

Rapport Final
N° DRA-18-171229-00933A

23/04/2018

**Probabilité dans les études de sécurité et études
de dangers
OMEGA 24**

Probabilité dans les études de sécurité et études de dangers

OMEGA 24

**Verneuil-en-Halatte
Direction des Risques Accidentels**

Destinataire : Ministère de la Transition Écologique et Solidaire

List des personnes ayant participé à l'étude : Marion DEMEESTERE, François MASSE, Franck PRATS

PREAMBULE

Les rapports Oméga sont la propriété de l'INERIS. Il n'est accordé aux utilisateurs qu'un droit d'utilisation n'impliquant aucun transfert de propriété.

Le rapport Oméga est établi sur la base des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur, ainsi que des pratiques et méthodologies développées par l'INERIS. Bien que l'INERIS s'efforce de fournir un contenu fiable, il ne garantit pas l'absence d'erreurs ou d'omissions dans ces documents.

Ce rapport est destiné à des utilisateurs disposant de compétences professionnelles spécifiques dans le domaine des risques accidentels. Les informations qu'il contient n'ont aucune valeur légale ou réglementaire. Ce sont des informations générales et ne peuvent, en aucun cas, répondre aux besoins spécifiques de chaque utilisateur. Ces derniers seront donc seuls responsables de l'utilisation et de l'interprétation qu'ils feront des rapports. De même, toute modification et tout transfert de ces documents se fera sous leur seule responsabilité.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra, en aucun cas, être engagée à ce titre. En toute hypothèse, la responsabilité de l'INERIS ne pourra être retenue que sur la base de la version française de ces rapports.

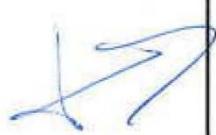
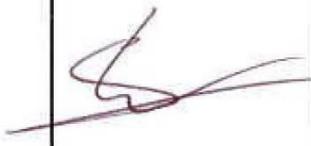
	Rédaction	Vérification		Approbation
NOM	Franck PRATS	Valérie DE DIANOUS	Frédéric MERLIER	Sylvain CHAUMETTE
Qualité	Référent Technique en Analyse et Gestion Intégrée des Risques Direction des Risques Accidentels	Responsable de l'unité Quantification des Risques et Performance des Barrières Direction des Risques Accidentels	Délégué Appui à l'administration Direction des Risques Accidentels	Responsable du pôle AGIR Direction des Risques Accidentels
Visa				

TABLE DES MATIÈRES

GLOSSAIRE	5
1. INTRODUCTION.....	7
1.1 Les référentiels OMEGA.....	7
1.2 Contexte et objectif du document	7
1.3 Organisation du document	8
2. PANORAMA GÉNÉRAL DES TRAVAUX DE L'INERIS EN MATIÈRE DE DÉTERMINATION DE LA PROBABILITÉ D'ACCIDENT	11
3. RAPPELS SUR QUELQUES NOTIONS	13
3.1 Fréquence et probabilité.....	13
3.1.1 La notion de fréquence	13
3.1.2 La notion de probabilité.....	13
3.1.3 Échelle de cotation utilisée en France	15
3.2 Représentation des scénarios d'accident.....	17
3.2.1 Amont de l'ERC : arbre de défaillances	18
3.2.2 Aval de l'ERC : arbres des événements	22
3.2.3 Représentation des scénarios d'accidents sous forme de nœud papillon	24
3.2.4 Synthèse sur les approches arborescentes	27
4. CHOIX D'UNE MÉTHODE D'ESTIMATION DE LA PROBABILITÉ	29
4.1 Différentes approches possibles pour l'estimation de la probabilité	29
4.1.1 L'approche qualitative	29
4.1.2 L'approche semi-quantitative	29
4.1.3 L'approche quantitative.....	31
4.2 Différents points de départ possibles pour l'estimation quantitative de la probabilité d'un accident.....	32
4.2.1 Estimation générique de l'ERC ou du PHD.....	33
4.2.2 Estimation à partir des EI	33
5. COLLECTE ET TRAITEMENT PROBABILISTE DES DONNÉES D'ENTRÉE	35
5.1 Les données d'entrée nécessaires	35
5.2 Traitement probabiliste des EI.....	36
5.2.1 Causes externes à l'établissement d'origine naturelle	37
5.2.2 Causes externes à l'établissement d'origine anthropique	38
5.2.3 Causes internes à l'établissement	42
5.3 Traitement probabiliste des ERC et PHD	44
5.4 Les facteurs de réduction du risque des barrières de sécurité	46
5.5 Traitement probabiliste des événements secondaires.....	47
5.5.1 Inflammation du nuage de gaz.....	47
5.5.2 Présence d'eau	48

