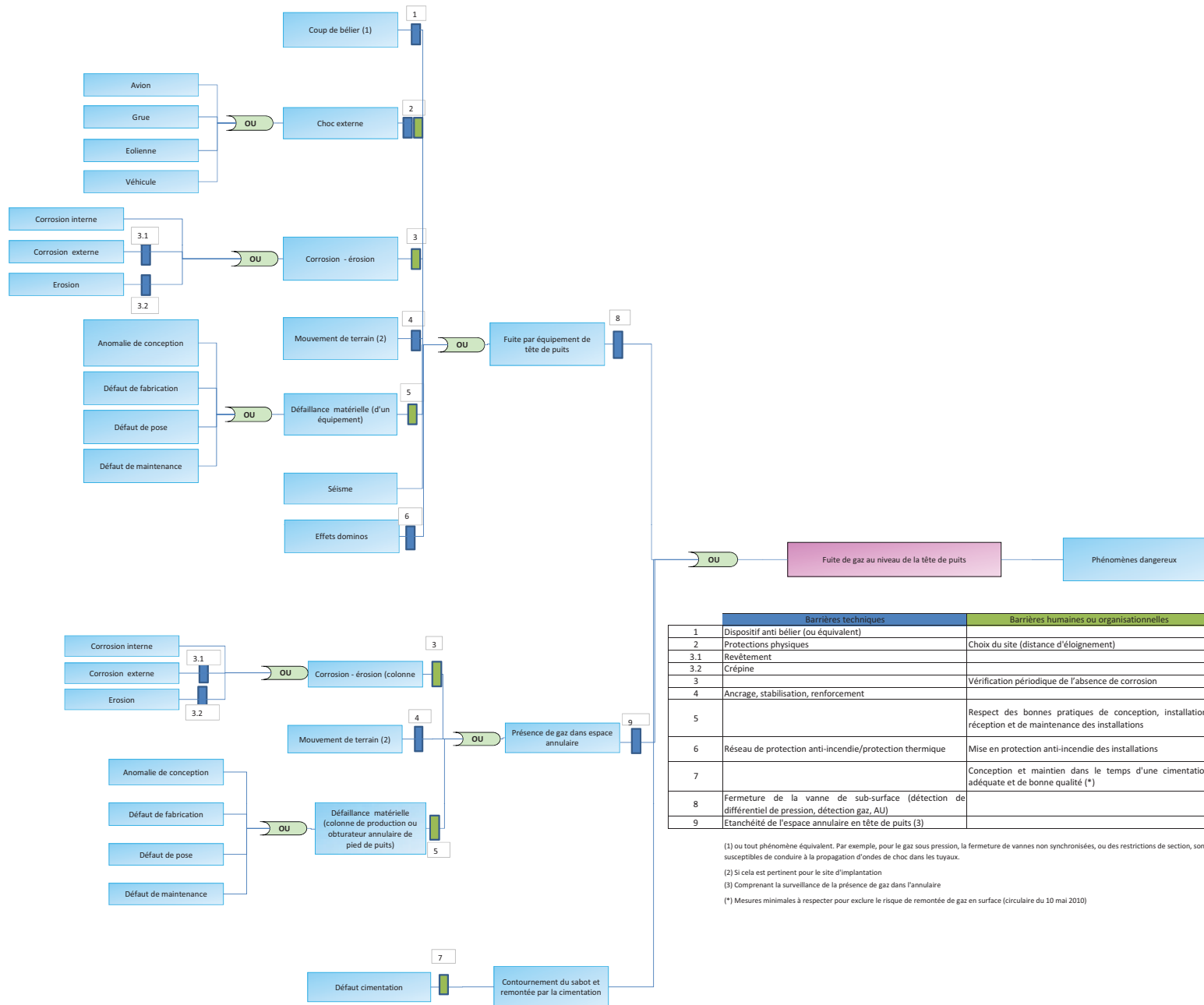
(***) Critères d'exclusion du risque d'effondrement généralisé (circulaire du 10 mai 2010)

(****) Mesures permettant de considérer l'effondrement localisé comme un phénomène à cinétique lente

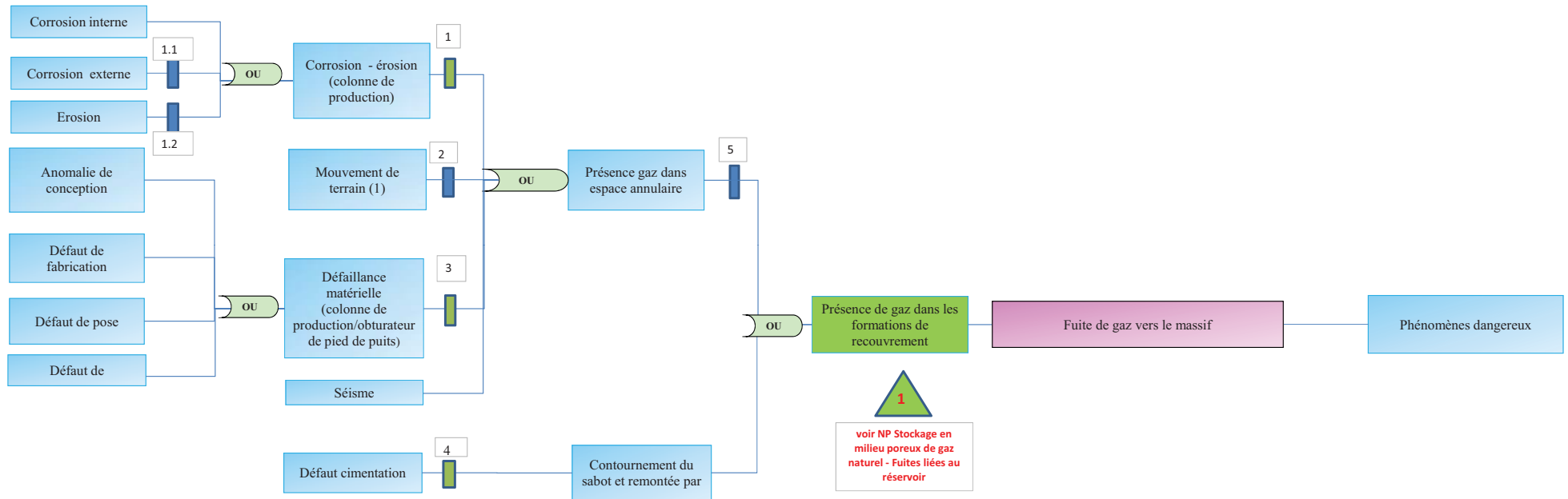
ANNEXE C :
Nœuds-papillons génériques relatifs aux puits

ANNEXE C-1 :
Nœuds-papillons génériques relatifs
aux puits exploités en milieux poreux

Stockage en milieu poreux de gaz naturel - Fuite en tête de puits



Stockage en milieu poreux de gaz naturel - Fuite du puits vers le massif



	Barrières techniques	Barrières humaines ou organisationnelles
1.1	Protection cathodique, revêtement	
1.2	Crépine	
1		Vérification périodique de l'absence de corrosion et de la bonne étanchéité du puits (diagraphie)
2	Ancrage, stabilisation, renforcement	
3		Respect des bonnes pratiques de conception, installation, réception et maintenance des installations
4		Conception et maintien dans le temps d'une cimentation adéquate et de bonne qualité (*)
5	Étanchéité de l'espace annulaire (cuvelage+cimentation) (2)	

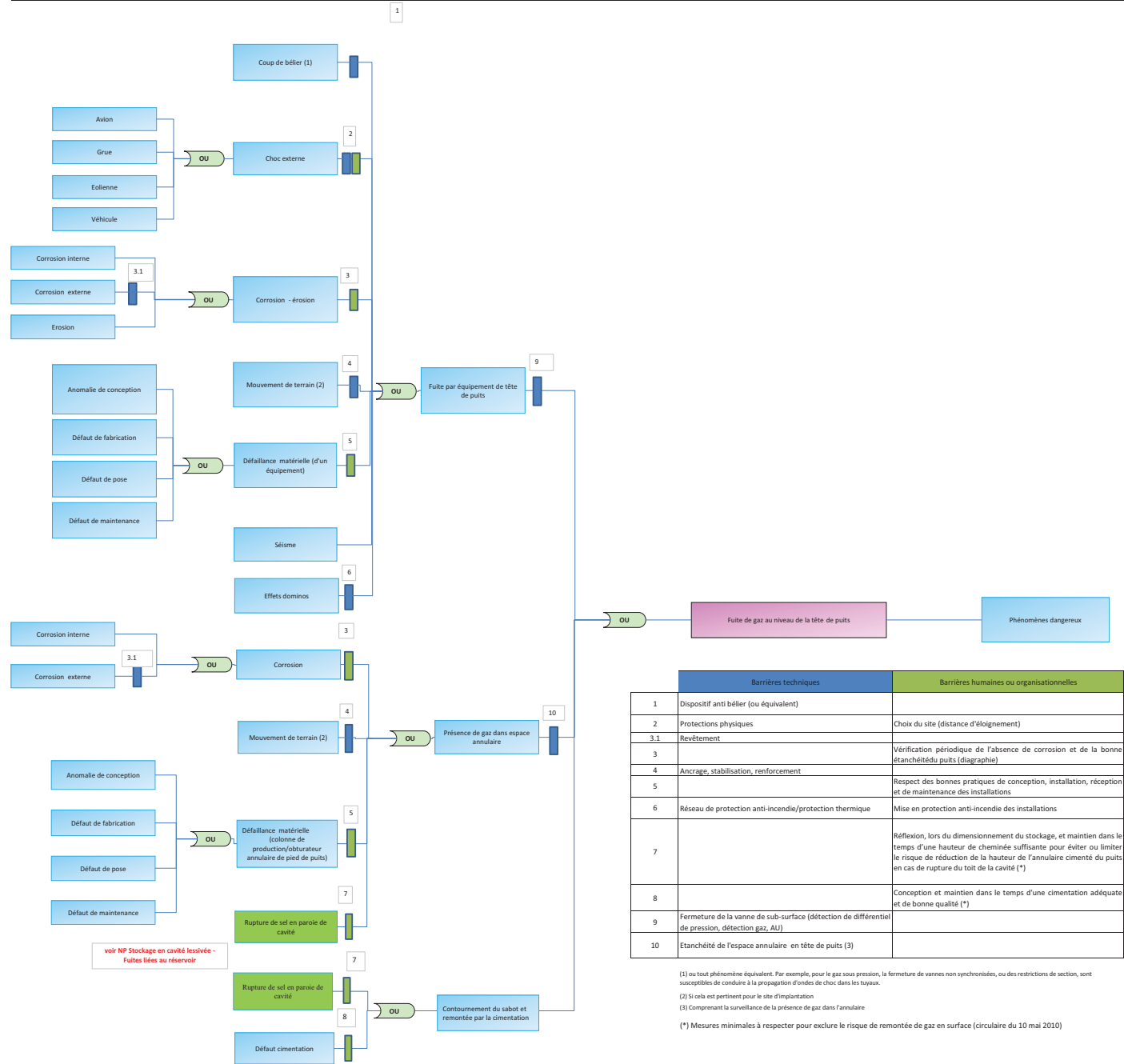
(1) Si cela est pertinent pour le site d'implantation

(2) Comprenant la surveillance de la présence de gaz dans l'annulaire (Mesures minimales à respecter pour exclure le risque de remontée de gaz en surface (circulaire du 10 mai 2010))

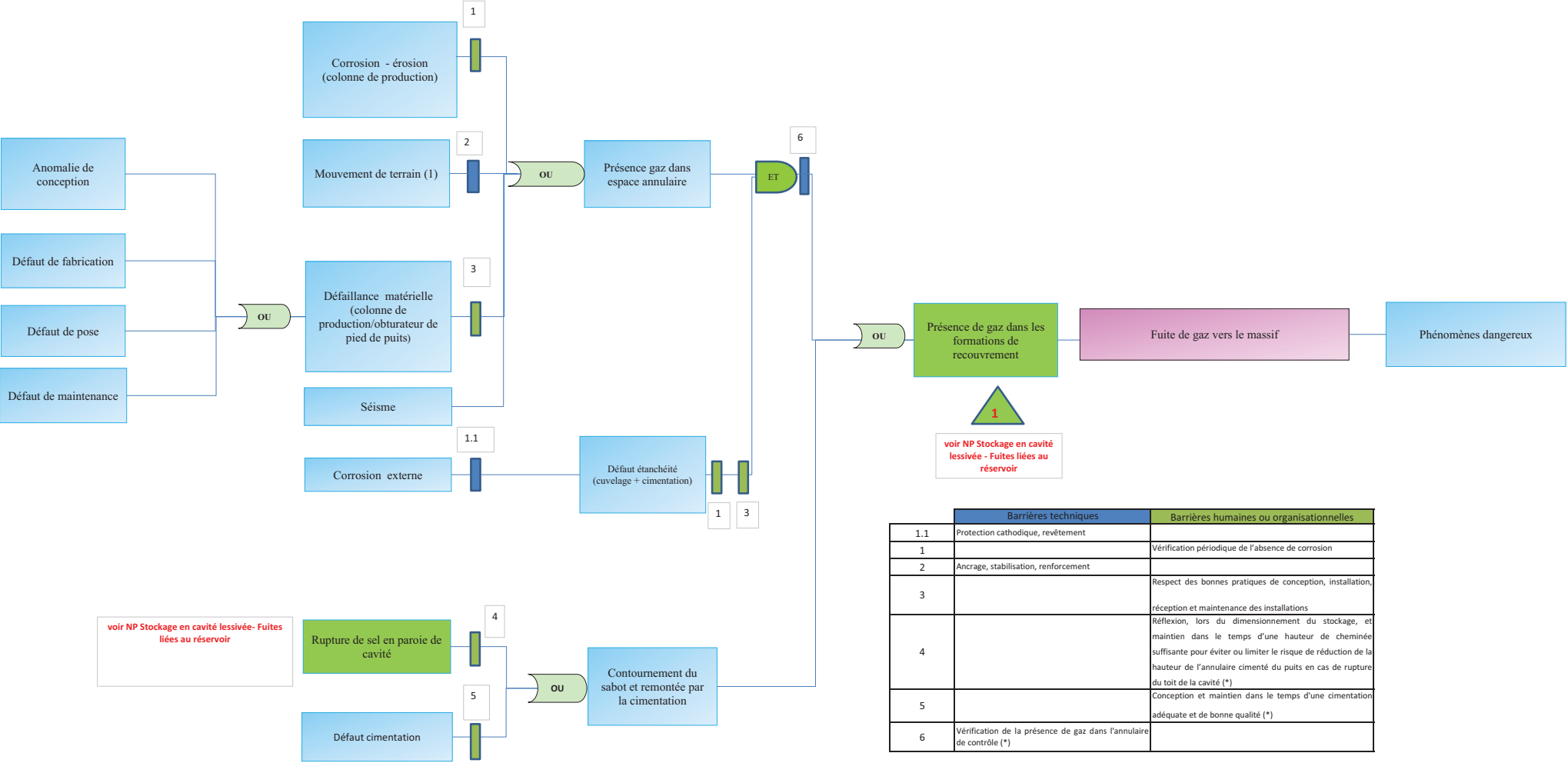
(*) Mesures minimales à respecter pour exclure le risque de remontée de gaz en surface (circulaire du 10 mai 2010)

ANNEXE C-2 :
Nœuds-papillons génériques relatifs
aux puits en cavité lessivée exploités
en compression-détente

Stockage en cavité lessivée de gaz naturel exploité en compression détente - Fuite en tête de puits



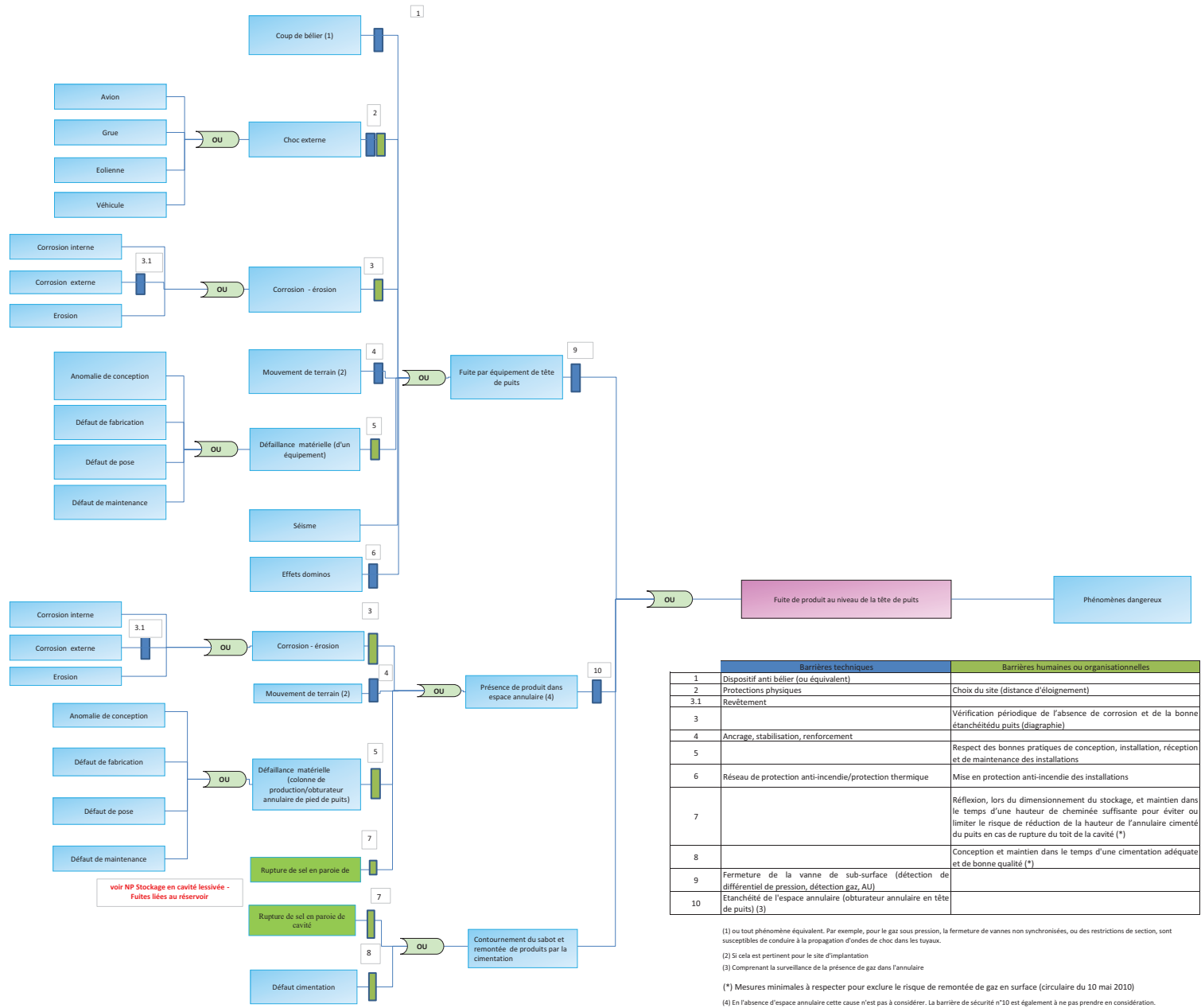
Stockage en cavité lessivée de gaz naturel exploité en compression détente - Fuite du puits vers le massif



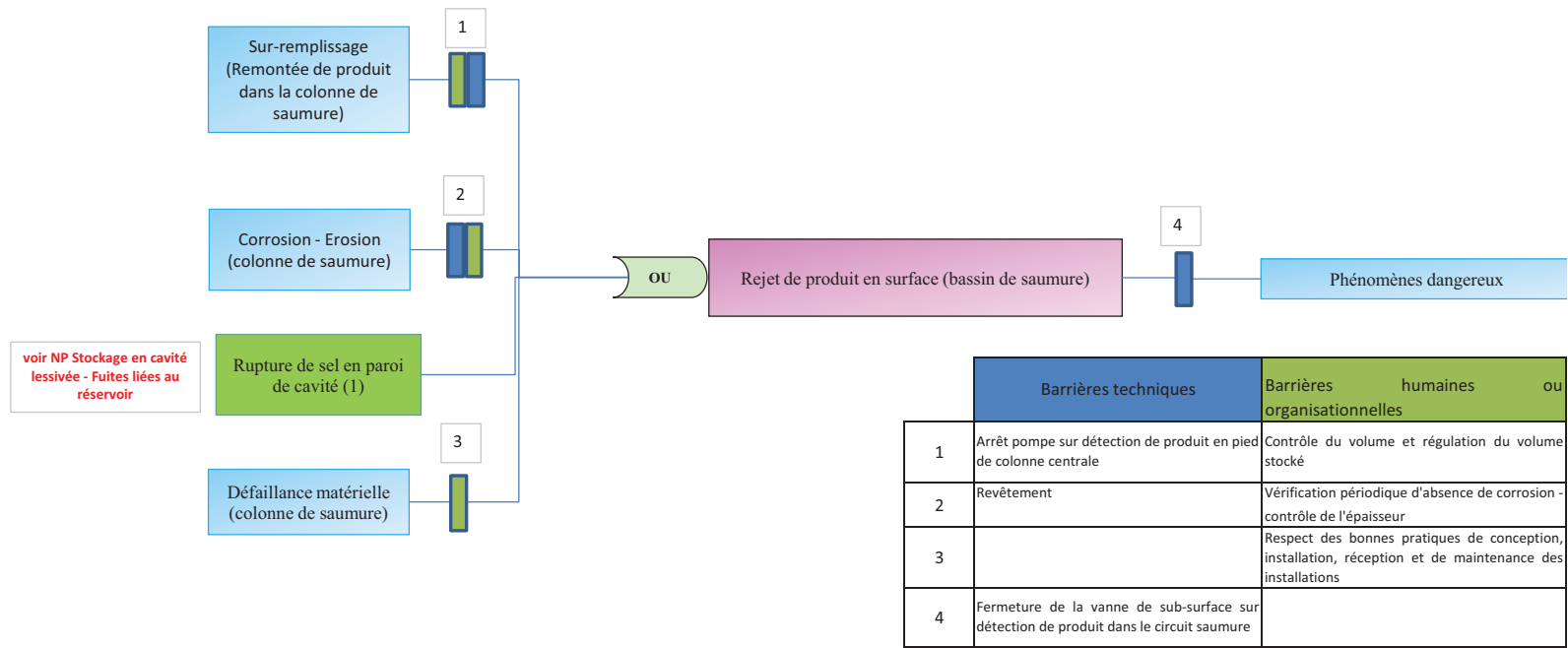
(1) Si cela est pertinent pour le site d'implantation
(*) Mesures minimales à respecter pour exclure le risque de remontée de gaz en surface (circulaire du 10 mai 2010)