5.5.3 Présence de vent.....	48
5.5.4 Présence de personnes.....	48
6. QUANTIFICATION DE LA PROBABILITÉ D'OCCURRENCE DES ERC, PHD ET ACCIDENTS.....	51
6.1 Quantification des ERC.....	51
6.1.1 Traitement quantifié de l'arbre des défaillances.....	51
6.1.2 Réduction d'arbre et quantification de l'ERC.....	52
6.1.3 Traitement des portes OU.....	55
6.1.4 Traitement des portes ET.....	55
6.1.5 Intégration des barrières de sécurité.....	56
6.1.6 Exploitation de la quantification dans le cadre de la maîtrise des risques.....	57
6.2 Estimation de la probabilité d'occurrence des PHD.....	57
6.2.1 Traitement quantifié de l'arbre des événements.....	57
6.2.2 Traitement d'un ES conditionnellement à un ERC.....	58
6.2.3 Intégration des barrières de sécurité.....	58
6.3 Quantification des accidents.....	59
7. CONCLUSION.....	61
8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	63

GLOSSAIRE

ADD ou AdD	Arbre des Défaillances
ADE ou AdE	Arbre Des Evénements
AIEA	Agence International de l'Energie Atomique
AIPCR	Association Mondiale de la Route
APR	Analyse Préliminaire des Risques
BLEVE	Boiling Liquid Vapour Cloud Explosion
CETU	Centre d'Etude des TUnnels
CEREMA	Centre d'Etudes et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité, le développement durable et l'Aménagement
EDD	Étude De Dangers
EDR	Étude Détaillée des Risques
EI	Événement initiateur
ERC	Événement Redouté Central (fuite, brèche, ...)
ES	Événement Secondaire
GESIP	Groupe d'Etude de Sécurité des Industries Pétrolières et Chimiques
IPSN	Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire
NC	Niveau de Confiance
REX	Retour d'expérience
PFD	Probability of Failure on Demand Probabilité de défaillance à la sollicitation
PHD	Phénomène Dangereux
POA	Probabilité d'Occurrence Annuelle
QRA	Quantitative Risk Assessment
TMD	Transport de Marchandises Dangereuses

1. INTRODUCTION

1.1 LES RÉFÉRENTIELS OMEGA

Les référentiels OMEGA (Ω) constituent un recueil global formalisant l'expertise de l'INERIS dans le domaine des risques accidentels. Ce recueil concerne les thèmes suivants :

- l'analyse des risques ;
- les phénomènes physiques impliqués en situation accidentelle (incendie, explosion, BLEVE, ...) ;
- la maîtrise des risques d'accident ;
- les aspects méthodologiques pour la réalisation de prestations réglementaires (étude de dangers, analyse critique, ...).

Ces rapports ont vocation à présenter les connaissances considérées comme consolidées au moment de leur rédaction. Ces rapports sont mis à disposition des acteurs de la maîtrise des risques d'accidents qui en feront bon usage sous leur responsabilité. Certains de ces rapports sont traduits en anglais en vue d'en favoriser leur diffusion. Les concepts exposés dans ces rapports n'ont pas vocation à se substituer aux dispositions réglementaires.

1.2 CONTEXTE ET OBJECTIF DU DOCUMENT

L'évaluation des risques accidentels générés par un site industriel peut être réalisée en suivant une approche probabiliste, qui permet d'analyser de façon aussi exhaustive que possible les scénarios d'accidents potentiels et de valoriser des barrières de sécurité en prévention et en protection de ces scénarios. L'estimation de la probabilité peut être réalisée dans le cadre d'une étude de dangers (EDD), mais également dans le cadre d'études de sécurité non réglementaires. Le présent document a vocation à couvrir l'ensemble de ces contextes.