ANNEXE C-3 :
Nœuds-papillons génériques relatifs aux
puits en cavité lessivée exploités
en balancement de saumure

Stockage de de produits (hydrocarbures, gaz liquéfiés) en cavité lessivée exploitée en balancement de saumure- Fuite en tête de puits

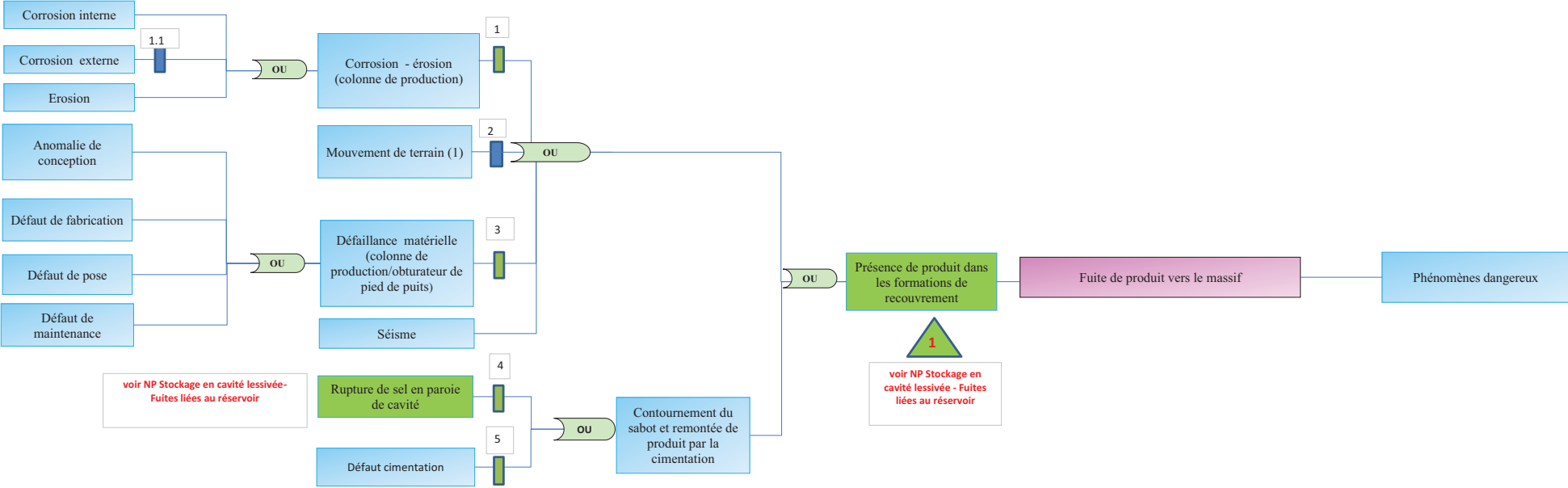


Stockage de de produits (hydrocarbures, gaz liquéfiés) en cavité lessivée exploitée en balancement de saumure - Fuite en tête de puits via circuit saumure



(1) Le détachement d'un bloc de sel au toit de la cavité peut conduire à endommager la colonne de saumure et permettre une entrée de produit dans le circuit de saumure

Stockage de de produits (hydrocarbures, gaz liquéfiés) en cavité lessivée exploité en balancement de saumure -Puits sans annulaire de contrôle - Fuite du puits vers le massif

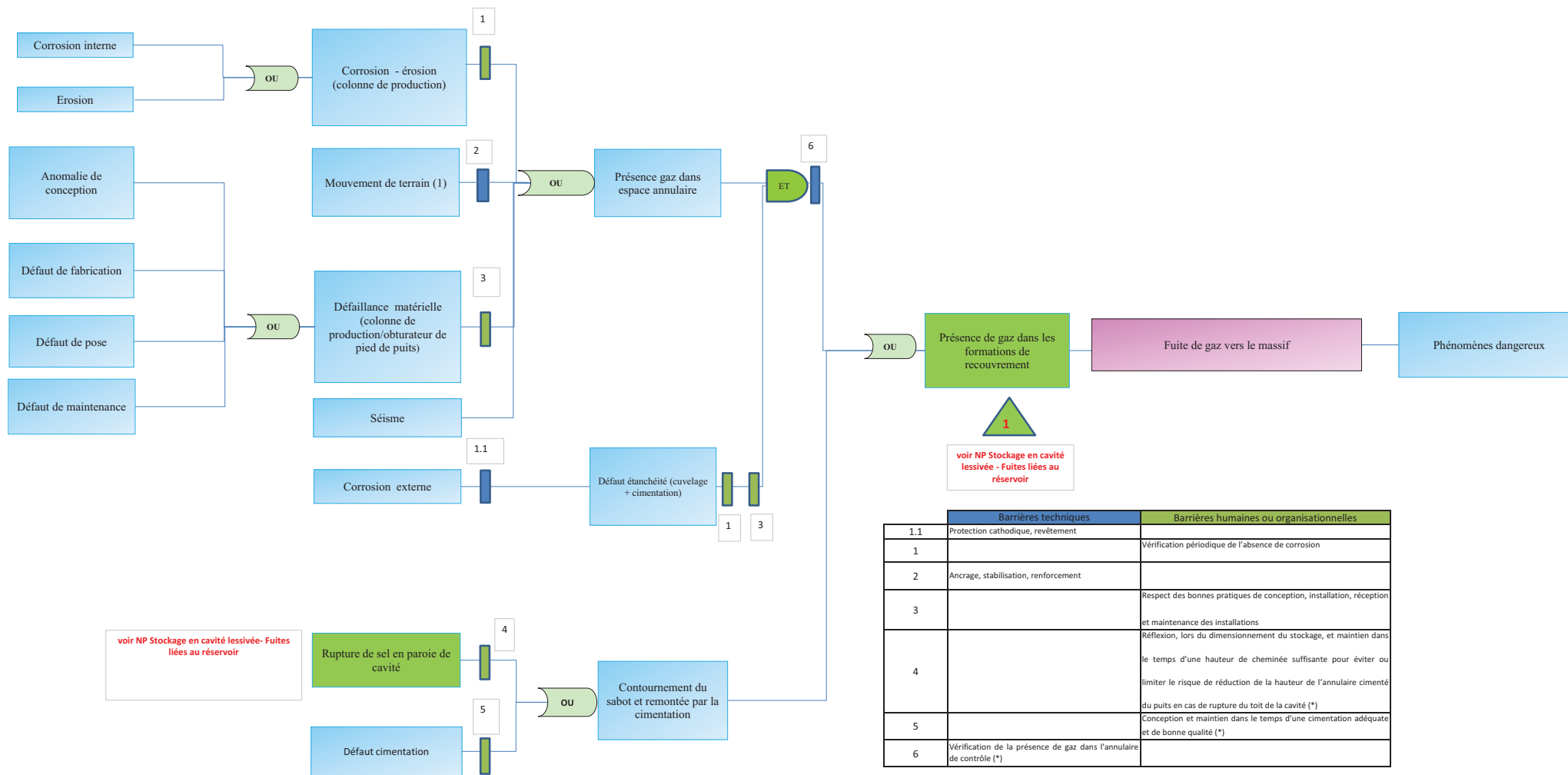


	Barrières techniques	Barrières humaines ou organisationnelles
1.1	Protection cathodique, revêtement	
1		Vérification périodique de l'absence de corrosion
2	Ancrage, stabilisation, renforcement	
3		Respect des bonnes pratiques de conception, installation, réception et maintenance des installations
4		Réflexion, lors du dimensionnement du stockage, et maintien dans le temps d'une hauteur de cheminée suffisante pour éviter ou limiter le risque de réduction de la hauteur de l'annulaire cimenté du puits en cas de rupture du toit de la cavité (*)
5		Conception et maintien dans le temps d'une cimentation adéquate et de bonne qualité (*)

(1) Si cela est pertinent pour le site d'implantation

(*) Mesures minimales à respecter pour exclure le risque de remontée de gaz en surface (circulaire du 10 mai 2010)

Stockage de de produits (hydrocarbures, gaz liquéfiés) en cavité lessivée exploité en balancement de saumure -Puits avec annulaire de contrôle - Fuite du puits vers le massif

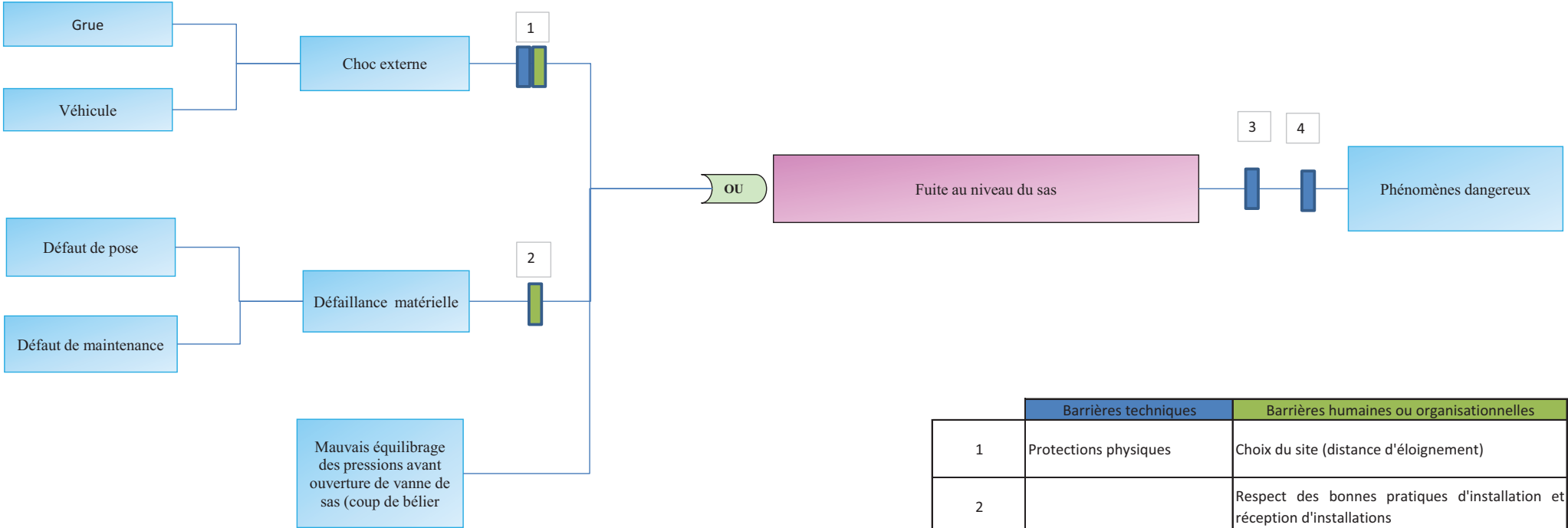


(1) Si cela est pertinent pour le site d'implantation

(*) Mesures minimales à respecter pour exclure le risque de remontée de gaz en surface (circulaire du 10 mai 2010)

ANNEXE C-4 :
Nœud-papillon générique relatif aux fuites en tête de
puits durant des travaux

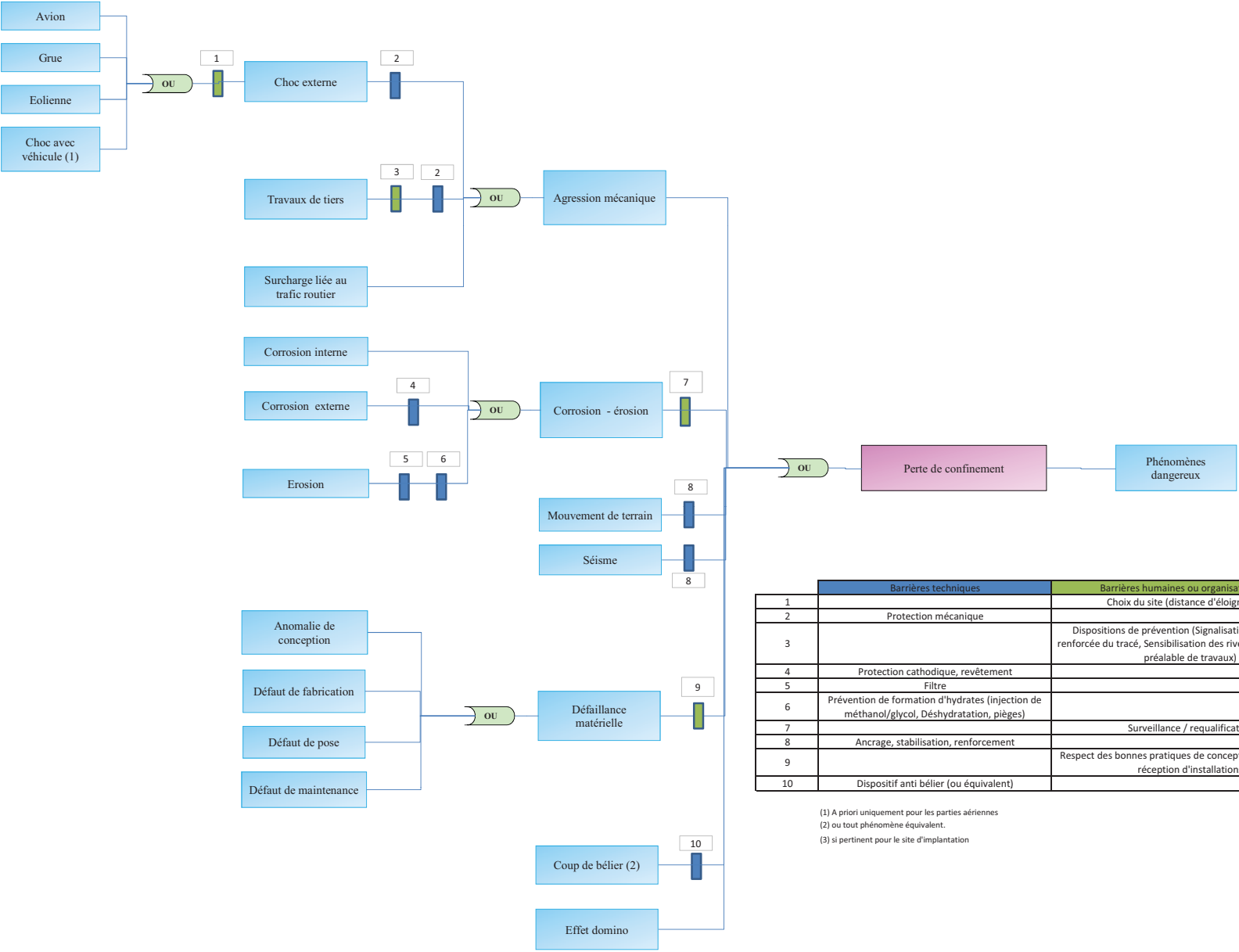
Fuite en tête de puits durant travaux



	Barrières techniques	Barrières humaines ou organisationnelles
1	Protections physiques	Choix du site (distance d'éloignement)
2		Respect des bonnes pratiques d'installation et réception d'installations
3		Bloc Opturateur de Pression
3	Vanne de fond de puits	

ANNEXE D :
Nœuds-papillons génériques relatifs aux collectes

Perte de confinement - collecte



	Barrières techniques	Barrières humaines ou organisationnelles
1		Choix du site (distance d'éloignement)
2	Protection mécanique	
3		Dispositions de prévention (Signalisation, Surveillance renforcée du tracé, Sensibilisation des riverains, Autorisation préalable de travaux)
4	Protection cathodique, revêtement	
5	Filtre	
6	Prévention de formation d'hydrates (injection de méthanol/glycol, Déshydratation, pièges)	
7		Surveillance / requalification
8	Ancrage, stabilisation, renforcement	
9		Respect des bonnes pratiques de conception, installation et réception d'installations
10	Dispositif anti bélier (ou équivalent)	

(1) A priori uniquement pour les parties aériennes

(2) ou tout phénomène équivalent.

(3) si pertinent pour le site d'implantation

ANNEXE E :
**Note technique relative à l'établissement de critères
d'exclusion du risque d'effondrement au droit de
stockages souterrains durant la phase d'exploitation**

NOTE TECHNIQUE**Etablissement de critères d'exclusion du risque d'effondrement
au droit de stockages souterrains durant la phase d'exploitation**

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	R. SALMON F. LAHAIE	C. FRANCK	M. GHOREYCHI
Qualité	Respectivement Ingénieurs à l'unité des Risques Géotechniques liés à l'Exploitation du sous-sol et à l'unité Auscultation et Surveillance Géophysique et Géotechnique de la Direction des Risques du Sol et du sous-sol	Délégué Appui Technique de la Direction des Risques du Sol et du sous-sol	Directeur des Risques du Sol et du sous-sol
Visa			

1. OBJET ET CONTEXTE

L'objet de la présente note est de formaliser des critères simples permettant d'exclure, pendant la période d'exploitation, la possibilité d'un effondrement en surface lié à la présence de stockages souterrains.

Pour cela, il convient de distinguer les stockages en cavités minées de ceux en cavités salines lessivées car les configurations, la nature des ouvrages et leur profondeur diffèrent suffisamment pour justifier une analyse spécifique en termes de risque géotechnique.

2. CAVITES MINEES

En France, les exploitations en cavités minées concernent sept sites à ce jour, dont les profondeurs du toit s'établissent entre 80 m et 150 m. Ces stockages sont constitués de la cavité dite minée, mais également d'ouvrages de connexion avec la surface : puits et descenderies.

Les stockages en cavités minées présentent des similitudes avec les exploitations de mines et carrières souterraines (configuration en galeries ou en chambres et piliers, profondeurs comprises entre quelques dizaines et quelques centaines de mètres).

Les spécificités propres aux stockages tiennent au creusement de vides de sections souvent plus importantes que des galeries d'infrastructure minière. Il faut noter également que la très bonne tenue, sans entretien, des terrains dans la période d'exploitation est un souci important dans le cadre d'un stockage, alors que les cavités minières étaient soit régulièrement inspectées et entretenues, soit délaissées si le minerai était pris. Parfois certaines configurations minières étaient dimensionnées dans l'optique d'une exploitation sur un temps restreint.

Pour autant, l'absence de retour d'expérience suffisant sur la tenue à long terme des stockages souterrains en cavités minées justifient de s'inspirer de celui acquis par les experts dans le domaine minier.

Pour établir un ou des critères d'exclusion, on propose de distinguer les cavités minées d'une part et les ouvrages de connexion avec la surface d'autre part.

2.1 RISQUES LIES AUX CAVITES A PROPREMENT PARLER

Concernant les **cavités minées à proprement parler**, deux phénomènes en surface doivent être considérés : l'effondrement localisé et l'effondrement généralisé.

2.1.1 L'EFFONDREMENT LOCALISE

L'**effondrement localisé** correspond à l'initiation d'un fontis au toit de la cavité (préférentiellement aux carrefours de galeries ou de chambres et piliers), remontant progressivement à travers les terrains de recouvrement et débouchant en surface. Ce n'est que lorsque le phénomène atteint la surface qu'il peut engendrer des désordres brutaux et importants (cratère de quelques mètres, pouvant dans certains cas dépasser la dizaine de mètres), susceptibles de mener à des risques létaux. En fonction du mécanisme initiateur de l'effondrement et de la nature des terrains de sub-surface, les parois du cratère peuvent être sub-verticales ou inclinées, donnant à celui-ci une forme caractéristique d'entonnoir.

La cinétique de remontée de la voûte à travers les terrains de recouvrement étant relativement lente dans le cas général, elle permet d'envisager, pour les profondeurs typiques des cavités minées utilisées pour le stockage (actuellement 80-150 m, en France), la mise en œuvre de moyens de surveillance permettant de détecter l'initiation du phénomène au fond, bien avant qu'il ne débouche en surface.

Examinons maintenant, en dehors de tout aspect lié à la cinétique, les conditions dans lesquelles le phénomène d'effondrement localisé de la surface du sol peut être considéré comme physiquement impossible au droit d'une cavité minée de stockage. D'une manière générale, l'évaluation de la possibilité d'un tel phénomène s'appuie autant sur la géométrie du vide souterrain et sa profondeur que sur la nature des matériaux de recouvrement (présence de bancs raides, capacité de foisonnement des matériaux, présence de nappes ou de niveaux saturés, etc.).