Dans le cadre des EDD, l'estimation de la probabilité d'occurrence des accidents majeurs s'effectue dans la phase d'Étude Détaillée des Risques (EDR). Cette phase a pour objectif de déterminer la probabilité, l'intensité (resp. gravité) et la cinétique des phénomènes dangereux (resp. accidents majeurs) résultant des scénarios retenus lors de la phase d'Analyse Préliminaire des Risques (APR) et susceptibles de générer des effets à l'extérieur des limites du site objet de l'EDD.

En France, il n'existe pas de méthode unique d'estimation de la probabilité d'occurrence des accidents. Cette estimation peut se faire de manière qualitative ou au moyen de calculs en utilisant des classes de probabilité (méthode semi-quantitative) ou des valeurs (méthode quantitative) et en suivant des règles mathématiques précises. Les règles encadrant le traitement semi-quantitatif des données sont établies dans le référentiel Ω 25 [1].

Le présent document traite du choix de la méthode d'estimation de la probabilité d'occurrence des accidents ainsi que de la collecte et du traitement probabiliste des données d'entrée. Seule l'approche probabiliste suivie en France dans le cadre des EDD (qui peut également être suivie en dehors du cadre réglementaire) est traitée dans le présent document. Il existe d'autres approches probabilistes, suivies en France (en dehors du cadre des EDD) ; par exemple les EQR (Évaluation Quantitative des Risques) dans le contexte des tunnels routiers, les réseaux bayésiens, les processus de Markov en sûreté de fonctionnement...

Aux Pays-Bas, par exemple, le respect des règles de maîtrise de l'urbanisation est démontré par la mise en œuvre d'une méthodologie d'évaluation quantitative des risques appelée QRA (Quantitative Risk Assessment). La partie probabiliste de cette méthodologie repose notamment sur la proposition d'un ensemble de scénarios génériques (essentiellement des pertes de confinement de réservoirs et de tuyauteries) ainsi que sur la définition des fréquences qui leur sont associées. Les résultats de l'EQR et du QRA sont généralement exprimés sous la forme de risque individuel (tracé des courbes iso-risques sur le territoire) et de risque sociétal, ce dernier s'illustrant par une courbe qui décrit la fréquence cumulée d'accidents (F) impliquant au moins N victimes (appelée « courbe F-N »). Le lecteur intéressé pourra se reporter à l'article [2] qui traite des différences dans les approches probabilistes françaises et néerlandaises et identifie de nombreuses références bibliographiques traitant de l'approche QRA.

1.3 ORGANISATION DU DOCUMENT

L'estimation de la probabilité d'occurrence des accidents se décompose en trois étapes principales :

- Étape 1 : Choix d'une méthode d'estimation de la probabilité ;
- Étape 2 : Collecte des données d'entrées nécessaires à l'estimation ;
- Étape 3 : Estimation de la probabilité d'occurrence.

Cette démarche est illustrée dans le schéma ci-dessous.

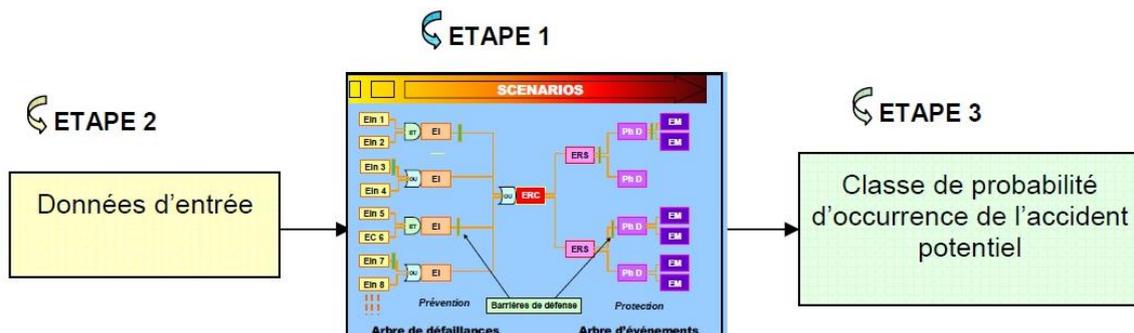


Figure 1: Étapes de l'estimation de la probabilité d'occurrence des accidents

Le chapitre 2 présente sommairement les différents travaux réalisés par l'INERIS concernant les aspects probabilistes et place le présent document dans cette cartographie.