L'influence et le rôle du recouvrement sont importants. Cet aspect doit donc faire l'objet d'études, voire d'investigations pour mieux appréhender les paramètres qui le caractérisent. Chaque site de stockage souterrain a, et aura pour les futurs projets, sa géologie et sa configuration propres, et par conséquent un contexte de recouvrement spécifique au droit des cavités.

Nous avons cherché ici à établir un critère d'exclusion simple, essentiellement géométrique, utilisable en première approche et valable sauf contexte géologique très particulier des terrains de recouvrement. La prise en compte de la nature des terrains du recouvrement fera, si besoin est, l'objet d'une analyse spécifique site par site.

Ce principe étant fixé, quel peut être le critère géométrique à retenir ? Toute chose égale par ailleurs, pour une hauteur de vide souterrain donnée (H), une plus grande profondeur (P) favorisera, par foisonnement des terrains s'effondrant au fond, un auto-comblement et limitera la possibilité de remontée du fontis en surface.

Un critère couramment employé dans les domaines des mines et des carrières souterraines est que le risque de fontis peut être écarté pour un rapport $P/H > A$. Les retours d'expérience et publications qui en ont résulté montrent les éléments suivants :

- pour des carrières souterraines de calcaire ou de gypse en région parisienne (ouverture plurimétrique), l'étude de Vachat, qui s'appuie sur un retour d'expérience solide, identifie une valeur de A de l'ordre de 15 ;
- dans le domaine des mines, pour des galeries et travaux souterrains dont la hauteur est de 2 à 3 m classiquement, on retient d'expérience un risque possible de fontis pour des profondeurs de travaux inférieures à 50 m. Ce n'est que lorsque des études détaillées de l'aléa sont entreprises que ce critère est affiné, en essayant notamment d'apprécier le coefficient de foisonnement des matériaux. Des études et retours d'expérience plus spécifiques pour des galeries minières d'ouverture limitée (section souvent inférieure à 10 m^2) mènent à retenir généralement une valeur de A de l'ordre de 10 à 15 ; des valeurs supérieures ne sont fournies que dans des cas très particuliers (tels que la dissolution du gypse).

Compte tenu du fait que les cavités minées de stockage souterrain sont des ouvrages dont l'ouverture est plurimétrique (c'est-à-dire parfois supérieure au retour d'expérience disponible), que l'augmentation de la section peut ainsi augmenter la probabilité de recoupement de discontinuités dans la roche, nous préconisons de manière sécuritaire de retenir une valeur de A de 15.

Notons que la valeur de A est proposée pour une évaluation à l'échelle de temps de l'exploitation (quelques décennies) et en supposant la présence d'un exploitant procédant à la surveillance. Nous considérons qu'une évaluation à long terme nécessiterait la prise en compte de phénomènes géologiques rares et évoluant vers la surface, qui pourraient mener à retenir, si le même exercice de recherche d'un critère d'exclusion purement géométrique devait être mené, une valeur de A supérieure.

Durant la phase d'exploitation, le risque d'effondrement localisé peut donc être géométriquement écarté au droit d'une cavité minée, si elle présente un rapport profondeur sur hauteur de vide supérieur à 15.

Dans l'hypothèse où le rapport P/H serait inférieur à 15, l'exploitant devra apporter des éléments complémentaires, en particulier sur la géologie des terrains de recouvrement (conduisant notamment à l'évaluation du coefficient de foisonnement de ceux-ci), afin qu'il puisse justifier de la non possibilité géométrique ou mécanique du phénomène.

2.1.2 L'EFFONDREMENT GENERALISE

L'**effondrement généralisé** ou « en masse » est une forme spécifique de la manifestation en surface de la rupture d'un quartier souterrain se produisant dans des conditions géologiques et d'exploitation particulières. Il se traduit par la descente brutale des terrains de recouvrement et l'apparition en surface d'un effondrement dont le diamètre est de plusieurs dizaines de mètres (superficie de plusieurs hectares).

Un certain nombre de conditions favorisent un tel scénario :

1. une configuration d'exploitation occasionnant un taux important de vide (chambres et piliers, galeries et recoupes) ;
2. une extension de la zone minée (D) suffisamment grande comparativement à la profondeur de la cavité (P) (configuration dite sur-critique) ;
3. la présence d'un banc raide (« cassant ») dans le recouvrement (banc à rupture fragile) ;
4. la présence de failles subverticales pouvant « pré-découper » le massif.

Les deux dernières conditions sont de nature géologique. Or, comme pour l'effondrement localisé, nous avons cherché ici à établir un critère volontairement simplifié, essentiellement géométrique et indépendant de la configuration géologique propre à chaque site.

La première condition ci-dessus permet d'établir que le risque d'effondrement généralisé peut être exclu pour un taux de défruitement¹ faible. Compte tenu du retour d'expérience dans le domaine minier, on peut considérer, de manière sécuritaire, que dans le domaine de profondeurs des stockages actuels en cavités minées, un taux de défruitement inférieur à 50 % permet d'exclure le risque d'effondrement généralisé.

¹ Rapport de la surface de vide sur la surface totale d'une exploitation souterraine

La deuxième condition ci-dessus permet d'établir que le risque d'effondrement généralisé peut être exclu pour un rapport $D/P < B$. Notons que **D représente la plus petite extension** du stockage. En effet, si l'extension des vides est petite dans une direction devant la profondeur, une grande dimension dans une autre direction ne suffit pas pour donner lieu à un effondrement : une galerie de grande longueur et de largeur limitée (quelques mètres) ne peut engendrer d'effondrement généralisé.

Les effondrements généralisés sont rares et le retour d'expérience est limité dans ce domaine. Dans le bassin ferrifère lorrain, l'analyse en retour des effondrements généralisés a mené à retenir une valeur pour B de 0,6¹.

De manière sécuritaire, afin de tenir compte des différences entre les ouvrages miniers et les cavités minées de stockage souterrain, nous proposons de retenir une valeur pour B de 0,5.

Le risque d'effondrement généralisé peut donc être écarté au droit d'une cavité minée pendant la période d'exploitation si elle présente un taux de défrètement inférieur à 50% ou si le rapport extension sur profondeur de la cavité est inférieur à 0,5.

A notre connaissance aucun site français ne présente actuellement un tel risque géométrique d'effondrement généralisé.

2.1.3 RECOMMANDATION

En ce qui concerne les cavités minées de stockage, nous proposons donc d'exclure du risque d'effondrement, pendant la phase d'exploitation, toute cavité minée qui remplit les conditions suivantes :

***P/H > 15 : exclusion du phénomène d'effondrement localisé
Taux de défrètement < 50 % OU D/P < 0,5 : exclusion du phénomène
d'effondrement généralisé
P : profondeur de la cavité minée
H : ouverture de la cavité minée
D : plus petite extension du stockage***

L'exclusion du risque d'effondrement dans les autres cas doit faire l'objet d'une démonstration particulière, faisant appel à des considérations géologiques et géotechniques.

2.2 RISQUES LIES AUX OUVRAGES DE CONNEXION ENTRE LA CAVITE ET LA SURFACE

En ce qui concerne les **ouvrages de connexion entre la cavité et la surface (tunnels d'accès, descenderies, puits)**, ils peuvent, a priori, présenter un risque d'effondrement localisé : effondrement de l'entrée d'un tunnel d'accès, d'une tête de puits, effondrement initié au toit d'un tunnel d'accès (fontis).

Nous ne proposons donc pas de critère d'exclusion particulier pour ces ouvrages, les approches minières y sont en effet applicables.

3. CAVITES SALINES LESSIVEES

Les sites de stockage en cavités salines lessivées actuellement en exploitation sur le territoire national sont au nombre de huit. Chaque site comprend un nombre varié de cavités, pouvant aller d'une seule cavité (pour Hauterives ou Grand Serre par exemple) jusqu'à 32 cavités (pour Manosque Geosel). La profondeur du toit des cavités est supérieure à 1000 m, à l'exception des sites de Caresse/Cassaber (300 m, exploitation arrêtée) et du site de Manosque Geosel, où la profondeur du toit des cavités varie entre 300 et 900 m.

Pour les stockages en cavités salines lessivées, deux phénomènes d'effondrement en surface peuvent a priori être considérés : l'effondrement localisé (lié à la rupture d'une seule cavité) et l'effondrement généralisé (lié à la rupture d'un réseau de cavités). Nous proposons ci-après d'établir des critères permettant d'exclure la possibilité de tels phénomènes. Ces critères reposent, d'une part, sur le retour d'expérience (§ 3.1) et d'autre part, sur des approches mécaniques basées sur des hypothèses volontairement sécuritaires (§ 3.2).

3.1 RISQUE D'EFFONDREMENT LOCALISE AU DROIT D'UNE CAVITE

3.1.1 ANALYSE DU RETOUR D'EXPERIENCE

Il faut rappeler avant tout que le sel est un matériau très particulier, présentant une grande ductilité (capacité à se déformer largement sans se rompre) lorsqu'il est en compression alors que le comportement est fragile en traction. La grande ductilité du sel est sans doute à l'origine de la grande stabilité des ouvrages réalisés dans ce matériau, dès lors qu'ils sont profilés pour que la résistance en traction soit la moins sollicitée possible.

A notre connaissance, **il n'est pas fait état dans la littérature mondiale de cas d'effondrements liés à la rupture de cavités salines dimensionnées pour le stockage souterrain.** Bien que le volume et les formes des cavités salines puissent fortement diminuer et se modifier avec le temps sous l'effet du fluage, notamment à grande profondeur et lorsque la pression exercée par le fluide en paroi des cavités est faible (30 % de perte de volume observée sur une période de 10 ans à Tersanne par exemple), les effets en surface se limitent, au plus, à un affaissement (subsidence) non préjudiciable.

Si l'on élargit l'analyse du retour d'expérience aux cavités salines en général (hors domaine du stockage souterrain), on constate qu'un certain nombre de cas d'effondrement sont répertoriés, notamment, dans le contexte des cavités d'exploitation du sel. Notons toutefois que ces dernières sont constituées dans le seul but d'exploiter le sel et présentent une géométrie et un contexte souvent très différents et bien moins favorables, en termes de stabilité, que ceux des cavités de stockage. Dans certains cas, l'effondrement fait même partie intégrante de la méthode d'exploitation. Les cas connus d'effondrement dans ce contexte correspondent à des cavités situées à quelques centaines de mètres de profondeur au plus.

Un autre contexte dans lequel des cas d'effondrements ont été observés est celui de cavités formées de manière accidentelle par le lessivage involontaire d'une couche de sel : cas de Mont Belvieu 2 (Texas), Berkaoui (Algérie), Wink Sink (Texas), Pannink Sin (Kansas). Là aussi, la géométrie et le contexte de formation de ces cavités est très peu comparable (et beaucoup moins favorable en termes de stabilité) à ceux d'une cavité de stockage en France. Notons que même dans ces cas très défavorables, il n'est pas fait état d'effondrement de cavités d'une profondeur au toit supérieure à environ 500 m.

A partir de ces éléments de retour d'expérience et en intégrant une certaine marge de sécurité, nous proposons un premier critère considérant que **le risque d'effondrement en surface peut être exclu dès lors que la profondeur du toit de la cavité est supérieure à 700 m.**

3.1.2 APPROCHES MECANIQUES

L'expérience des effondrements volontaires (provoqués) dans le contexte des cavités d'exploitation de sel par dissolution a montré le rôle crucial, en termes de stabilité, de l'épaisseur de la planche de sel laissée au toit de la cavité. L'effondrement se produit, d'une part, lorsque toute la planche de sel au toit de la cavité est exploitée, et d'autre part, lorsque la cavité a atteint une largeur critique liée à la résistance du reste du recouvrement. Le retour d'expérience des mines de sel traditionnelles (sèches) met également en évidence le rôle primordial sur la stabilité mécanique des cavités, d'une planche de sel laissée au toit immédiat de l'exploitation.

Ces constats vont en faveur d'un critère faisant intervenir l'épaisseur de la planche de sel au toit de cavités de stockage.

Plusieurs approches peuvent être utilisées pour établir **l'épaisseur minimale ($E_{p_{min}}$) de la planche de sel permettant d'assurer la stabilité mécanique de la cavité.** Nous présentons ci-après deux types d'approches, une approche basée sur le formalisme d'élastoplasticité (§ 3.1.2.1) et une approche dite « en voûte de déconfinement » (§ 3.1.2.2).

3.1.2.1 CRITERE BASE SUR UN FORMALISME D'ELASTOPLASTICITE

L'initiation de la fracturation au toit d'une cavité peut être estimée à partir d'un calcul de poutre ou de plaque en élasticité. La fracturation ne peut se produire que si la somme de la contrainte de flexion et la poussée naturelle des terrains devient une traction. Toutefois, ce calcul ne permet pas d'établir une règle simple pour la chute du toit et ne renseigne aucunement sur l'extension de la fracturation au toit.

L'approche proposée ici consiste à calculer l'épaisseur critique de la planche de sel à partir de laquelle celle-ci devient fracturée sur toute son épaisseur, pouvant mener à la chute du toit du sel et conduire, à terme, à l'effondrement puis à la remontée de la cavité. Dans un calcul en élastoplasticité, cette situation traduit le dépassement de la charge limite (écoulement plastique libre). Soulignons que le recours au formalisme de plasticité a pour objectif d'évaluer l'étendue de la zone fracturée autour de la cavité. Cette fracturation peut se produire dans le sel **sous forte sollicitation**, alors qu'une cavité saline peut manifester un fluage sans fracturation, sous sollicitations plus modérées se traduisant par un comportement viscoplastique.

Ce calcul est réalisé ici, en première approche, pour une cavité sphérique et en prenant comme hypothèse une pression du fluide aux parois nulle ($P_f=0$). Notons que cette dernière hypothèse est relativement sécuritaire puisqu'elle ne peut se réaliser en pratique que pour une cavité en gaz, dans le scénario où le puits rentrerait en éruption et où toute la cavité viendrait à se vider.

Dans ce cas, l'épaisseur critique $E_{p_{crit}}$ de la planche de sel (en m) peut s'exprimer en fonction du diamètre équivalent D_{eq} de la cavité (en m) et de la profondeur P du toit de la cavité (en m), sous la forme² :

$$EP_{crit} = 0,5 * D_{eq} * [\exp(0,000625 * P - 0,333) - 1] \quad (1)$$

Dans cette relation, la valeur de résistance à la compression uniaxiale du sel a été considérée égale à 20 MPa (seuil de fracturation qui est supérieur au seuil de dilatance (10-12 MPa) caractérisant la microfissuration du sel).

La valeur de l'épaisseur critique ainsi calculée est représentée graphiquement sur la Figure 1, en fonction de la profondeur et pour différents volumes de cavités (200 000m³, 400 000m³, 500 000m³, 600 000m³). Le calcul montre qu'une fracturation ne se produit qu'à partir d'une profondeur de 533 m et que, dans le cas d'une cavité de 500 000 m³ par exemple ($D_{eq}=98m$), on obtient une épaisseur critique de la planche de sel de 2m, 9m, 17m, 26m et 41m pour des profondeurs du toit de la cavité de 600m, 800m, 1000m, 1200m et 1500m, respectivement.

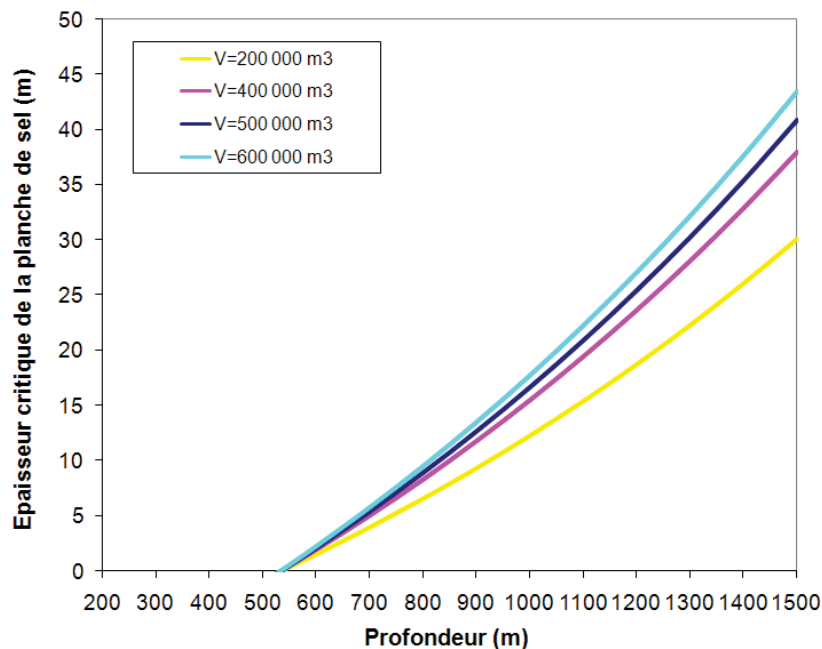


Figure 1 : Epaisseur de la planche de sel autorisant l'exclusion du risque d'effondrement d'une cavité saline de stockage

3.1.2.2 CRITERE BASE SUR L'APPROCHE DE LA VOUTE DE DECONFINEMENT

Un deuxième critère mécanique, préconisé et appliqué notamment par les exploitants français de stockage souterrain, consiste à se garantir que la cavité est profilée de sorte à ne pas présenter une portée horizontale excessive au toit. En effet, une telle configuration géométrique serait susceptible de conduire à une flexion de la planche de sel et à mettre en péril la stabilité de la cavité.

La planche de sel au toit doit donc avoir une épaisseur suffisante pour que lorsque de légères flexions apparaissent (mécaniquement possibles selon les configurations d'exploitations), les zones ainsi potentiellement déconfinées et pouvant être géométriquement critiques soient suffisamment éloignées du toit du sel.

On peut utiliser pour cela la règle de Terzaghi, définissant une zone déconfinée au toit de $0,25 B$ (B étant la portée d'une galerie), confirmée expérimentalement par la « règle du pouce des mineurs » qui considère des longueurs nécessaires de boulon d' $1/3 B$ (cf. T.R. Stacey A.H. Swart, Oct 2001, Practical Rock Engineering Practice, The Safety in Mines Research Advisory Committee). Ces valeurs peuvent se retrouver par approche numérique sur les distributions de contraintes ou sur modèles simples (abaques ou modèles semi-analytiques).

Le critère consiste donc à s'assurer que la zone déconfinée (de hauteur $1/3 B$) prise verticalement et directement au dessus de toute portée plate de largeur B n'atteint pas le toit du sel (voir figure 2)

Ce critère permet de tenir compte de la portée réelle de la cavité et s'avère particulièrement intéressant dans le cas de cavités à toit plat.

Ce critère prévoit, pour une cavité à toit plat de 90 m de diamètre, c'est-à-dire proche des diamètres maximaux généralement utilisés, une marge de sécurité nécessaire pour l'épaisseur de la planche de sel de 30 m.

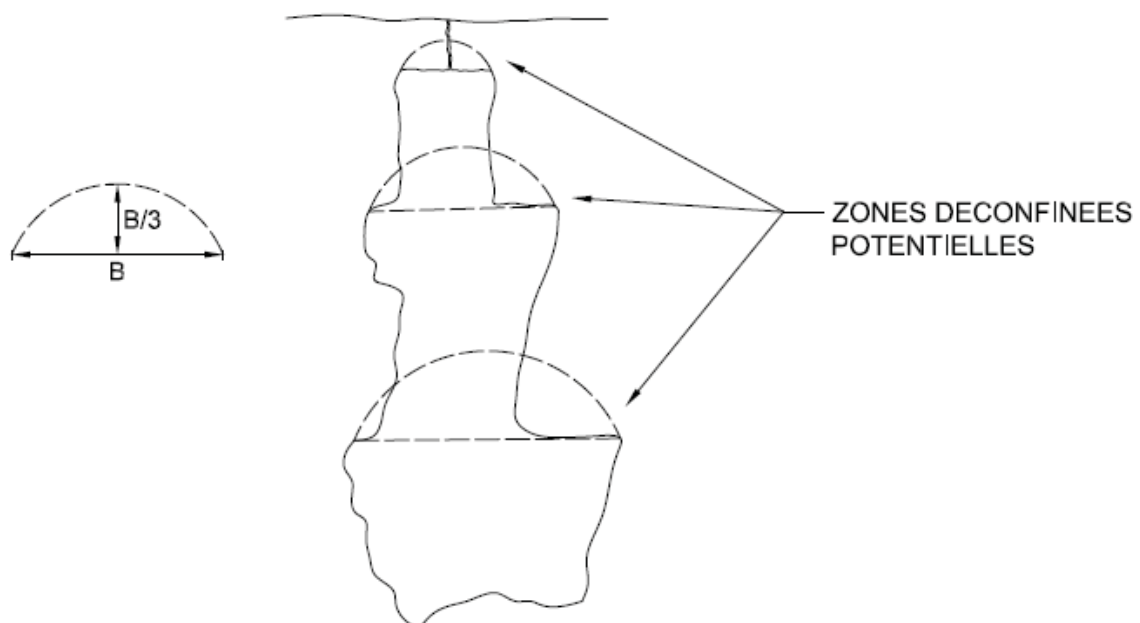


Figure 2 : Illustration du critère basé sur l'approche de la voûte déconfinée

3.1.3 RAPPEL DE LA REGLEMENTATION EN VIGUEUR A L'ETRANGER

En complément des approches précédentes, il peut être utile de rappeler les critères de sécurité imposés par la réglementation dans les pays étrangers.

La règle utilisée au Kansas (USA) par l'administration de l'Etat et basée sur leur retour d'expérience impose une valeur minimale de 100 pieds (soit environ 27 m) entre la zone lessivée et le toit du sel.