Le chapitre 3 couvre les notions essentielles à connaître sur les fréquences et les probabilités et rappelle les représentations possibles des scénarios d'accident sous forme d'AdD (Arbre des Défaillances), d'AdE (Arbre des Événements) et de type nœud papillon.

Les différentes approches possibles pour l'estimation de la probabilité d'occurrence des accidents sont présentées au chapitre 4, ainsi que la démarche qui peut être suivie pour le choix des données d'entrée (Étape 1 du schéma ci-avant).

Le chapitre 5 aborde la thématique des données d'entrée nécessaires à la quantification en probabilité des accidents (Étape 2 du schéma ci-dessus), en abordant, quand elles existent, les règles spécifiques aux EDD. Le traitement probabiliste des événements initiateurs, événements redoutés centraux, facteurs de réduction du risque apportés par les barrières de sécurité et événements secondaires y sont notamment traités.

Une fois les données d'entrée collectées, celles-ci sont agrégées le long du nœud papillon pour aboutir à la probabilité d'occurrence des accidents étudiés (Étape 3 du schéma ci-dessus). Le chapitre 6 couvre les aspects généraux de cette démarche.

2. PANORAMA GÉNÉRAL DES TRAVAUX DE L'INERIS EN MATIÈRE DE DÉTERMINATION DE LA PROBABILITÉ D'ACCIDENT

Le tableau suivant présente les contributions des travaux de l'INERIS (soit rapport INERIS, soit document pour lequel l'INERIS a été impliqué) dans le domaine en fonction :

- des étapes nécessaires à l'estimation des probabilités d'un accident ;
- de l'approche d'estimation choisie (quantitative ou semi-quantitative).

Données d'entrée nécessaires à l'estimation	
Approche semi-quantitative	Approche quantitative
Évaluation des performances des Barrières Techniques de Sécurité – Ω 10 [3]	Panorama des sources de données utilisées dans les analyses quantitatives des risques [4]
Démarche d'évaluation des Barrières Humaines de Sécurité – Ω 20 [5]	Méthode d'évaluation des fréquences et des probabilités à partir des données de retour d'expérience [6]
Proposition d'une méthode semi-quantitative d'évaluation des probabilités d'inflammation [7]	
Estimation de la probabilité d'un accident	
Approche semi-quantitative	Approche quantitative
Agrégation semi-quantitative des probabilités dans les études de dangers des installations classées – Ω 25 [1]	Le présent rapport
Documents à destination sectorielle	
Guide Dépôts de Liquides Inflammables Version - Octobre 2008	
Guide pratique pour la validation des probabilités des phénomènes dangereux des dépôts de gaz de pétrole liquéfié (GPL). 3 ^{ème} version » [8]	
Guide pratique pour la validation des probabilités des phénomènes dangereux des installations de stockage d'ammoniac [9]	

3. RAPPELS SUR QUELQUES NOTIONS

Ce chapitre présente au lecteur un rappel de quelques notions essentielles concernant la fréquence et la probabilité ainsi qu'une brève introduction sur la représentation des scénarios d'accidents sous la forme de nœud papillon.

3.1 FRÉQUENCE ET PROBABILITÉ

3.1.1 LA NOTION DE FRÉQUENCE

Il existe 2 définitions de la fréquence : une définition statistique et une définition temporelle.

Selon la définition statistique, la fréquence est un évènement sans dimension représentant le quotient entre le nombre d'observations d'un type et l'effectif total d'une population :

$$fréquence = \frac{\text{nombre d'observations}}{\text{population totale}}$$

C'est alors une notion de statistique descriptive déterminée à partir d'une population observée. Il s'agit d'une grandeur sans dimension comprise entre 0 et 1 et qui converge avec la probabilité lorsque la population observée est suffisamment grande.

Selon la définition temporelle, la fréquence est le quotient entre le nombre d'observations d'un évènement et la période totale d'observation :

$$fréquence = \frac{\text{nombre d'observations}}{\text{temps total d'observation}}$$

Son unité est alors l'inverse de l'unité de temps considérée (h^{-1} , an^{-1}). L'inverse de la fréquence est alors la période de retour moyenne de l'évènement.

3.1.2 LA NOTION DE PROBABILITÉ

Probabilité d'occurrence et probabilité d'occurrence annuelle (POA)

Comme indiqué précédemment la fréquence et la probabilité sont 2 notions différentes. Ainsi, dans le cadre des études de sécurité, on cherchera à calculer la Probabilité d'Occurrence Annuelle (POA) d'un ERC ou d'un accident.

Selon le guide 73 de l'ISO¹ sur le management du risque, une fréquence est un « nombre d'évènements ou d'effets par unité de temps ». Selon ce même guide, la fréquence peut être utilisée comme mesure de la probabilité pour évaluer des évènements futurs.

Il en ressort que la notion de fréquence utilisée dans les analyses de risques est ambiguë car elle a une double signification, temporelle et statistique.

• ¹ FD ISO GUIDE 73 Décembre 2009 - Indice de classement : X50-251

Cependant certaines hypothèses implicites des études de sécurité permettent d'aboutir à une meilleure définition :

- Hypothèse 1 : une fréquence d'occurrence de 10^{-3} par heure ne signifie pas que si un évènement est observé, le suivant se produira dans 1000 heures mais que le temps moyen séparant 2 évènements est de 1000 heures. Cela ne définit pas un évènement cyclique mais l'espérance mathématique de la période de retour de l'évènement.
- Hypothèse 2 : on considère que les fréquences d'évènements élémentaires sont constantes dans le temps, c'est-à-dire que la fréquence d'occurrence d'un évènement dans la prochaine heure est la même quel que soit l'historique de fonctionnement du système.

Selon ces hypothèses, la fréquence est le paramètre de la loi exponentielle définissant l'intervalle de temps entre deux observations de l'évènement :

On note f la fréquence.

L'espérance mathématique de la période de retour vaut alors :

$$E(X) = \frac{1}{f}$$

La probabilité que l'évènement se produise sur une durée T vaut alors :

$$P = 1 - e^{-f.T}$$

Pour des valeurs très faibles on peut approximer la relation précédente par :

$$P = f.T$$

Pour une période de 1 an, et une fréquence inférieure ou égale à 10^{-1} on considérera que la probabilité est égale à la fréquence annuelle.

En pratique, la fréquence sera à exprimer en an^{-1} (ou POA) pour le système considéré. À titre d'exemple :

- si la probabilité de l'évènement E est de 10^{-3} par heure, étant donné qu'il y a 8760 heures dans une année, la POA de E peut être estimée par la relation $P = 1 - e^{-0,001 \times 8760}$ soit environ 0,999 ;
- si la probabilité de l'évènement E est de 10^{-1} par an, la POA de E peut être estimée par la relation $P = 1 - e^{-0,1}$ soit environ 0,1 (0,095).

Probabilité conditionnelle

Une probabilité conditionnelle est la probabilité d'observer un évènement A sachant qu'un autre évènement B s'est déjà produit : on parle de la probabilité de A conditionnellement à B , ou encore de la probabilité de A sachant B .

La probabilité d'inflammation d'un nuage (sachant que le nuage inflammable est présent) et la probabilité de présence d'un point d'inflammation sont des exemples de probabilités conditionnelles rencontrées dans les études de sécurité et de dangers.

3.1.3 ÉCHELLE DE COTATION UTILISÉE EN FRANCE

L'évaluation des risques accidentels consiste à estimer la probabilité d'occurrence et la gravité des accidents, et ce afin d'en déterminer l'acceptabilité au regard de critères préalablement définis. Les critères d'acceptabilité des accidents potentiels peuvent être explicités au travers d'une grille de criticité telle que présentée ci-dessous.