En s'inspirant de cette approche, on propose de compléter les critères précédents par un 4ème critère, basé sur le principe d'une valeur minimale **absolue** de l'épaisseur de la planche de sel, c'est-à-dire applicable à toutes les cavités quelles que soient leur profondeur, leur forme, leurs dimensions et la géologie des terrains de recouvrement.

En tenant compte du contexte géologique et historique des gisements de sel français et de la taille des cavités exploitées en France comparativement à celles des Etats-Unis (où nombre de cavernes excèdent largement le million de m³ alors qu'une cavité de 500 000m³ est déjà considérée comme une grande caverne en France), on recommandera par transposition une **épaisseur minimale de la planche de sel de 25m**.

3.1.4 SYNTHESE ET RECOMMANDATION

Nous avons exposé précédemment quatre critères possibles pour l'exclusion du phénomène d'effondrement au droit d'une cavité saline de stockage :

- Un critère sur la profondeur (P) du toit de la cavité, basé sur le retour d'expérience :

Critère 1 : Exclusion du risque d'effondrement si $P > 700 \text{ m}$

- Un critère sur l'épaisseur E_p de la planche de sel, traduisant l'idée que la zone fracturée au toit de la cavité ne doit pas dépasser celle de la planche de sel. Ce critère intègre la profondeur P du toit de la cavité et le diamètre équivalent D_{eq} de la cavité considérée comme sphérique :

Critère 2 : Exclusion du risque d'effondrement si $E_p > E_{p_{crit}}^{(1)}$

avec $E_{p_{crit}}^{(1)} = 0,5 * D_{eq} * [\exp(0,000625 * P - 0,333) - 1]$

- Un critère sur l'épaisseur E_p de la planche de sel, exprimant le principe que la zone déconfinée au dessus de toute portée plate de largeur B ne doit pas dépasser l'épaisseur E_p de la planche de sel :

Critère 3 : Exclusion du risque d'effondrement si $E_p > E_{p_{crit}}^{(2)}$

avec $E_{p_{crit}}^{(2)} = B/3$

Ce critère permet d'intégrer la portée réelle de la cavité.

- Un critère sur l'épaisseur E_p de la planche de sel, qui exprime l'absence de risque au-delà d'une valeur absolue de l'épaisseur de la planche de sel, indépendamment de la profondeur, de la forme, des dimensions de la cavité et de la géologie des terrains de recouvrement:

Critère 4 : Exclusion du risque d'effondrement si $E_p > E_{p_{crit}}^{(3)} = 25\text{m}$

De manière conservative, nous proposons de formuler un critère qui ne délaisse aucune de ces approches et d'exclure du risque d'effondrement, pendant la phase d'exploitation, les cavités lessivées de stockage dans le sel :

- dont le toit est situé à une profondeur $P > 700\text{m}$
OU
- dont l'épaisseur de la planche de sel laissée au toit (E_p) satisfait à :

$$E_p > \max (E_{p_{\text{crit}}}^{(1)} ; E_{p_{\text{crit}}}^{(2)} ; E_{p_{\text{crit}}}^{(3)})$$

avec

$$E_{p_{\text{crit}}}^{(1)} = 0,5 * D_{\text{éq}} * [\exp (0,000625 * P - 0,333) - 1]$$

$$E_{p_{\text{crit}}}^{(2)} = B/3$$

$$E_{p_{\text{crit}}}^{(3)} = 25\text{m}$$

P : profondeur du toit de la cavité (en m)

$D_{\text{éq}}$: diamètre équivalent de la cavité considérée sphérique (en m)

B : largeur de la cavité en tout point de son profil (en m)

A notre connaissance, aucun site français ne présente actuellement un tel risque d'effondrement.

Dans les cas où, sur de futurs sites, ce critère ne serait pas respecté, l'exclusion du risque d'effondrement nécessitera que l'exploitant apporte des éléments complémentaires, propres au contexte géologique, à la forme réelle des cavités ou aux conditions opérationnelles d'exploitation, afin de justifier de l'impossibilité physique du phénomène d'effondrement.

3.2 RISQUE D'EFFONDREMENT D'UN RESEAU DE CAVITES

Au delà du risque d'effondrement lié à l'instabilité d'une seule cavité (§ 3.1), on se doit de considérer également le risque d'effondrement généralisé (ou « en masse ») de la surface du sol lié à la rupture d'un réseau de cavités.

Comme cela est pratiqué pour le dimensionnement des mines (y compris de sel^{3,4}), on admet en général que le risque d'effondrement d'un réseau de cavités existe en l'absence d'un noyau sain au cœur des piliers (massifs de sel non exploités situés entre les cavités). Si on exprime, comme dans le cas précédent (§ 3.1.2.1), la fracturation du sel à l'aide d'un formalisme en élastoplasticité (à distinguer d'une approche en viscoplasticité qui traite essentiellement du fluage du sel), on considère en général que l'on conserve un noyau sain au cœur des piliers tant que le taux de plastification effective de ces piliers ne dépasse pas 50%.

A partir d'hypothèses sécuritaires (cavités allongées, pression nulle du fluide aux parois, résistance à la compression uniaxiale mesurée du sel de 20 MPa), on peut exprimer le taux de défruitement critique τ_{critique} associé à la condition précédente sous la forme⁵ :

$$\tau_{\text{crit}} = 1 / [2 * \exp (0,00125 * P - 0,5) - 1] \quad (2)$$

où P est la profondeur du toit des cavités (en m).

Le calcul montre que le taux de défruitement critique est de 79%, 31% et 15% pour des profondeurs respectives de 500, 1000 et 1500m.

A notre connaissance, ces valeurs seuil de taux de défruitement ne sont atteintes dans aucun des stockages français, où le taux de défruitement maximum connu est de l'ordre de 10 %.

Notons d'autre part que la pression de fluide en cavités (ignorée de manière sécuritaire dans la présente approche) joue un rôle stabilisateur non négligeable.

¹ « Les formations de couverture au droit des zones d'aléa d'effondrement brutal - Rapport méthodologique ». Rapport GEODERIS, juillet 2004. Référencé R2004-002 et validé par un comité d'experts comprenant JP. JOSIEN, JP. PIGUET, G. VOUILLE, F. WOJTKOWIAK.

² A partir d'un calcul en élastoplasticité basé sur l'hypothèse d'une cavité sphérique avec un critère de Tresca, l'épaisseur critique de la planche de sel au toit de la cavité peut être estimée à partir de la relation suivante :

$$EP_{crit}/D_{eq} = 0,5 * [\exp ((\sigma_{lith}-P_{fluide})/(2\sigma_c) -1/3) -1]$$

Avec :

EP_{crit} : Epaisseur critique de la planche de sel au toit de cavité (m)

D_{eq} : Diamètre équivalent de la cavité (m)

σ_{lith} : contrainte lithostatique (0,025 fois la profondeur en mètres)

P_{fluide} : pression du fluide stocké (prise nulle, de manière sécuritaire)

σ_c : résistance à la compression uniaxiale du sel (prise égale à 20 MPa)

³ « La stabilité de la surface à l'aplomb des exploitations souterraines en mines métalliques ou assimilées. Piliers abandonnés ou ilots », Tincelin E. Revue de l'Industrie Minérale, supplément de février 1982.

⁴ « Calcul analytique approché de la stabilité des mines exploitées par chambres et piliers ». Tijani S.M., Supplément à la Revue de l'Industrie Minérale p109-111, février 1982.

⁵ A partir d'un calcul en élastoplasticité basé sur l'hypothèse d'une cavité cylindrique avec un critère de Tresca, le taux de défruitement critique s'exprime :

$$\tau_{critique} = 1 / [2 \exp ((\sigma_{lith}-P_{fluide})/\sigma_c -0,5) -1]$$

Avec :

σ_{lith} : contrainte lithostatique (0,025 fois la profondeur en mètres)

P_{fluide} : pression du fluide stocké (prise nulle, de manière sécuritaire)

σ_c : résistance à la compression uniaxiale du sel (prise égale à 20 MPa)

ANNEXE F : Éléments de modélisation

L'objet de cette Annexe n'est pas de préconiser un outil de modélisation mais plutôt d'indiquer les étapes clés de ce processus en s'appuyant sur des exemples. Dans tous les cas, pour la réalisation des calculs de distances d'effets, il convient d'utiliser des modèles robustes, ayant fait l'objet si possible d'une évaluation par des tiers, dont les domaines de validité sont en cohérence avec les cas étudiés.

Dans le cas particulier des stockages de gaz naturel, des travaux ont été conduits avec les outils employés par GDF-Suez (CRIGEN) et l'INERIS, respectivement Persée et Explojet, ainsi qu'avec la méthode multi-énergie pour la détermination des effets de surpression des UVCE. Ces travaux ont conduit à la réalisation d'abaques permettant de déterminer les distances d'effets génériques aux effets de surpression de scénarios accidentels susceptibles de se dérouler sur des sites de stockage de gaz naturel.

Ces travaux ne sont donc valables que pour le gaz naturel. Pour les autres produits l'exploitant devra proposer une méthode qu'il justifie.

Les scénarios étudiés portent sur des fuites de diamètres compris entre 12 et 900 mm à des pressions de rejet du gaz comprises entre 0 et 250 bar relatifs. Différents types de rejet sont distingués : le jet en champ libre, le jet impactant et le jet se développant dans un manifold ou dans une forêt.

Par ailleurs, des abaques permettant de déterminer les distances aux effets thermiques de feux torches ont été déterminées pour des fuites de diamètres 12 mm (rejet vertical), 25 et 50 mm (rejet horizontal).

Toutefois, des considérations de modélisation peuvent être adaptées aux études de dangers sur des d'autres installations de stockages. Ces considérations sont reprises pour information et synthèse dans les pages suivantes.

❖ Débits de jets

En ce qui concerne les débits de rejet il a été considéré que :

- pour les brèches d'un diamètre inférieur ou égal à 50 mm, le débit de rejet était constant,
- pour les brèches d'un diamètre supérieur, le débit de rejet était influencé par les pertes de charge et dans le cas d'une rupture guillotine la vidange de la partie aval de la canalisation était décroissante dans le temps.

❖ Indice multi-énergie retenus pour les jets libres

La dispersion se fait en champ libre en prenant en compte les effets de sol. Le volume inflammable est contenu dans un hémisphère inscrit dans le jet et dont le rayon est égal à la hauteur du nuage. Les effets de surpression sont calculés de la façon suivante :

- pour des rejets issus d'une brèche inférieure ou égale à 25 mm, et pour les brèches de 50 mm (avec une pression inférieure ou égale à 150 bar relatifs) ;
 - o soit la méthode multi-énergie est utilisée avec un indice compris entre 4 et 5 ;
 - o soit les modèles internes comme Persée (GDF-SUEZ), Explojet (INERIS), ou d'autres modèles basés sur des équations empiriques dont la confrontation à des données expérimentales disponibles donne un accord satisfaisant ;
- pour des rejets issus d'une brèche de 50 mm (pression comprise entre 150 et 250 bar relatifs), la méthode multi-énergie est utilisée avec un indice de 5.5 ;
- pour les rejets issus de ruptures guillottes, la méthode multi-énergie est utilisée avec un indice de 6.

Les distances d'effets sont ensuite calculées comme étant la somme de la distance entre le point de rejet et le centre du nuage inflammable, et de la distance aux effets de surpression, calculée à partir du centre du nuage inflammable.

❖ Type de phénomène dangereux en fonction du type de rejets

Sur les installations d'un stockage de gaz naturel, plusieurs types de rejets sont susceptibles d'être rencontrés :

- Rejet en champ libre (ou jet libre) Seules les sources positionnées dans la zone turbulente du nuage inflammable peuvent entraîner des effets de pression. Une inflammation à la périphérie du jet entraînera seulement des effets thermiques.
- Jet impactant L'écoulement dans la zone d'impact peut être fortement ralenti par l'obstacle et donc être moins turbulent. Dans ces conditions, l'inflammation du nuage engendre des effets de surpression.
- Jet dans un manifold ou dans une forêt L'écoulement peut être là aussi fortement ralenti ou empêché par les obstacles, l'inflammation du nuage engendre des effets de surpression.

❖ Conditions nécessaires pour un jet impactant

Pour être susceptible de conduire à un jet impactant, l'obstacle doit répondre aux 2 critères suivants :

- distance entre l'obstacle et la brèche inférieure à 10 % de la distance à la LIE,
- dimension de l'obstacle supérieure au diamètre du jet.

Pour traiter les cas particuliers d'explosion de jet impactant :

- une première approche consiste à multiplier par 2 les distances obtenues pour l'explosion du jet en champ libre,
- une autre approche consiste à multiplier par 10 la masse inflammable (quantité de produit comprise entre la LIE et LES) formée par le même jet en champs libre.

❖ **Détermination du volume inflammable dans le cas d'une explosion prenant siège dans un manifold**

La présence d'obstacles plus petits que le diamètre du jet perturbe l'écoulement, ajoutant de la turbulence à la turbulence déjà existante dans le jet. Pour calculer les effets de surpression en cas d'explosion du jet dans un manifold, deux méthodes peuvent être utilisées :

- Méthode 1 : le volume inflammable est égal au volume total du manifold. La concentration moyenne au sein de ce volume est considérée à la stoechiométrie. Les effets de surpression sont calculés avec la méthode multi-énergie à l'indice 5 (sites de stockages aquifères) ou 5.5 (sites de stockages salins). Le volume du manifold peut être calculé de manière forfaitaire en considérant l'emprise au sol du manifold et une hauteur moyenne. Pour définir les limites d'un manifold, il faut comparer la distance de séparation E entre deux équipements avec le diamètre caractéristique Do d'un équipement ; si $E > 10Do$ les équipements peuvent être considérés comme séparés (pour plus de détails, voir la suite de l'annexe) ;
- Méthode 2 : La dispersion du jet est supposée ne pas être affectée par les obstacles et se déroule en champ libre (en prenant en compte les effets de sol). Le volume inflammable est contenu dans un hémisphère inscrit dans le jet et dont le rayon est égal à la hauteur du nuage. Les effets de surpression sont obtenus en utilisant alors la méthode multi-énergie à un indice supérieur à celui du rejet en champ libre.

Ces deux méthodes donnent des distances du même ordre de grandeur quel que soit le site de stockage souterrain. Les distances sont à compter depuis le bord du manifold.

❖ **Détermination du volume inflammable d'une forêt**

Une forêt est définie forfaitairement comme plusieurs arbres agencés en au moins trois rangées d'une dizaine d'arbres chacune, ce qui revient à une surface au sol d'environ 100 m². En dessous de cette limite, le jet se développe en champ libre. Le volume inflammable correspond au volume du nuage présent dans la forêt. Les effets de surpression sont obtenus en utilisant la méthode multi-énergie (aux indices 4 ou 5 suivant les configurations).

❖ **Explosion d'un bâtiment**

Les effets de surpression dépendent de la nature du bâtiment. La méthode consistant à prendre le volume total du bâtiment avec un indice 6 de la méthode multi-énergie est prudente. De façon plus fine, pour modéliser les explosions de gaz en bâtiment, dans le cas d'un nuage au repos (remplissage par l'extérieur ou fuite diffuse), l'INERIS considère 3 cas :

- les structures légères : les effets de surpression sont modélisés à partir du volume du bâtiment et de la méthode multi-énergie indice 4,
- les structures mixtes (murs bétons, largement éventés) : les effets de surpressions sont modélisés à partir du volume du bâtiment et de la méthode multi-énergie indice 5,
- les structures bétons : les effets de surpressions sont modélisés à partir du volume du bâtiment et de la méthode multi-énergie indice 6.

Pour des jets à l'intérieur des bâtiments (process gaz à haute pression), la prise en compte du niveau élevé de turbulence initial conduit à retenir l'indice retenu pour le jet considéré (méthode multi-énergie avec indice du jet), ce qui mène à des effets de surpression dont les distances sont multipliées par un facteur 2 voire 3 par rapport à celles obtenues pour un nuage au repos.

Dans l'absolu, l'explosion des bâtiments se traite donc plutôt au cas par cas avec des outils spécifiques.

❖ **Caves en point bas :**

L'explosion du volume de la cave peu être modélisé avec la méthode multi-énergie et un indice 5.

Pour l'explosion de jet, la prise en compte des effets de surpression liés au jet de 12 mm impactant est adaptée.

Pour les effets thermiques en cas de feu torche dans la cave, une orientation du jet à 45 ° est acceptable.

❖ **Rejets horizontal suite à éjection du train de tige lors d'une reprise de puits (workover) :**

Il peu être supposé l'absence de jet impactant en cas de rejet horizontal de gaz (DN 80 à 100) sur une plate-forme de forage suite à éjection du train de tige lors d'une reprise de puits. En effet, les bungalows présents sur la plate-forme ne résisteraient pas à un tel rejet et ne sont pas susceptibles de constituer des obstacles conduisant à un jet impactant. Les effets de l'explosion du jet peuvent être calculés en champs libre.

Pour plus de détails, le lecteur pourra consulter le rapport suivant relatif aux travaux conduits et les abaques de détermination de distances d'effets de surpression et des abaques de détermination de distances d'effets thermiques dues aux jets enflammés (publiés avec l'aimable autorisation de STORENGY).

Abaques des distances d'effets thermiques dues aux jets enflammés

Trois diamètres de fuites ont été pris en compte :

- 12 mm,
- 25 mm,
- et 50 mm.

Pour chacun de ces trois diamètres, les distances d'effets des différents phénomènes dangereux sont calculées en fonction de la pression. Les résultats sont présentés sous la forme d'abaques, qui sont des courbes de tendances tracées à partir d'une interpolation des distances calculées pour quelques scénarios.

❖ Hypothèses générales retenues pour les calculs

Les principales hypothèses qui ont été retenues par l'INERIS pour les calculs sont les suivantes :

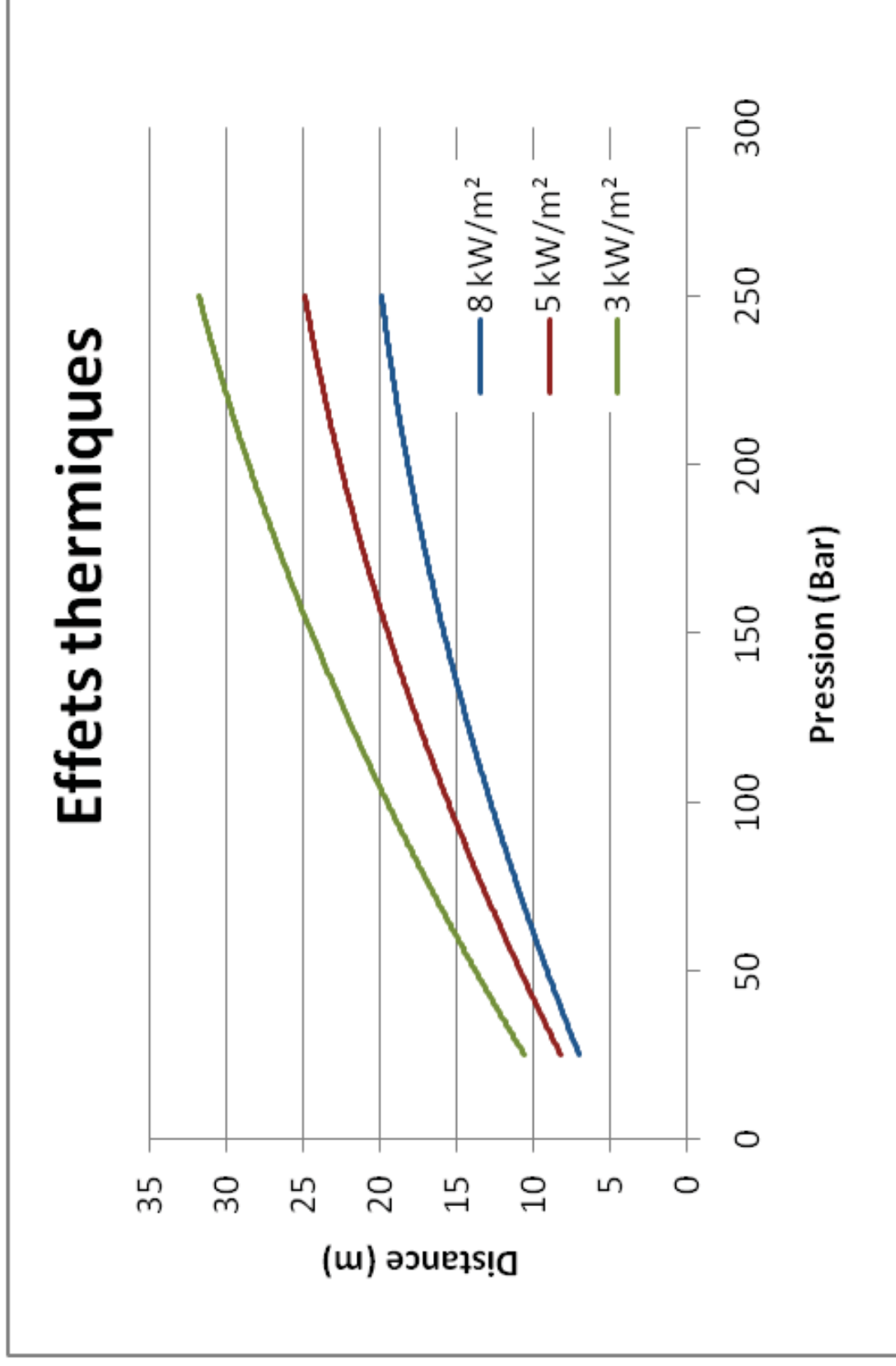
- Pour la fuite de 12 mm le rejet est vertical, alors que pour celles de 25 mm et 50 mm, le rejet est horizontal.
- Les débits sont calculés à partir de l'hypothèse que le diamètre de la fuite est faible devant le diamètre de la canalisation ce qui revient à considérer une fuite en ras de paroi sur un réservoir de grande dimension. Le débit est ainsi considéré constant, et de durée illimitée (la quantité de gaz disponible est infinie).
- Les pressions considérées varient de 25 à 250 bar balayant ainsi les configurations rencontrées sur les sites des stockages souterrains de gaz naturel.
- La dispersion du nuage se fait dans l'air atmosphérique frais (concentration nulle dans l'environnement du produit dont la dispersion est étudiée). Cette condition n'est jamais strictement remplie dans une installation ou un site encombré, compte tenu des effets aérodynamiques autour des obstacles (re-circulations...).
- Le terrain est considéré comme plat, de rugosité uniforme et non encombré d'obstacles (jet non impactant). La source d'émission est fixe dans l'espace.
- Pour déterminer les distances d'effets, les seuils des effets thermiques suivants ont été utilisés :
 - seuil des effets irréversibles, SEI : 3 kW/m^2
 - seuil des premiers effets létaux SEL : 5 kW/m^2
 - seuil des effets létaux significatifs SELS : 8 kW/m^2

- Les calculs de jets enflammés ont été réalisés avec le logiciel Phast selon une condition météorologique suivant la classification de Pasquill. C'est une méthode indirecte qui permet de représenter la stabilité atmosphérique en fonction des valeurs de la vitesse du vent, du rayonnement solaire et de la nébulosité. La classification de Pasquill varie de A à F, de l'atmosphère la plus instable à la plus stable. La condition météorologique retenue (D5) dans le cadre de cette étude correspond à des conditions de stabilité neutre, conditions fréquemment rencontrées au cours d'une journée :

Stabilité atmosphérique	-	D
Vitesse du vent	[m/s]	5
T° ambiante	[°C]	20
T° du sol	[°C]	20
Humidité relative	[%]	70
Rayonnement solaire	[kW/m2]	0,5

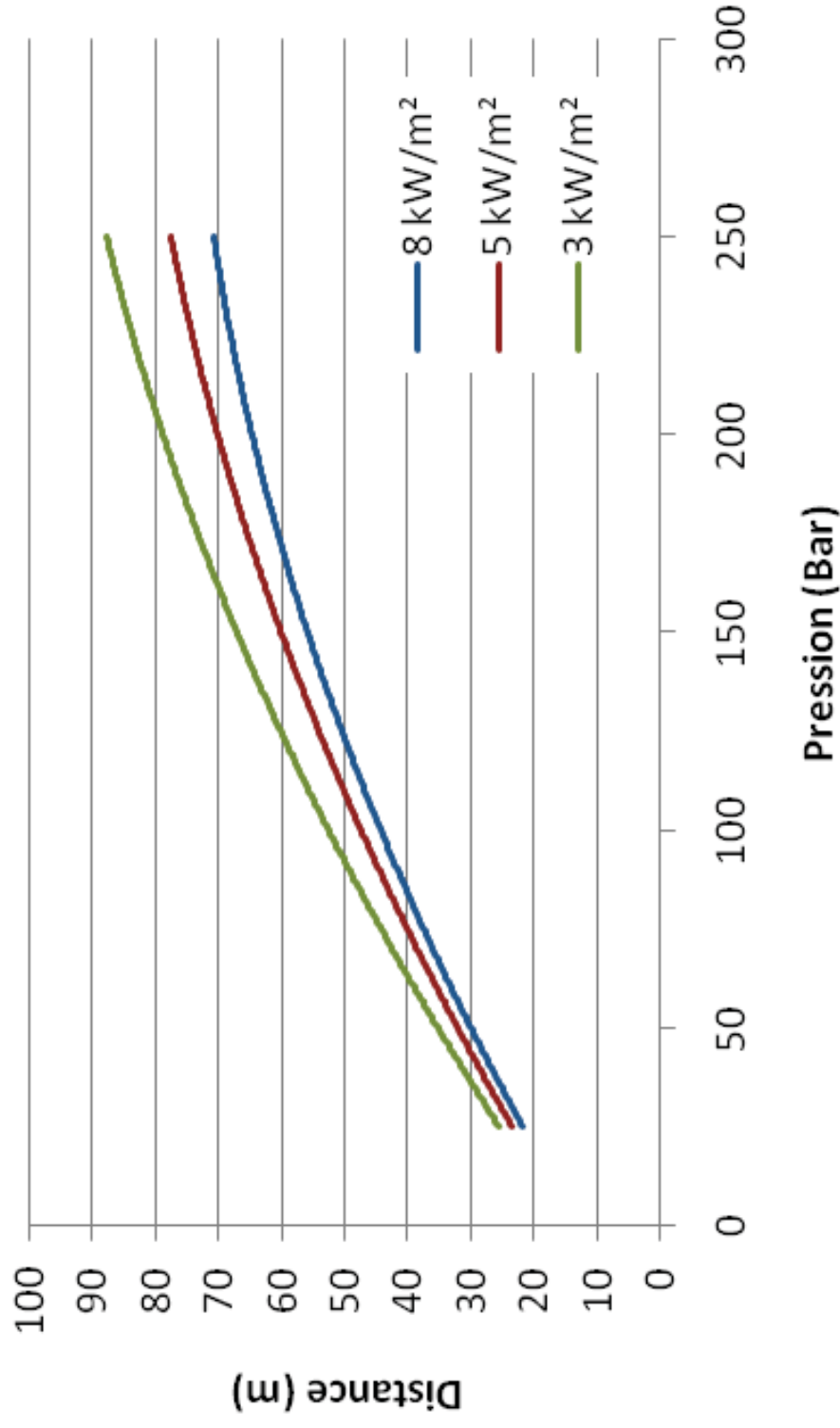
Tableau 18 : Condition météorologique

Diamètre de fuite : 12 mm, rejet vertical

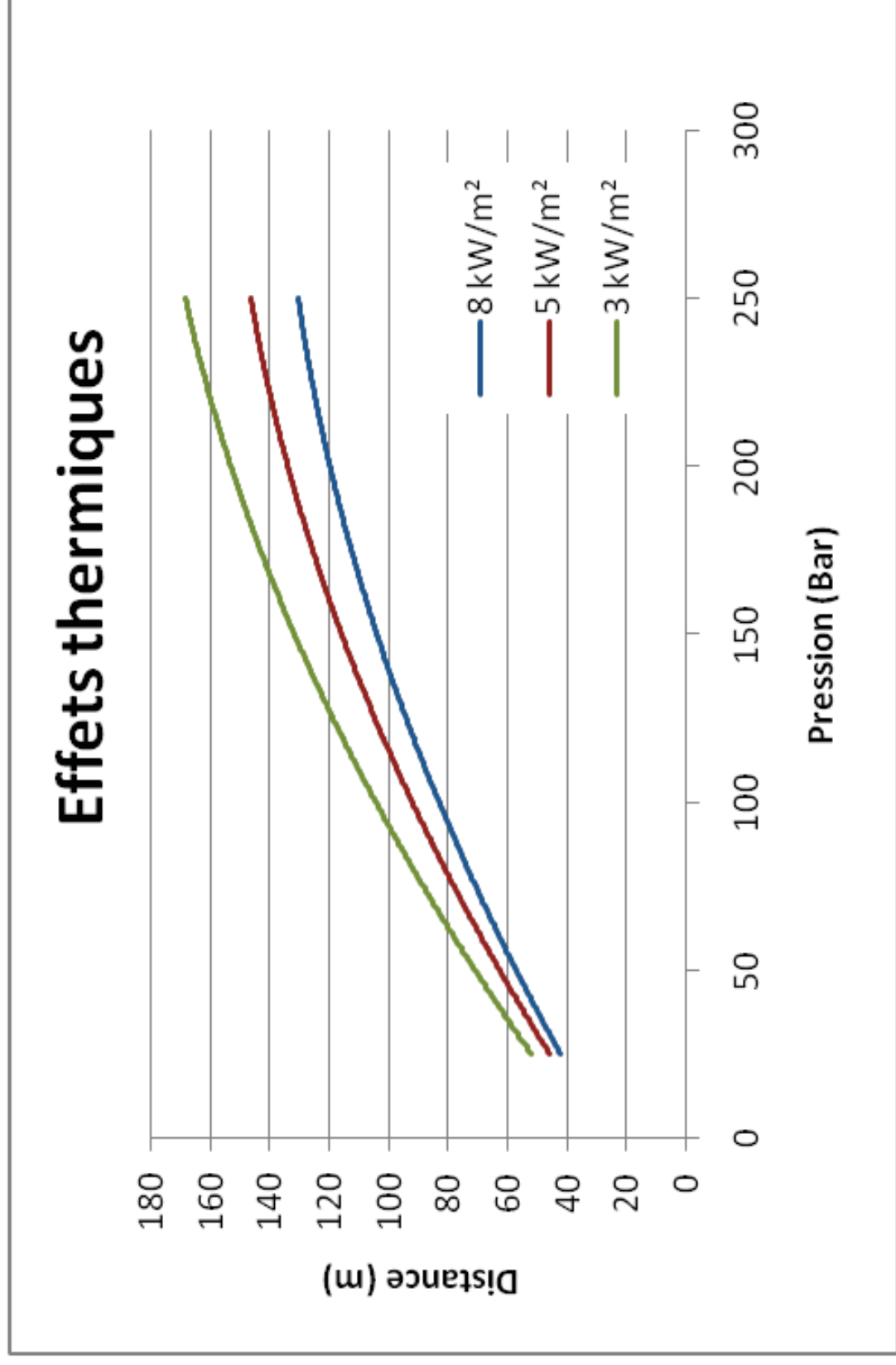


Diamètre de fuite : 25 mm, rejet horizontal

Effets thermiques



Diamètre de fuite : 50 mm, rejet horizontal



RAPPORT D'ÉTUDE

15/03/2011

INERIS- DRA-11-118138-03386A

Modélisation des jets horizontaux de gaz naturel : application aux sites de stockages souterrains.

Description du phénomène physique

Modélisation des jets horizontaux de gaz naturel : application aux sites de stockages souterrains.

Description du phénomène physique

Verneuil-en-Halatte

Client : B3S

Liste des personnes ayant participé à l'étude : J. Hébrard, J. Daubech,

PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	J. HEBRARD	R. BOUET	B. PIQUETTE
Qualité	Ingénieur Direction des Risques Accidentels	Responsable de l'unité EDIS Direction des Risques Accidentels	Directeur adjoint Direction des Risques Accidentels
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

1	CONTEXTE	5
2	REJET DE GAZ NATUREL A HAUTE PRESSION	6
2.1	Terme source : rejet à la brèche	6
2.2	Dispersion du jet	6
2.2.1	La zone d'expansion : définition du diamètre d'expansion.....	7
2.2.2	Caractéristiques du jet	8
2.2.3	Effet de l'environnement sur la dispersion	8
2.3	Explosion de jet.....	12
2.4	Explosion de jet se développant dans un manifold	18
2.4.1	Détermination du volume inflammable.....	18
2.4.2	Développement de la flamme	19
2.4.2.1	La déformation de la flamme par contournement des obstacles	20
2.4.2.2	Le sillage des obstacles	22
2.4.3	Application aux manifolds et aux forêts	23
3	CONCLUSIONS	25
4	ANNEXES.....	27
	ANNEXE A.....	29
	Description du modèle EXPLOJET	29
	ANNEXE B.....	35

1 CONTEXTE

Pour faciliter le traitement des dossiers concernant les PPRT des stockages souterrains de gaz naturel, un travail commun entre le B3S et le BRTICP a été réalisé au début de l'été 2009 avec l'appui de l'INERIS, qui s'est traduit par l'élaboration de la circulaire du 15 septembre 2009 sur les règles méthodologiques relatives aux études de dangers, à l'acceptabilité de la démarche des risques et aux PPRT des stockages souterrains de gaz naturel. En décembre 2010, l'INERIS a présenté des abaques de distances d'effets permettant de préciser et donner une aide à l'application des règles et méthodes de modélisations énoncées dans la circulaire.

Ce rapport présente une description physique des rejets de gaz naturel à haute pression. Ce rapport sera annexé au "Guide de bonnes pratiques sur les études de dangers des stockages souterrains" rédigé par l'INERIS.

La description du contexte de ce rapport a été modifiée pour des besoins de parution publique et toute mention à des références privées a été supprimée.

¹ Rapport du 2 décembre 2010 intitulé « Distances d'effets génériques de scénarios accidentels impliquant des équipements de gaz naturel sur des sites de stockages souterrains ».

2 REJET DE GAZ NATUREL A HAUTE PRESSION

Lors d'un rejet de gaz naturel à haute pression, l'inflammation du nuage inflammable formé peut engendrer des effets thermiques et de surpression. L'examen des conséquences des explosions de gaz requiert la détermination des caractéristiques du nuage explosif (taille, forme, turbulence, répartition des espèces...).

Le rejet se disperse par une brèche dans l'environnement et forme un nuage (ou panache) explosif dont la forme, la taille et la richesse dépendent de la géométrie des lieux (parois, obstacles) mais aussi de la dynamique propre de l'atmosphère environnante (convection naturelle ou turbulence induite par la fuite). Une source énergétique (étincelle, point chaud, flamme nue) située dans ce nuage pourra engendrer des flammes qui, en se propageant, pourront être source de surpression.

2.1 TERME SOURCE : REJET A LA BRECHE

Le calcul du terme source permet de quantifier précisément les caractéristiques l'écoulement de gaz naturel à travers l'orifice de décharge (brèche). Il dépend notamment de la quantité de gaz disponible, de la taille, de la forme et des dimensions de la brèche.

Par soucis de simplification, et afin de maximiser le débit massique, les brèches sont considérées de forme circulaire.

D'une manière générale, le débit massique varie dans le temps au cours du rejet. Cependant, dans le cas où la brèche est située sur un réservoir de grande dimension, le débit sera considéré constant, calculé à partir de la pression maximale de service et en prenant en compte un coefficient de décharge forfaitaire compris entre 0.8 et 1.

Le calcul de débit variable ne concernera que les brèches formées sur une canalisation ou une tuyauterie et dont la surface est supérieure à 20% de la surface de la canalisation (si la surface de brèche est inférieure à 20% de la surface de la canalisation, la variation du débit en fonction du temps est faible et est donc négligée).

Le phénomène d'explosion est un phénomène rapide (quelques secondes) et les effets dus à l'explosion sont maximaux lorsque le jet est pleinement développé, c'est-à-dire en quelques secondes. Le débit variable est donc moyenné sur les premières secondes afin de simplifier le calcul de dispersion du jet après la brèche.

2.2 DISPERSION DU JET

Le gaz déchargé par la brèche se mélange avec l'air ambiant et forme un nuage inflammable dont les principales caractéristiques sont :

- la distance à la LIE (Limite Inférieure d'Explosivité). Cette distance est définie comme étant la distance sur l'axe à partir de laquelle la concentration de gaz inflammable tombe en deçà de sa LIE.
- le volume explosible, ou volume inflammable, correspondant au volume du mélange gazeux pour lequel la concentration en gaz inflammable est comprise entre la LIE et la LSE (Limite Supérieure d'Explosivité).
- Le niveau de turbulence dans le nuage, c'est-à-dire l'échelle des tourbillons formés lors du rejet.

2.2.1 LA ZONE D'EXPANSION : DEFINITION DU DIAMETRE D'EXPANSION

La figure 1 suivante illustre les phénomènes en aval du point de rejet.

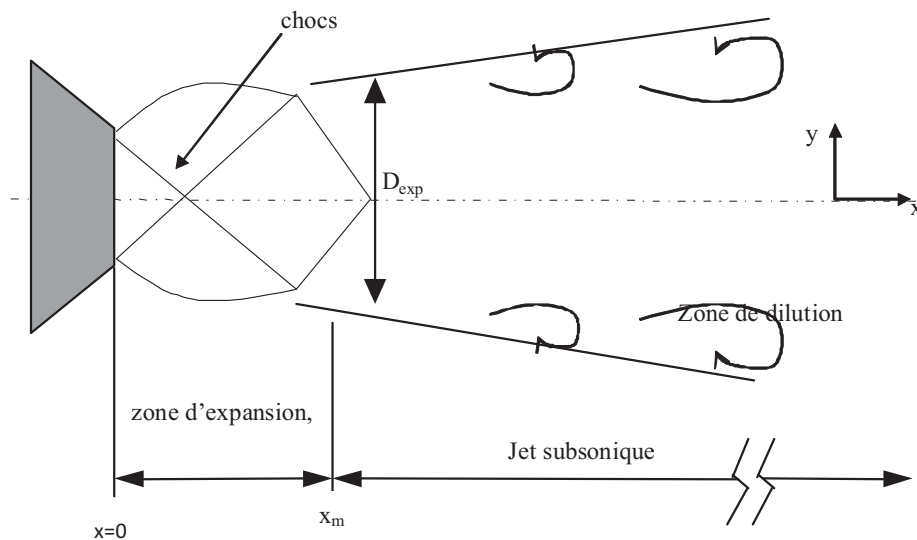


Figure 1 : Représentation simplifiée d'un jet supersonique

Lorsque la pression dans le réservoir atteint ou dépasse une valeur critique P_{crit} (pression à partir de laquelle l'écoulement atteint la vitesse du son à l'orifice, soit environ 2 bar absolus pour le méthane), l'éjection des gaz vers l'extérieur entraîne une expansion brutale permettant de faire baisser la pression du jet jusqu'à la pression atmosphérique. Cette détente s'accompagne nécessairement d'une accélération du jet qui devient alors supersonique. Dans cette zone dite d'expansion, une succession de phénomènes discontinus ou « chocs » se produit permettant ainsi à l'écoulement compressible supersonique de se retrouver dans un état différent de celui qu'il possédait avant les chocs. Dans cette zone, une onde de choc droite donne lieu à un choc fort qui est appelé aussi disque de Mach. Il n'y a pas de dilution possible dans cette zone d'expansion car le mélange entre couches fluides n'est possible que si leurs vitesses respectives restent inférieures aux vitesses du son dans ces deux milieux. Il en résulte que le mélange entre les deux fluides, n'est possible qu'à partir du point repéré par x_m sur la figure où ;

- la pression dans l'écoulement est égale à la pression atmosphérique,
- et où la vitesse de l'écoulement est égale à la célérité locale du son.

Le diamètre de la zone en x_m est appelé diamètre d'expansion D_{exp} . Au-delà de x_m , une structure de jet peut apparaître dont les propriétés sont fonction des conditions en x_m , et particulièrement de D_{exp} .

2.2.2 CARACTERISTIQUES DU JET

Au-delà de l'abscisse x_m , le mélange du méthane dans l'atmosphère par entraînement d'air entraîne une décroissance de la concentration du gaz inflammable dans le jet. La dilution du gaz déchargé se fait aux extrémités du jet et la concentration initiale décroît de l'orifice vers l'extrémité du jet. La turbulence et les frottements aux extrémités du jet sont les principaux moteurs de mélange entre le gaz rejeté et le gaz ambiant.

Le schéma de la figure 2 présente la forme de la zone d'inflammabilité lorsque l'écoulement n'est pas influencé par l'environnement (vent, obstacles...). Il s'agit d'un ellipsoïde de révolution allongé suivant l'axe du jet (cet axe est défini comme étant la direction perpendiculaire au plan de l'orifice de décharge). L'écoulement dans le jet est fortement turbulent et marqué par la présence de tourbillons dont la taille peut atteindre 10% de la distance à la LIE, et animés d'une vitesse importante. A mesure que l'on s'éloigne de l'orifice, la turbulence se dissipe et la vitesse de l'écoulement diminue fortement.

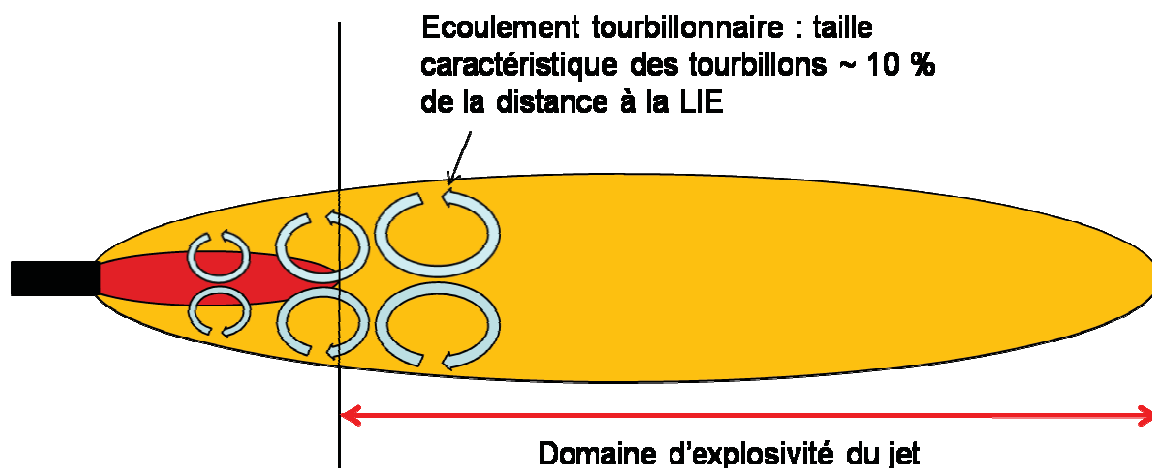


Figure 2 : Champs de concentration du jet

Qualitativement, le champ de concentration est caractérisé par le fait que :

- la concentration du gaz en un point pris sur l'axe est d'autant plus faible que le point s'éloigne de l'orifice de décharge,
- la concentration du gaz en un point pris dans un plan perpendiculaire à l'axe, est maximale sur l'axe et d'autant plus faible à mesure que le point s'éloigne de l'axe.