Gravité				Probabilité
4	3	2	1	
			Inacceptable	
		Tolérable		
	Acceptable			
	1	2	3	4

Figure 2: Exemple de grille de criticité

Les niveaux de probabilité sont ici caractérisés par un indice qui représente un intervalle de probabilité selon une échelle définie (par exemple, l'indice 3 correspond aux probabilités comprises entre 10^{-5} et 10^{-4} , l'indice 5 correspondant aux probabilités les plus fortes). Dans une démarche usuelle semi-quantitative, les classes de probabilités utilisées sont graduées tous les $1/10^{\text{ème}}$. Les conséquences sont quant à elles caractérisées par un indice de gravité.

Dans les EDD françaises, les accidents dont les effets sortent des limites du site sont caractérisés en probabilité d'occurrence et en gravité selon une échelle définie dans l'Annexe 1 de l'arrêté du 29 septembre 2005. Ces accidents sont ensuite positionnés dans une grille présentée dans la circulaire du 10 mai 2010². Le référentiel $\Omega 9 [10]$, relatif aux EDD des installations classées, reprend ces éléments.

L'échelle de probabilité définie dans l'Annexe 1 de l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005³, est présentée ci-dessous. La fenêtre temporelle retenue est l'année.

² 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 (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003.

³ Arrêté du 29 septembre 2005, dit arrêté PCIG, relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation.

Tableau 1: Échelle de probabilité

Echelle de probabilité	E	D	C	B	A
Qualitative (si le REX est suffisant)	« événement possible mais non rencontré au niveau mondial » : n'est pas impossible au vu des connaissances actuelles	« événement très improbable » : s'est déjà produit mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement la probabilité de ce scénario	« événement improbable » : 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 apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité	« événement probable sur site » : s'est produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie des installations	« événement courant » : se produit sur le site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie des installations, malgré d'éventuelles mesures correctives
Semi-quantitative	Cette échelle est intermédiaire entre les échelles qualitative et quantitative, et permet de tenir compte de la cotation des mesures de maîtrise des risques mises en place				
Quantitative (par unité et par an)		10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²

Il s'agit d'une échelle de caractérisation du phénomène dangereux et de l'accident qui sont des événements a priori rares. Les libellés qualitatifs qui y sont proposés ("Évènement possible mais extrêmement improbable", "Évènement très improbable" etc.) et qui sont mis en relation avec des classes quantitatives ont été définis en cohérence avec la faible probabilité d'occurrence de ces événements.

Or les événements initiateurs (EI) sont par nature plus fréquents que l'accident dont on cherche à évaluer la probabilité d'occurrence. Un événement peut être beaucoup plus fréquent qu'une fois tous les ans : par exemple, il peut survenir tous les mois (donc au moins 10 fois par an) ou même tous les jours (donc au moins 100 fois par an). Sa fréquence est donc nettement supérieure à 1 par an. Il serait donc nécessaire de prolonger plus finement l'échelle de fréquence vers les classes élevées pour pouvoir caractériser ces événements initiateurs ou événements redoutés centraux fréquents.

L'échelle de probabilité de l'arrêté du 29/09/2005 ne peut donc a priori pas être utilisée comme base pour l'étude des événements initiateurs ou événements redoutés centraux. Dans le cas d'un traitement semi-quantitatif du nœud papillon, l'INERIS propose l'utilisation de plages de fréquence pour les EI et ERC de la forme suivante :

Tableau 2 : Échelle de classe de fréquence utilisée par l'INERIS pour les EI

F-2	10 ⁺¹ /an ≤ Fréquence < 10 ⁺² /an	10 à 100 fois/an
F-1	1/an ≤ Fréquence < 10 ⁺¹ /an	1 à 10 fois/an
F0	10 ⁻¹ /an ≤ Fréquence < 1/an	1 fois tous les 1 à 10 ans
F1	10 ⁻² /an ≤ Fréquence < 10 ⁻¹ /an	1 fois tous les 10 à 100 ans
F2	10 ⁻³ /an ≤ Fréquence < 10 ⁻² /an	1 fois tous les 100 à 1000 ans
		...
Fx	10 ^{-(x+1)} /an ≤ Fréquence < 10 ^{-x} /an	

Par exemple, si la vanne en aval d'un équipement s'est bloquée 4 fois dans l'année, la classe de fréquence retenue sera : F-1. En fin de processus d'estimation de la probabilité, notamment suite à la prise en compte des barrières de sécurité, une conversion vers l'échelle réglementaire (classes A à E) sera réalisée pour les PHD et les accidents majeurs.