2.2.3 EFFET DE L'ENVIRONNEMENT SUR LA DISPERSION

Dans les paragraphes précédents, le jet était considéré totalement libre, et la forme du panache n'était influencée ni par le vent, ni par les obstacles, ni par le sol. Il était alors possible d'assimiler la géométrie du panache à une ellipse comme sur la figure 3. Cependant, d'autres paramètres influençant la dispersion sont pris en compte dans le calcul dont:

- Le vent qui est considéré dans le sens du rejet afin de maximiser la longueur du panache.
- Les différents obstacles que l'on peut trouver sur un site de stockage souterrain de gaz naturel et qui peuvent être des manifolds, des forêts, des bâtiments ou encore le sol.

Trois configurations sont envisagées :

1. Le rejet se développe en champ libre
2. Le rejet est impactant
3. Le rejet se développe dans un manifold ou dans une forêt

Rejet en champ libre

On considère que le rejet se développe en champ libre s'il n'y a pas d'obstacles dans le panache du jet. Dans le cas des rejets horizontaux, il se peut que les panaches soient suffisamment larges pour toucher le sol. Le mélange est alors fortement diminué au niveau du sol ce qui se traduit par une augmentation de la distance à la LIE dans l'axe du jet. Cet effet est illustré sur l'exemple d'une brèche de 50 mm de diamètre avec une pression de 150 bar sur les deux figures suivantes. Sur la figure 3, le rejet est suffisamment haut pour que le panache ne touche pas le sol au niveau de la LIE, alors que sur la figure 4, le contour du panache délimité par la LIE est « déformé par le sol ». Cette influence du sol sur la dispersion est appelée « effet de sol » et est pris en compte dans les modélisations.

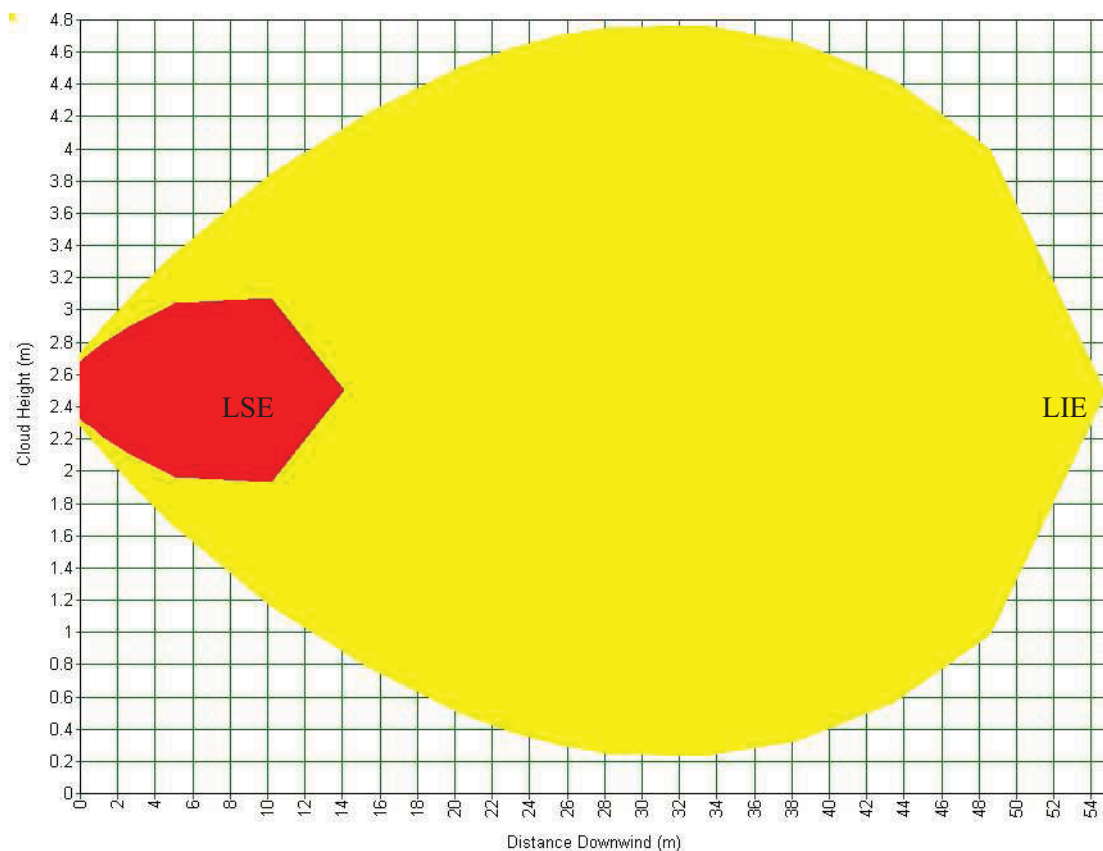


Figure 3 : Exemple de rejet en champ libre avec peu d'effet de sol (brèche de 50mm, pression 150 bar).

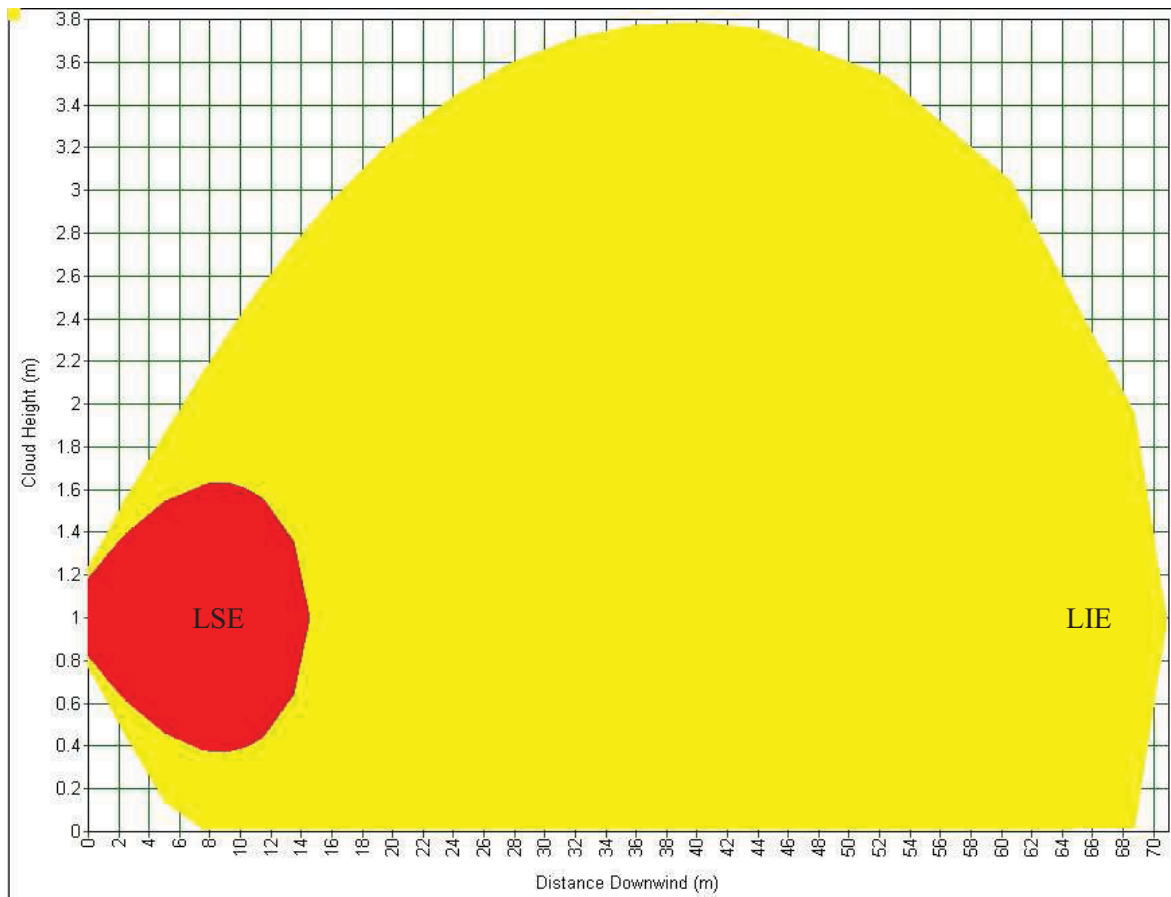


Figure 4: Exemple de rejet en champ libre avec important effet de sol (brèche de 50mm, pression 150 bar).

Dans cet exemple, il y a une augmentation de la distance à la LIE de 50% en considérant que le rejet s'effectue plus près du sol. Cette augmentation peut être supérieure dans certaines configurations.

Rejet impactant

Lors des essais EMERGE², deux configurations (figure 5) de rejet impactant le sol ont été étudiées :



Figure 5 : Dispositif expérimental des essais EMERGE

² Essais EMERGE (Extended Modelling and Experimental Research into Gas Explosions)

Chaineaux J. Schumann St. (1995) *Experimental study of explosions generated from massive release of a flammable gas, as a high momentum jet, for different conditions (free or obstructed, steady or transient, jet of CH₄, C₃H₈ or H₂)*. Proceedings of the 8 th International Loss Prevention Symposium, pp 333-348, Antwerp, Belgium.

- Impact vertical au sol : le volume inflammable formé est de 1 à 10 fois supérieur au volume du jet libre
- Impact vertical au sol dans une « cuvette de recirculation » : le volume inflammable formé est de 1 à 15 fois supérieur au volume du jet libre,

Dans les deux cas ce volume inflammable est observé expérimentalement pour des jets impactant à une distance égale à environ 10 % de la distance à la LIE. C'est pourquoi nous considérons que si un obstacle est situé à environ 10% de la distance à la LIE, et si cet obstacle a une dimension caractéristique suffisante (au moins aussi grand que le diamètre du jet), le jet est alors considéré comme impactant.

Rejet se développant dans un manifold ou en direction d'une forêt

Au vu des configurations rencontrées sur les stockages souterrains de gaz naturel, dans le cas d'un rejet qui se développe dans un manifold ou en direction d'une forêt, la dispersion du nuage est calculée de façon identique au rejet en champ libre. Pour le calcul des effets en cas d'explosion, les obstacles vont entraîner des modifications de la propagation des flammes dans le nuage et seront donc seulement pris en compte dans le calcul des effets de surpressions.

2.3 EXPLOSION DE JET

Inflammation

Si une source d'inflammation est présente dans la partie inflammable du jet (couleur jaune sur la figure 1) la flamme aura dans un premier temps une croissance sphérique laminaire (figure 2b), c'est-à-dire qu'elle ne sera pas influencée par la turbulence à l'intérieur du jet. Dans le même temps, la flamme est transportée par l'écoulement à une vitesse qui peut atteindre plusieurs dizaines de m/s (figure 2c).

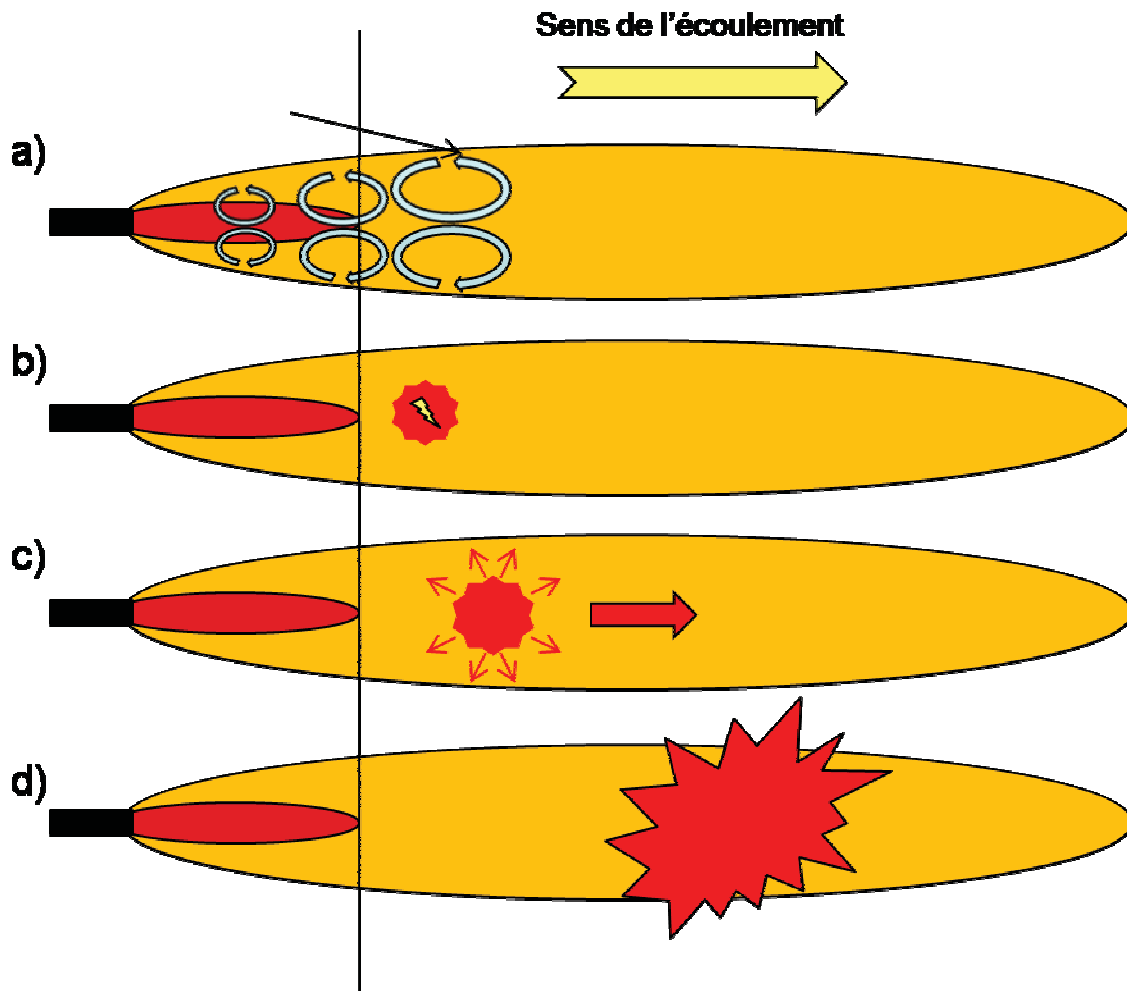


Figure 6 : Développement de la flamme dans le jet

Dès que la flamme atteint la taille caractéristique des tourbillons, elle peut devenir turbulente, s'accélérer rapidement et amener à l'explosion.

Pour qu'une explosion soit possible, il est donc nécessaire que la source d'inflammation soit placée au cœur du nuage et soit suffisamment puissante pour induire un développement rapide de la flamme afin que le « noyau » initial de flamme ne soit pas chassé de la zone inflammable avant l'embrassement du jet.

Ce point est confirmé expérimentalement (programme MERGE³ : déclenchement d'un UVCE d'un jet de méthane grâce à un jet enflammé placé au centre). Cette source peut être par exemple :

- Un corps massif (de plusieurs dizaines de cm) chauffé à plus de 900°C,
- Un feu d'un véhicule ($T > 800^{\circ}\text{C}$),
- Une explosion venant d'une autre installation,
- Un jet enflammé.

Des vitesses de flamme très élevées (de l'ordre de 100 m/s, soit un indice d'explosion de 5 de la méthode Multi-energy) ont été observées en dépit de la

³ Mercx W.P.M.(1993) Modelling and experimental research into gas explosions, Overall Final report of the MERGE project, CEC contract : STEP - CT - 0111 (SSMA)

taille modeste des jets (diamètre de rejet de 100 mm sous une dizaine de bar) ce qui laisse augurer d'explosions plus violentes (des vitesses de flamme plus élevées) encore pour des conditions de fuite plus sévères (pressions plus élevées, diamètres de rejets plus grands...) produisant davantage de turbulence.

Phénoménologie et modélisation

Le phénomène d'explosion comporte 4 étapes (schématisée figure 6) :

- L'inflammation qui doit se produire à l'intérieur du jet dans une zone où la concentration est comprise entre les limites inférieure et supérieure d'explosivité pour qu'une explosion soit possible (étape 1) ;
- La propagation sphérique (étape 2) vers l'extérieur du panache de la flamme. La vitesse de propagation de la flamme (c'est-à-dire la vitesse d'expansion de la «boule de feu») est fonction de la concentration locale et de la turbulence sur le trajet de la flamme. C'est la dilatation rapide des produits de combustion qui est responsable de la production des ondes de pression qui se propagent ensuite dans l'environnement ;
- Lorsque la boule de feu atteint la limite de la zone inflammable du jet, le phénomène d'expansion radial s'achève et la production d'onde de pression s'arrête. La taille maximale de la boule de feu est du même ordre de grandeur que le diamètre maximal de jet. Deux fronts continuent à se propager vers les extrémités axiales du jet, jusqu'à ce qu'un feu torche se crée et se stabilise (étapes 3 et 4).

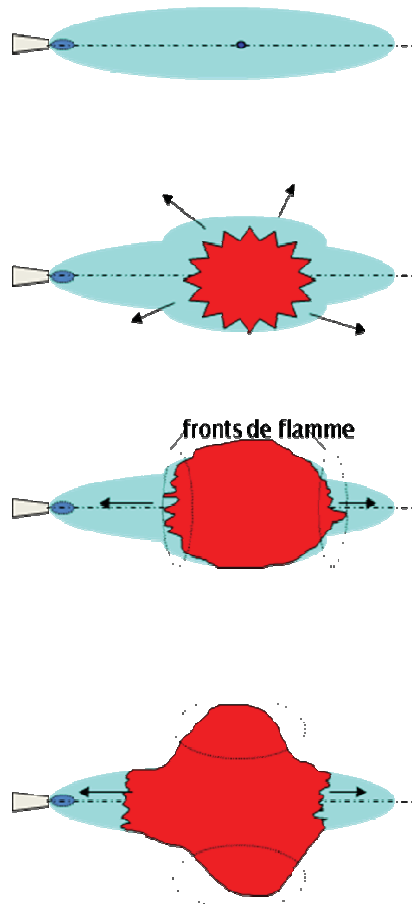


Figure 6 : Déroulement d'une explosion de jet

Les étapes essentielles de la modélisation consistent à calculer les dimensions et la structure interne de la zone inflammable du jet, dont notamment le champ de turbulence, puis la vitesse de propagation de la flamme à l'intérieur de ce panache et enfin le mécanisme de production de l'onde de pression.

A ce jour, il n'existe pas de théories générales décrivant l'interaction de la combustion avec la turbulence⁴. A défaut, on a recours à des corrélations d'ingénieur, faisant appel à des groupements adimensionnels, dont la forme correspond plus ou moins à des considérations théoriques. L'option généralement retenue est que la vitesse (intensité de la turbulence u') et la taille (L_t) des mouvements turbulents sont bien moindres que celle de la combustion si bien qu'on admet que l'effet des « tourbillons » est de plisser, d'enrouler un front de combustion localement caractérisé par sa vitesse fondamentale de combustion ($Slad$) et son épaisseur ($h/Slad$, cf. ci-après). A part ce relatif consensus, il existe un grand nombre de corrélations qui sont basées sur une gamme restreinte de conditions, très généralement à l'échelle du laboratoire.

Parmi les plus connues, on peut citer :

La corrélation de Bray⁵ (modèle PERSEE de GDFSUEZ)

$$St = 1,8 \times Slad^{0,784} \times u'^{0,412} \times Lt^{0,196} \times \eta^{-0,196}$$

La corrélation de Gülder⁶ (modèle EXPLOJET de l'INERIS – Annexe A)

$$St = 0,65 \times Slad^{0,5} \times u'^{0,75} \times Lt^{0,25} \times \eta^{-0,25}$$

Où

- St est la vitesse de combustion turbulente (m.s-1)
- $Slad$ est la vitesse laminaire de combustion (m.s-1)
- u' est l'intensité de turbulence (m.s-1)
- L_t est la taille caractéristique des structures tourbillonnaires (m)
- η est la viscosité cinématique (Pa.s)

On constate que ces corrélations, bien que s'appuyant sur des expériences, sont très différentes, si bien que l'extrapolation de l'une et de l'autre bien au-delà de leurs conditions d'établissement pourraient donner des résultats très différents. Le seul point commun à ces deux modèles, mais également commun aux autres corrélations est leur dépendance à la taille caractéristique des structures tourbillonnaires avec une puissance comprise entre 0,2 et 0,3.

Dans les situations qui nous intéressent, il existe peu de données relatives à la combustion turbulente⁷ si bien qu'on ne dispose pas d'éléments permettant de choisir une relation plutôt qu'une autre.

⁴ Williams F.A. (1985), « Combustion theory : 2nd edition », Benjamin/Cummings publishing company Inc., Amsterdam, ISBN 0-8053-9801-5

⁵ Bray, K.N.C. (1990), « Studies of turbulent burning velocity », Proc. Roy. Soc. London, Vol. A431, pp. 315-325.

⁶ Gülder O.L., G. J. Smallwood (1995), « Inner cutoff scale of flame surface wrinkling in turbulent premixed flames », Combustion and Flame, vol. 103, pp. 107-114.

⁷ Les échelles de turbulence, L_t , étudiées en laboratoire sont de un à deux ordres de grandeur plus petites que dans les jets, et les vitesses tourbillonnaires sont souvent plus petites aussi, parfois d'un ordre de grandeur

Par ailleurs, il existe également peu de données relatives au suivi de la combustion dans un jet, et celles disponibles⁸, ont été obtenues avec des jets relativement petits, c'est-à-dire dont le « diamètre d'expansion » du jet est inférieur à 300 mm. Le « diamètre d'expansion » du jet libre est un paramètre physique de dispersion calculé à partir de la pression de rejet et du diamètre physique de la brèche. Ce paramètre conditionne la formation du nuage si bien que deux jets de diamètres de brèche et de pressions différents ayant le même diamètre d'expansion sont identiques au plan de la répartition des espèces. Pour quelques diamètres de brèche inférieurs ou égaux à 70 mm, le diamètre d'expansion en fonction de la pression est donné sur la figure 7.

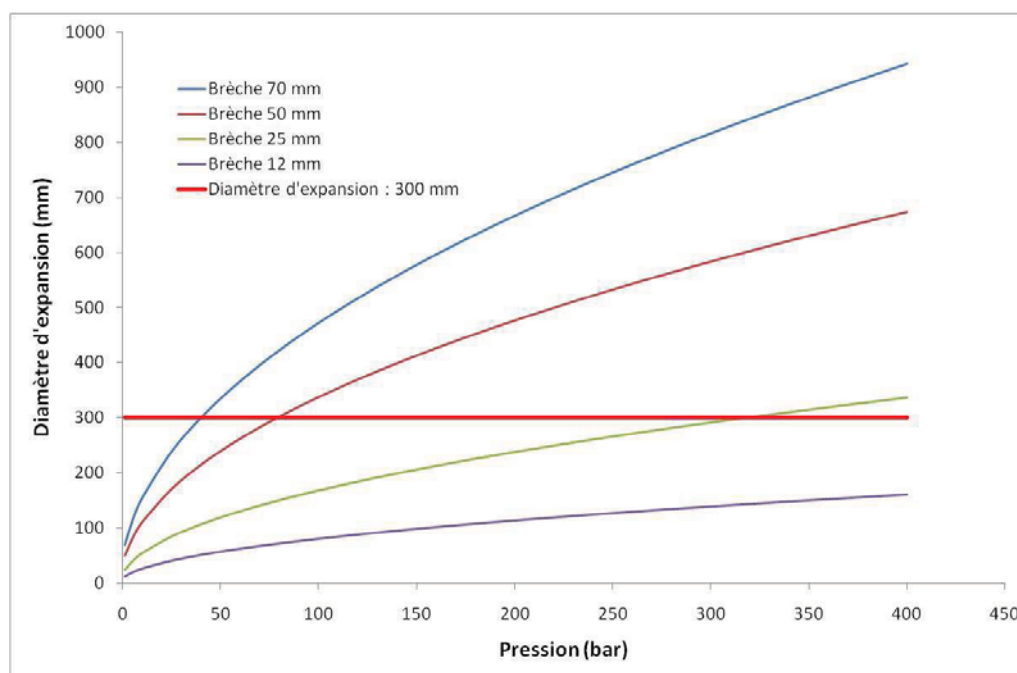


Figure 7 : Abaques diamètre d'expansion en fonction de la pression.

L'information essentielle que l'on retire de ces mesures est que les modèles de combustion précédents ne peuvent être appliqués sans précautions car la flamme ne se propage pas dans un milieu turbulent homogène comme en laboratoire et cette différence aurait une incidence importante qu'il est encore difficile de quantifier.

L'INERIS a tenté de lever cette difficulté en constatant que toutes les corrélations d'ingénieurs permettant de calculer la vitesse de flamme turbulente, comme celles cités précédemment, dépendent de la taille caractéristique des structures

⁸ Chaîneaux J. (1993), « Rapport final du projet MERGE », Rapport INERIS.

tourbillonnaires avec une puissance comprise entre 0,2 et 0,3. Ainsi, on peut généraliser ces corrélations sous la forme⁹ :

$$S_t = \alpha ([Lt]^{0,2 - 0,3})$$

Où

α est une constante

La taille des structures tourbillonnaires est proportionnelle au « diamètre d'expansion » D_{exp} .

La vitesse spatiale de flamme V_f est le produit du taux d'expansion des produits de combustion E et de la vitesse de flamme turbulente St .

La surpression maximale d'explosion est :

$$P_{max} = 3/2 \rho V_f^2$$

Où

ρ est la masse volumique de l'air (kg/m³)

On obtient de manière générale :

$$P_{max} = C_{ste} \times D_{exp}^{0,5}$$

Sur la base des résultats des simulations d'EXPLOJET de l'INERIS et des résultats expérimentaux disponibles d'explosion de jet, on peut déterminer la courbe surpression maximale d'explosion P_{max} en fonction du diamètre d'expansion D_{exp} (figure 8) et tenter une extrapolation des surpressions d'explosion aux diamètres d'expansion du jet supérieurs à 300 mm.

⁹ Lorsque l'inflammation du jet se produit au cœur du jet au environ de la demi LIE

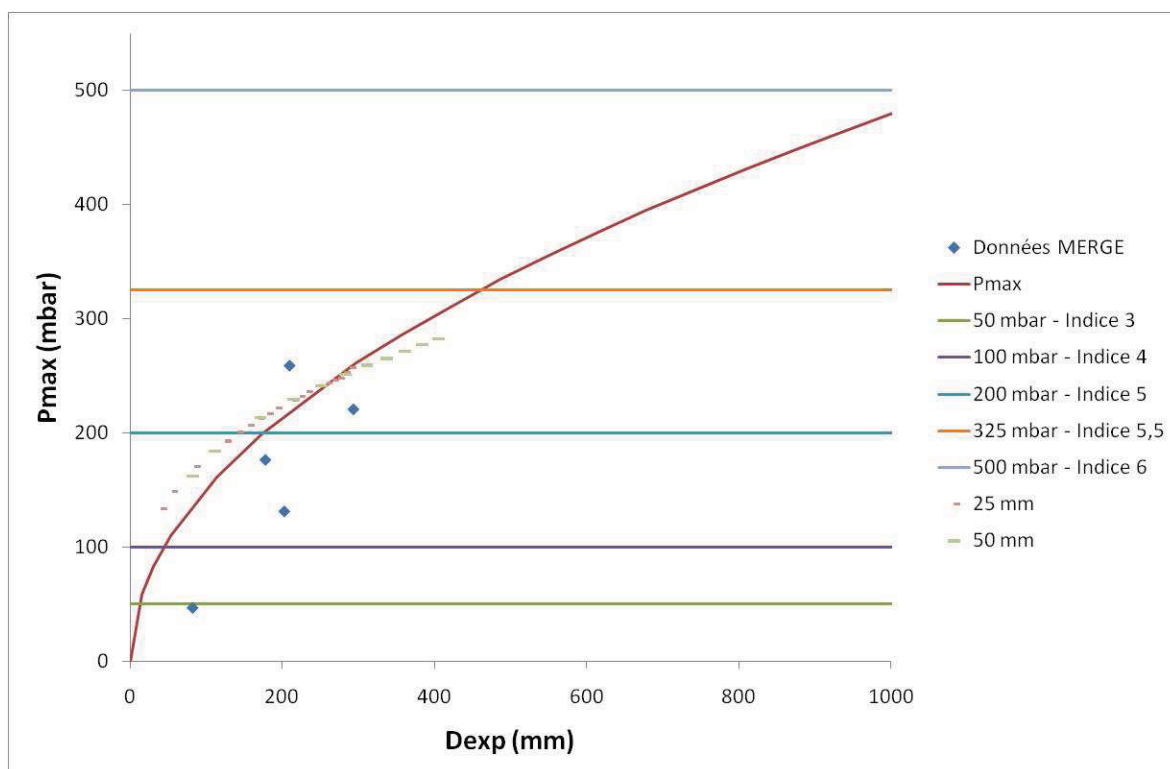


Figure 8 : Surpression maximale d'explosion en fonction du diamètre d'expansion Dexp appliqué au méthane ou gaz naturel

La figure 8 présente la courbe de surpression maximale d'explosion en fonction du diamètre d'expansion Dexp sur laquelle sont superposées les surpressions d'explosion correspondant aux indices de la méthode Multi-energy.

Cet abaque peut permettre le choix de l'indice de sévérité d'explosion de la méthode Multi-energy pour les différentes configurations de rejets de méthane ou de gaz naturel rencontrés jusqu'à l'indice 6.

Ainsi, l'abaque de la figure 7 permet de déterminer le diamètre d'expansion du rejet de méthane ou de gaz naturel selon le couple pression de rejet – diamètre de la brèche. L'abaque de la figure 8 permet ensuite de déterminer la surpression maximale d'explosion et donc de déterminer l'indice de sévérité d'explosion de la méthode Multi-energy pour les rejets libres de méthane ou de gaz naturel

2.4 EXPLOSION DE JET SE DEVELOPPANT DANS UN MANIFOLD

Une des configurations d'étude sur les stockages souterrains de gaz est l'explosion du jet de développant dans un manifold.

2.4.1 DETERMINATION DU VOLUME INFLAMMABLE.

En première approximation, le volume inflammable considéré est généralement égal à la totalité du volume inflammable contenu dans le nuage. Cette approche simple et majorante peut être suffisante dans de nombreuses situations.

Cependant, lorsque les enjeux l'exigent, une méthode de calcul plus précise peut être utilisée en remarquant que les nuages inflammables de méthane ou de gaz naturel formés lors de rejets horizontaux avec effets de sol sont généralement peu élevés, et très longs (plusieurs dizaines ou centaines de mètres) dans le cas de fuites massives. Or, les effets de pression sont essentiellement produits par la phase de propagation sphérique (ou hémisphérique, lorsque le nuage est au sol) de la flamme, qui correspond à l'expansion volumique maximale. Lorsque le front de flamme atteint les limites du nuage dans une direction (par exemple dans la hauteur), il perd sa forme hémisphérique, si bien que le taux d'expansion volumique, et, par suite, la vitesse de la flamme, diminuent.

Par conséquent, le volume explosif qui produit les effets de pression les plus importants peut être assimilé au volume de la plus grande hémisphère inscrite dans le nuage inflammable. Il faut dans ce cas souligner que ce volume n'est pas nécessairement centré à la demi-distance à la LIE, mais peut être localisé dans une zone beaucoup plus étendue du nuage (figure 9).

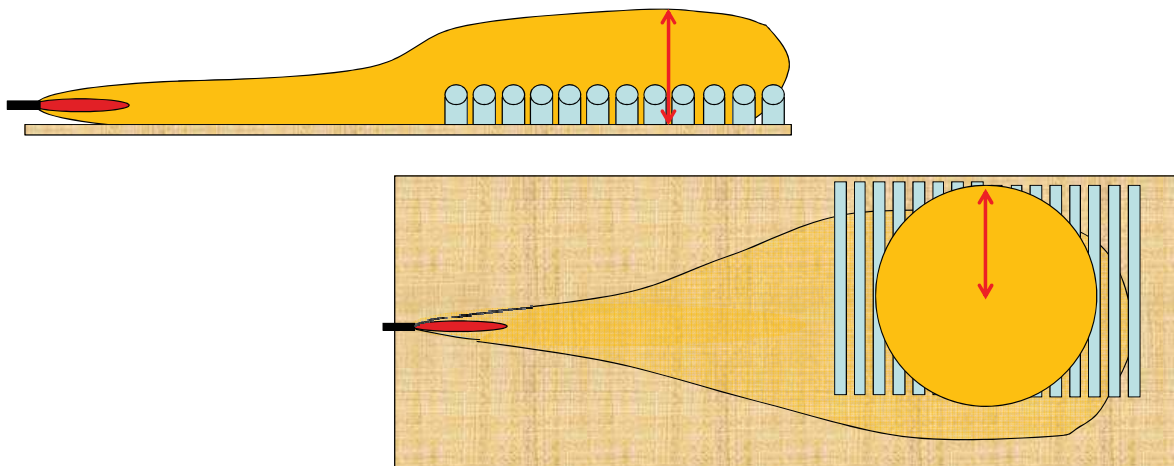


Figure 9 : Jet en manifold

La phase de propagation hémisphérique est, donc, limitée par la hauteur du nuage selon les cas, et le volume de cette demi-sphère peut être retenu pour le calcul des effets de pression. On considère que la turbulence du jet est conservée.

2.4.2 DEVELOPPEMENT DE LA FLAMME

On distingue deux types d'effets lorsque la flamme contourne un obstacle. En premier lieu, la zone de la flamme au voisinage du point d'arrêt sur l'obstacle ralentit tandis que de part et d'autre la flamme poursuit son parcours de telle manière que la flamme s'enroule autour de l'obstacle puis se reconstitue à l'aval. Par ce mécanisme « d'étirement », la surface du front de flamme augmente, et donc le taux de combustion. En second lieu, lorsque la vitesse de l'écoulement est suffisante, il se développe à l'aval de l'obstacle un sillage turbulent susceptible d'accroître le taux de combustion.

2.4.2.1 LA DEFORMATION DE LA FLAMME PAR CONTOURNEMENT DES OBSTACLES

A propos du premier mécanisme, des expériences relativement détaillées ont été réalisées (Rzal, 1992 ; Proust, 2004). Pour faciliter l'observation, on a utilisé l'analogie habituelle entre l'effet d'un obstacle sphérique et d'un tourbillon unique (anneau tourbillonnaire). Une flamme laminaire de méthane se propage verticalement dans un tube de 20 cm de diamètre à 1 m/s, tandis que l'on projette à sa rencontre un anneau tourbillonnaire de 10 cm de diamètre à la vitesse de 2 m/s (figure 10), de telle manière que la vitesse relative de l'interaction est de 3 m/s. On observe que la flamme s'enroule autour de l'obstacle tandis que les bords latéraux continuent à se propager à vitesse constante, ce qui se traduit par la formation d'une « cheminée » en aval de l'obstacle, puis progressivement, la flamme s'éteint autour de l'obstacle et les deux bords de la cheminée se rejoignent sous l'effet de la propagation naturelle de la flamme (à la vitesse $S_{lad} = 25 \text{ cm/s}$). En aval de l'obstacle, la flamme retrouve sa forme initiale. Au plus fort de la déformation, l'accroissement de la surface de flamme est de 3,5.

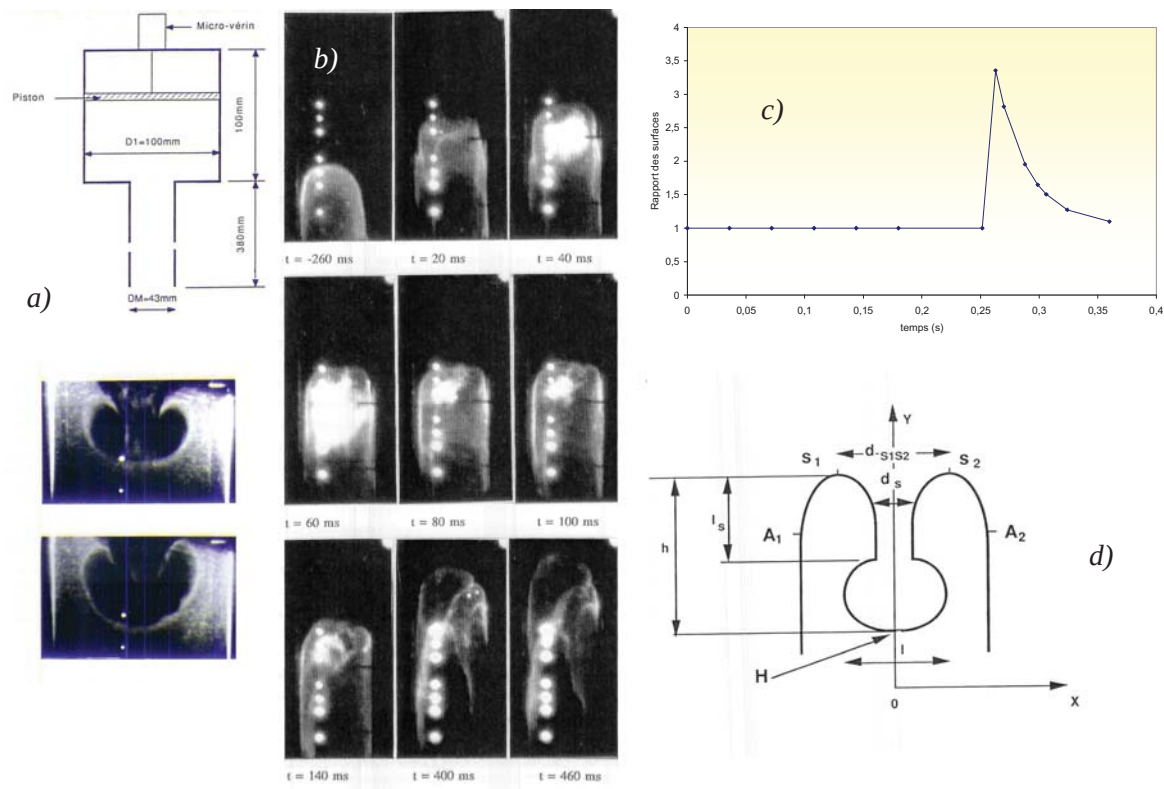


Figure 10 : Interaction d'une flamme de méthane stœchiométrique se propageant à 1 m/s et d'un tourbillon de 10 cm – d'après (Rzal, 1992)

- a) dispositif de création du tourbillon
- b) La flamme s'enroule autour du tourbillon comme autour d'un obstacle (photo)
- c) La surface de flamme augmente (courbe)
- d) modélisation géométrique de la surface de flamme au passage du tourbillon

Zeeuwen (1983) a proposé un modèle simple pour décrire cela (figure 11). Il considère une flamme localement plane se propageant à la vitesse V_{f0} , qui rencontre une ligne d'obstacles cylindriques identiques et régulièrement espacés. La flamme rencontre un point d'arrêt au niveau de l'obstacle, tandis qu'elle « s'engouffre » entre les obstacles.

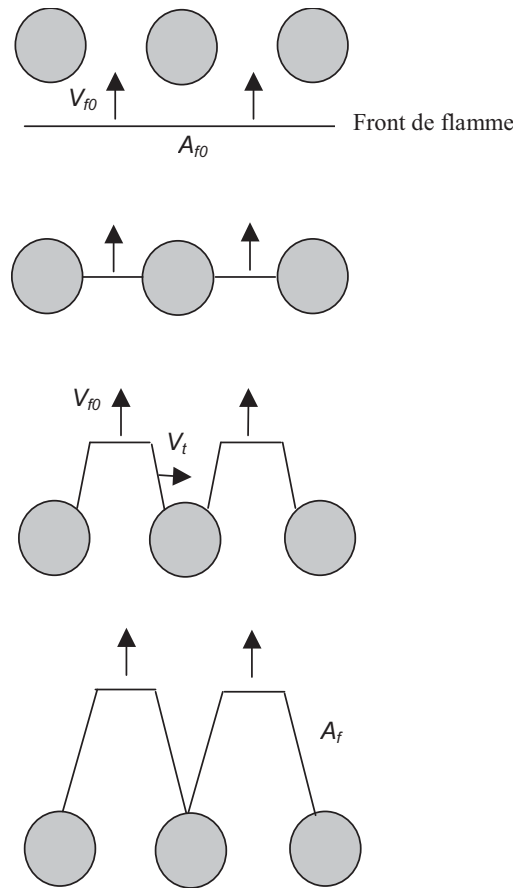


Figure 11 : Schéma de contournement d'un réseau d'obstacles par une flamme – d'après (Zeeuwen, 1983)

Entre deux obstacles, la vitesse de propagation V_f reste proche de V_{f0} tandis que tangentiellement la flamme se propage à une vitesse V_t . Il s'ensuit un étirement de la flamme, jusqu'à ce que les deux fronts de flamme qui progressent tangentiellement derrière l'obstacle se rejoignent et que le front de flamme se « referme » derrière la ligne d'obstacles conformément aux expériences présentées ci-dessus. Le taux d'accroissement de la surface de flamme correspond à une augmentation de la vitesse de propagation telle que :

$$V_f = A_f / A_{f0} \cdot V_{f0}$$

où A_{f0} et A_f sont les surfaces de flamme respectivement avant et après le franchissement de l'obstacle. En définissant $\psi = V_t / V_f$ le rapport des vitesses tangentielle et normale, on obtient l'expression suivante :

$$\varepsilon = \frac{A_f}{A_{f0}} = 1 + \frac{1}{3} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\psi} - 1 \right)^2} - 1 \right)$$

Pour l'exemple de la figure 13, on a $\psi = 0,25 / 3$, si bien que $A_f / A_{f0} = 4$, ce qui est assez proche du facteur 3,5 expérimental. Cependant, cette situation expérimentale avec une vitesse artificielle de la flamme par rapport à l'obstacle

n'est pas réaliste. En pratique, la flamme se propage à la vitesse de combustion multipliée par le taux d'expansion. Sous l'hypothèse d'un milieu raisonnablement homogène autour de l'obstacle, la vitesse de combustion est isotrope. Selon la direction normale de la propagation, on a $V_{f0} = \beta \cdot S_t$. Selon la direction tangentielle, V_t doit décroître de $\beta \cdot S_t$ vers S_t dans la mesure où lorsque les fronts opposés se rapprochent, le milieu intercalaire est au repos, annihilant les effets d'expansion à la manière d'une flamme se rapprochant d'une paroi solide. Donc en moyenne, $V_t = \beta \cdot S_t / 2$. Il en résulte que $\psi = 0,5$ sous ces hypothèses, si bien que A_f / A_{f0} est de l'ordre de 1,15. Au-delà de la valeur numérique et de cette approche géométrique un peu simple, il est important de constater que ce facteur d'accélération de la combustion est indépendant de la géométrie de l'obstacle.

2.4.2.2 LE SILLAGE DES OBSTACLES

Dès que le nombre de Reynolds dépasse 100 à 200 selon Zeeuwen (1983), il se forme à l'aval des obstacles une zone de « sillage ». Pour des tailles industrielles d'obstacles (plus de 10 cm), cette valeur critique du nombre de Reynolds est dépassée dès que la flamme se propage à quelques m/s.

Dans le sillage des obstacles, un champ de vitesse spécifique apparaît avec une zone d'arrêt de l'écoulement au point de fuite. A mesure que l'on se déplace dans le sillage sur l'axe, le déficit de vitesse avec l'écoulement périphérique décroît selon $(D/x)^{1/2}$ où D est le diamètre de l'obstacle et x la distance sur l'axe dans le sillage. Ce déficit de vitesse est très certainement responsable d'un allongement supplémentaire du front de flamme apparemment non pris en compte par Zeeuwen.

Les gradients de vitesse qui apparaissent ainsi sont responsables de l'apparition d'une turbulence de sillage apparemment relativement peu étudiée. D'après Hinze (1975), le champ de turbulence ressemble à celui d'un jet. u' est maximum sur l'axe et vaut environ 30% du déficit de vitesse sur l'axe. Par ailleurs, L_t varie comme $(D \cdot x)^{1/2}$. Lorsqu'on introduit ces données dans la formule de Gülder [18], on obtient une vitesse de combustion turbulente qu'on peut comparer à la vitesse de la flamme en multipliant S_t par le taux d'expansion. On obtient une expression du type :

$$\frac{V_{fsillage}}{V_{f0}} \approx 2 \cdot \beta \cdot \frac{D^{1/2}}{V_{f0}^{1/4}}$$

On constate que l'effet accélérateur est prononcé dès les faibles niveaux de vitesse, typiquement de l'ordre de 5 pour une vitesse de flamme de l'ordre de 10 m/s, et semble décroître à mesure que la vitesse de flamme augmente (3 pour $V_{f0} = 100$ m/s). Faut-il en conclure que cet effet est dominant ? Un autre élément doit être pris en compte. Aux faibles vitesses de flamme, l'étendue du sillage est très réduite car la plus petite échelle des tourbillons (l'échelle de Kolmogorov) est assez grande, si bien que l'effet d'étirement domine nettement bien que le régime turbulent soit avéré. Il n'y a probablement qu'aux nombres de Reynolds extrêmement élevés que le sillage est suffisamment développé pour occuper tout le domaine entre les obstacles et dominer le processus de combustion. Cet argumentaire reste à développer mais pourrait expliquer l'observation de Zeeuwen selon laquelle, dans la plupart des situations, le régime de propagation de flamme

dans un réseau d'obstacles serait correctement représenté par l'expression

$$\varepsilon = \frac{A_f}{A_{f0}} = 1 + \frac{1}{3} \cdot \left(\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\psi} - 1 \right)^2} - 1 \right) \text{ avec } \psi \text{ constant.}$$

Cet effet spécifique des obstacles sur la propagation des flammes semble avoir été insuffisamment étudié à l'heure actuelle.

2.4.3 APPLICATION AUX MANIFOLDS ET AUX FORETS

Avant de rencontrer la première rampe de manifold (par exemple), la flamme se développe dans un nuage turbulent dont l'intensité de turbulence est considérée identique à celle du rejet libre.

Lorsque la flamme rencontre les différentes rampes, elle va se déformer selon le mécanisme présenté précédemment. Cette déformation entraîne un accroissement de la surface de flamme de l'ordre de 1,15 fois la surface de flamme initiale et une augmentation du taux de combustion.

Cela se traduit en termes de vitesse de flamme par une multiplication de 1,15 de la vitesse de flamme initiale quand la flamme passe un obstacle. Si la flamme se propage à une vitesse de l'ordre de 75 m/s (vitesse correspondant à un $\Delta P_{\max}$ de 100 mbar – Indice 4 de la méthode Multi-energy), elle doit contourner une série de rampes de manifold pour atteindre 10 m/s (vitesse correspondant à un $\Delta P_{\max}$ de 200 mbar – Indice 5 de la méthode Multi-energy) et ainsi de suite, jusqu'à la vitesse de l'ordre de 150 m/s qui correspond à l'indice 6 de la méthode Multi-energy. Au-delà de 150 m/s, l'explosion peut se comporter plus ou moins comme une explosion à volume constant. L'indice 6 de la méthode Multi-energy est l'indice maximal auquel on se limite étant donné que les courbes de décroissance de pression sont confondues avec pour le champ lointain avec les courbes des indices supérieurs.

En pratique, si l'on utilise la méthode Multi-energy, l'indice qui aurait été choisit pour un jet libre sera majoré en cas de rejet de gaz naturel dans un manifold (ou en direction d'une forêt).

3 CONCLUSIONS

Ce rapport présente les mécanismes physiques intervenant dans la dispersion et dans l'explosion d'un jet de gaz naturel en fonction des différentes configurations que l'on peut trouver sur un site de stockage souterrain de gaz naturel.

Les limites scientifique ont amené l'INERIS et le CRIGEN à réfléchir à des solutions pour calculer des distances d'effets de surpression suite à l'inflammation d'un nuage de gaz naturel qui soient génériques sans pour autant avoir les outils numériques parfaitement adéquat. Ces solutions ont ensuite permis de construire des abaques de distances qui sont présentées dans le rapport DRA-10-115312-12052A.

4 ANNEXES

Annexe	Intitulé	Nombre de page
Annexe A	Description du modèle EXPLOJET	3 pages
Annexe B	Méthode Multi-energy	2 pages

ANNEXE A

DESCRIPTION DU MODELE EXPLOJET

Description du modèle EXPLOJET

EXPLOJET est un code développé par l'INERIS permettant de simuler les jets supercritiques de gaz de densités différentes de celle de l'air. Il est basé sur la théorie de pseudo-similitude applicable aux jets turbulents à densité variable. EXPLOJET comporte :

- un module de calcul du débit de fuite en fonction des conditions thermodynamiques amont,
- un module composé d'une base de données de substances inflammables,
- d'un module de dispersion, de calcul des champs de concentration et de vitesse.

Développé dans le cadre de projets expérimentaux européens ([7] et [8]) et validé sur des essais [1], il est plus particulièrement adapté pour la simulation des jets supercritiques. Les données de sortie (concentration, vitesse, masse inflammable, distance à la LIE) sont définies par la dynamique du jet. Il n'y a pas de dispersion passive.

Calcul du débit et de la vitesse à l'orifice dans EXPLOJET

La vitesse subsonique de fuite **U** à l'orifice d'un réservoir sous pression **P_{rés}**, en supposant que cette pression est constante, est donnée par :

$$U = C_d \times \sqrt{\left[2 \times \frac{\gamma}{\gamma - 1} \times \frac{R}{m} \times T_{rés} \times \left(1 - \left(\frac{P_a}{P_{rés}} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right) \right]}$$

Pour les jets supercritiques, la vitesse maximale est donnée par :

$$U = C_d \times \sqrt{\left[2 \times \frac{\gamma}{\gamma - 1} \times \frac{P_{rés}}{\rho_{rés}} \right]}$$

où

C_d est le coefficient (sans dimension) dit « de décharge » qui correspond au rapport entre les débits de fuite isentropique et réel.

γ rapport des chaleurs spécifiques à pression constante et à volume constant

R constante universelle des gaz et vaut 8,314 [J/K.mole]

m masse molaire du gaz rejeté [kg/mole]

T_{rés} température dans le réservoir [K]

P_{rés} pression absolue dans le réservoir en amont du jet [Pa]

P_a pression dans le milieu ambiant de décharge du jet [Pa]

Profil de concentration et de vitesse dans le jet par EXPLOJET

Le mélange obtenu par la décharge d'un gaz sous forme de jet dans un milieu ambiant mobile ou au repos est en général suffisamment caractérisé par la concentration du mélange en tout point et par sa vitesse. En prenant comme point de référence, l'orifice avec une concentration C_j (comprise entre 0 et 1) du gaz déchargé dans l'atmosphère, la concentration le long de l'axe ($C_{x,0}$) de l'orifice décroît de façon hyperbolique et la concentration en gaz combustible ($C_{x,r}$) de l'axe se répartit selon une gaussienne dans chaque plan pris perpendiculairement à l'axe du jet, à la distance x de l'orifice de fuite. En outre, la concentration maximale sur l'axe ne passe pas toujours par l'origine (0,1) comme il est schématisé sur les courbes ci dessous (cf fig.2). Le point d'intersection entre la droite et l'axe est appelé « abscisse virtuelle ».

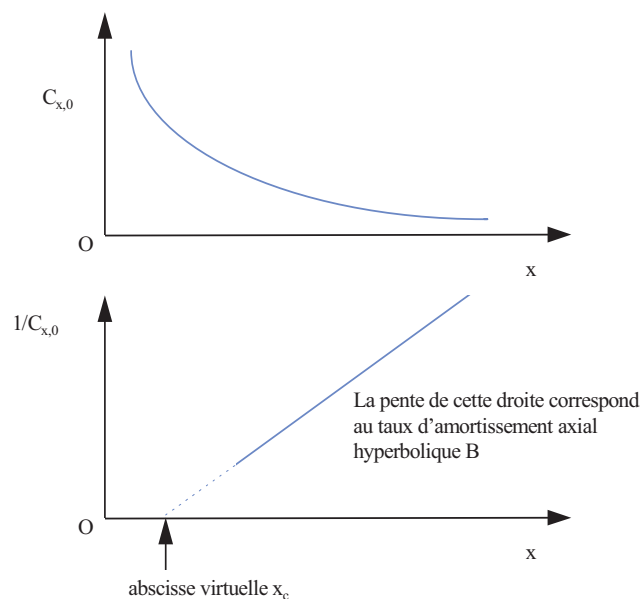


Figure 7 Schéma du profil de concentration sur l'axe d'un jet

L'évolution de la concentration sur l'axe est donnée par :

$$C_{x,0} = \frac{C_0}{B} \times \frac{d}{(x - x_c)}$$

où

- C_0 concentration initiale dans le réservoir
- B constante sans dimension caractérisant le taux de décroissance axiale hyperbolique sur l'axe de la concentration de gaz déchargé
- x distance comptée depuis l'orifice de rejet [m]
- x_c abscisse d'une origine virtuelle comptée depuis l'orifice de rejet [m]
- d diamètre de section de passage du jet [m]

Les principales inconnues ayant un impact direct sur le dimensionnement du volume inflammable sont le coefficient de décharge C_d , et les abscisses virtuelles de la vitesse et de la concentration.

Le coefficient de décharge est une valeur qui dépend des propriétés thermophysiques du fluide et aussi de la forme de l'orifice. Plusieurs formulations permettent de prédire avec une bonne précision sa valeur pour des écoulements incompressibles et à faibles nombres de Reynolds. Dans ces conditions, on retient généralement une valeur de $C_d = 0,62$.

Par contre pour les écoulements fortement turbulents et compressibles, le coefficient de décharge croît avec le rapport de la pression de décharge sur la pression ambiante. Le coefficient varie alors entre 0,85 et 1. Pour rester conservatif, nous garderons la valeur 1.

D'autre part, la détermination de l'abscisse virtuelle est un problème complexe et non complètement résolu actuellement. En réalité, toutes les méthodes dites de similarité des jets sont confrontées à ce problème. L'abscisse virtuelle est obtenue par déduction à partir d'essais expérimentaux. Toutefois, il est souvent admis que l'abscisse virtuelle (m) est commune à la concentration et à la vitesse. De plus, sa variation n'a pas été trouvée comme excédant l'intervalle -10 à 10 fois le diamètre de l'orifice [2], [3], [4]. Pour cette étude nous garderons la valeur conservative de 10 fois le diamètre de l'orifice.

Détermination des caractéristiques du volume inflammable par EXPLOJET

EXPLOJET permet au final de déterminer :

- **la distance à la LIE**

La distance à la LIE est la longueur séparant l'orifice du point sur l'axe du jet où la concentration est égale à la LIE. Elle est aussi déterminée analytiquement à partir de l'équation du profil de concentration sur l'axe.

- **la masse et volume inflammable**

Le profil de concentration dans le jet est analytiquement connu. La masse inflammable et le volume inflammable sont calculés à partir de ce profil en se limitant à l'intervalle compris entre la LIE et la LSE.

ANNEXE B

METHODE MULTI-ENERGY

Les effets de pression ont été déterminés classiquement à l'aide du modèle de la source acoustique à vitesse constante, qui est à la base de la méthode Multi-energy [8] (voir abaques figures suivantes).

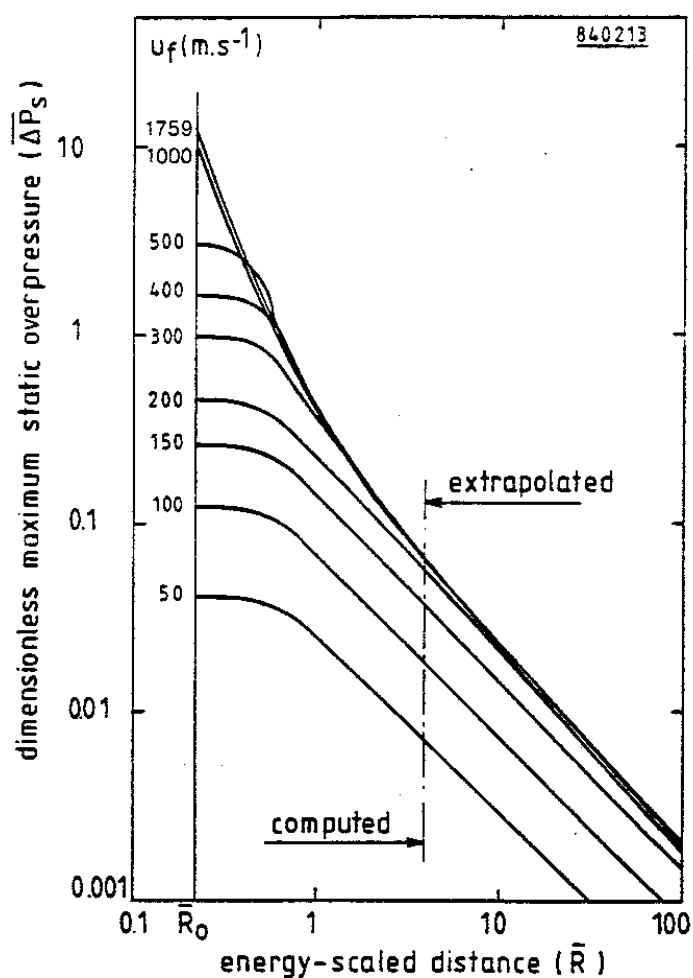


Figure 8 : Surpression maximale engendrée par une déflagration hémisphérique à vitesse constante, pour différentes vitesses de flamme

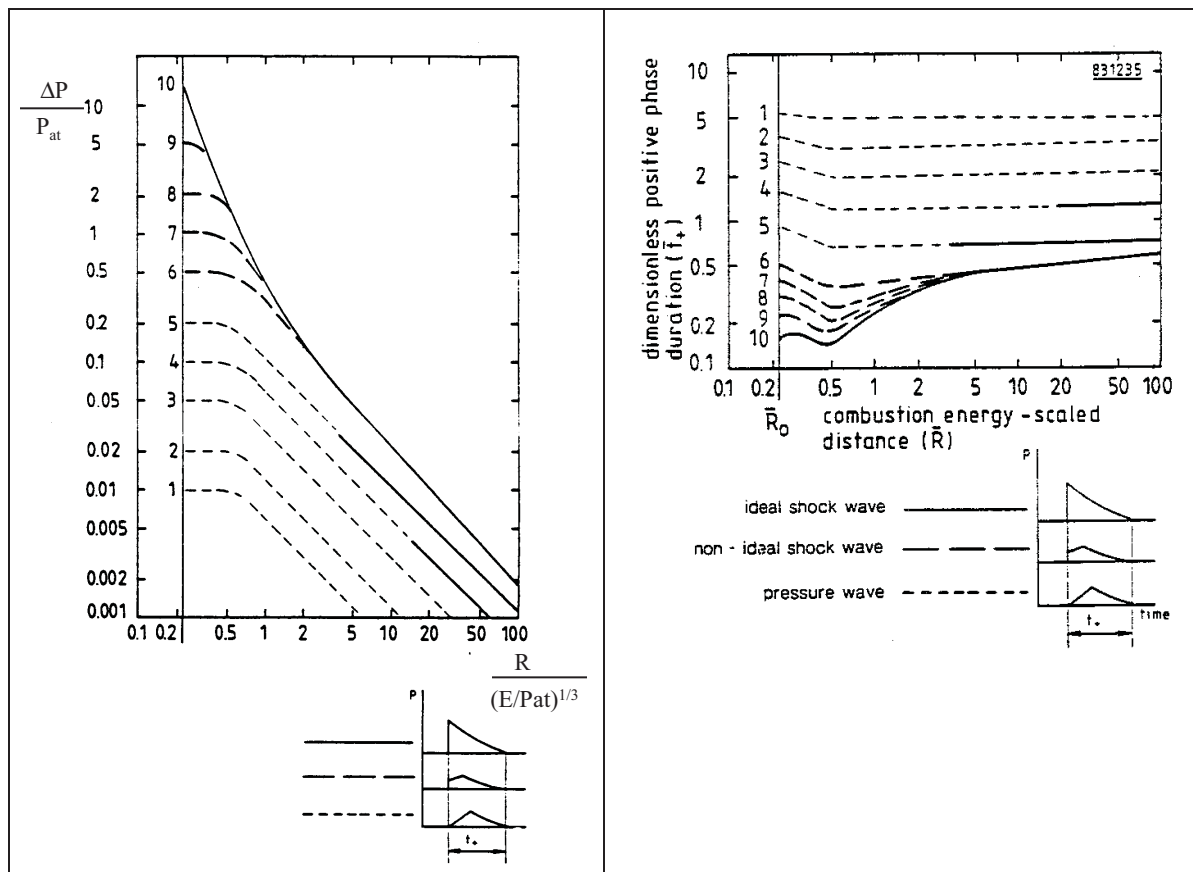


Figure 4 : Abaques de surpression et de durée de la phase positive en fonction de la distance réduite – d’après (van den Berg, 1984)

La vitesse de propagation de la flamme est déduite des champs de concentration et de turbulence calculés par Explojet, tandis que la courbe de décroissance de la surpression aérienne en fonction de la distance est trouvée par les abaques de la méthode Multi-energy (figure 4).

La corrélation retenue pour le calcul de St (vitesse de combustion turbulente) est celle proposée par Abdel-Gayed et al. [9] et reportée ci-après :

$$St = 1,5 \times u'^{0,275} \times Sl^{0,6} \times \left(\frac{Lt}{\nu}\right)^{0,15}$$

où ν est la viscosité cinématique en m^2/s des gaz,
 Sl est la vitesse de combustion laminaire,
 u' est la fluctuation moyenne de la composante longitudinale de la vitesse
et Lt est l’échelle des tourbillons

REFERENCES

[1]. Chaîneaux J. Schumann St. (1995)

Experimental study of explosions generated from massive release of a flammable gas, as a high momentum jet, for different conditions (free or obstructed, steady or transient, jet of CH₄, C₃H₈ or H₂). Proceedings of the 8th International Loss Prevention Symposium, pp 333-348, Antwerp, Belgium.

[2]. M. CLARKE (2005)

Investigation of the effects of buoyancy on turbulent jet mixing. *Applied Fluid Imaging Laboratory*

[3]. RICHARDS C.D, PITTS W.M (1993)

Global Density effects on the self-preservation behaviour of turbulent free jets *J.fluid Mech Vol.254 pp.417-435*

[4]. G. CARAZZO, E. KAMINSKI, S. TAIT (2006)

The route to self-similarity in turbulent jets end plumes. J.Fluid Mech.vol.547, pp 137-148

[5] HEUDIER, (2005):

Les éclatements de réservoirs, phénoménologie et modélisation des effets ; rapport INERIS Q15

[6] GTDLI - *Modélisation des effets de surpression dus à une explosion de bac atmosphérique* - Mai 2006

[7]. MOUILLEAU, 1998 : EXPLOJET, *Code de calcul des explosions dans les jets*

turbulents de gaz inflammables, Rapport INERIS EMA-YMo-ERu/Ymo-98-16FA26.

[8] LEPRETTE E., PROUST C., 2007 : *Synthèse bibliographique sur la méthode Multi-energy* INERIS-DRA-76284-DRA31-E1

[9] ABDEL-GAYEB R.G., BRADLEY D., LAWES M. 1987, *Turbulent burning velocities : a general correlation in terms of straining rates*, Proc.R.Soc., London A 414, pp 389-413.



INERIS

*maîtriser le risque
pour un développement durable*

Institut national de l'environnement industriel et des risques

Parc Technologique Alata
BP 2 - 60550 Verneuil-en-Halatte

Tél. : +33 (0)3 44 55 66 77 - Fax : +33 (0)3 44 55 66 99

E-mail : ineris@ineris.fr - Internet : <http://www.ineris.fr>