3.2 REPRÉSENTATION DES SCÉNARIOS D'ACCIDENT

Un scénario d'accident décrit l'ensemble du déroulement potentiel aboutissant à un accident dont on veut estimer la probabilité d'occurrence, à partir d'une dérive ou défaillance, en déterminant les causes puis les conséquences potentielles sur les enjeux. Ainsi, un phénomène dangereux donné peut provenir de plusieurs scénarios (ou chemins).

En préalable à la représentation des scénarios d'accident sous forme graphique, il convient de bien déterminer les événements susceptibles de conduire à un accident (EI, ERC, phénomènes dangereux, ...). Cette identification peut se faire à partir de méthodes d'analyses de risques qualitatives telles que l'APR (Analyse Préliminaire des Risques) ou l'HAZOP (HAZard and OPerability study).

La représentation sous forme d'arbres est la méthode la plus largement employée dans l'étude des risques industriels et s'adapte à la quantification. Sont ainsi présentés ci-après les principes de construction :

- de l'arbre des défaillances, qui s'applique généralement à la description des événements survenant en amont d'un ERC, et qui permet de déterminer la probabilité de l'ERC à partir des EI ;
- de l'arbre des événements, qui s'applique généralement à la description des événements survenant en aval d'un ERC, et qui permet de déterminer la probabilité des phénomènes dangereux (PHD) et des accidents à partir des ERC ;
- du nœud papillon, qui agrège les représentations graphiques précédentes et qui permet de déterminer la probabilité des ERC, PHD, des accidents à partir des EI et des barrières de sécurité prévues (architecture de sécurité) en vue de minimiser les risques d'accidents.

On peut distinguer deux types de barrières de sécurité :

- La barrière de prévention est placée en amont de l'ERC. Elle a pour objectif de prévenir l'occurrence de l'ERC et son bon fonctionnement peut mener à deux situations :
 - soit la séquence accidentelle s'arrête (considérée comme suffisamment maîtrisée) ;
 - soit un nouveau scénario d'accident est créé (par exemple : ouverture de soupape et création d'un nuage de gaz inflammable). D'autres PHD d'intensités a priori plus faibles peuvent ainsi être générés.

Si la barrière ne fonctionne pas, la suite du scénario d'accident est déroulée.

Ce type de barrière permet de réduire la probabilité d'occurrence de l'ERC, et par extension celle de l'accident.

- La barrière de protection est placée en aval de l'ERC. Elle a pour but de protéger le milieu environnant. En effet, l'ERC ayant déjà eu lieu le scénario d'accident ne peut pas être stoppé et aboutira à un PHD.

Aussi, si la barrière de protection fonctionne, le scénario initial existe toujours mais :

- est de gravité a priori moindre : le fonctionnement de la barrière joue sur la réduction de la durée et/ou de l'intensité du phénomène dangereux et/ou sur l'atteinte des enjeux ;
- est de probabilité proche : la probabilité de fonctionnement sur sollicitation d'une barrière performante est généralement supposée proche de 1.

Si elle ne fonctionne pas, le scénario initial se réalise et :

- est de gravité équivalente ;
- est de probabilité plus faible : la probabilité de défaillance sur sollicitation d'une barrière performante est en règle générale inférieure ou égale à 0,1.

3.2.1 AMONT DE L'ERC : ARBRE DE DÉFAILLANCES

L'arbre de défaillances est une représentation graphique des combinaisons d'évènements élémentaires, aussi appelés défaillances, menant à la réalisation d'un évènement prédéfini appelé « évènement indésirable » ou « évènement redouté ».

Le traitement qualitatif de l'arbre des défaillances permet de déterminer les différentes coupes minimales, c'est-à-dire les ensembles d'évènements élémentaires nécessaires et suffisants pour provoquer l'évènement redouté.

Le traitement mathématique de l'arbre permet d'évaluer la probabilité d'occurrence de l'évènement indésirable sommet (ou d'évènements intermédiaires) à partir des probabilités d'occurrence des évènements élémentaires.

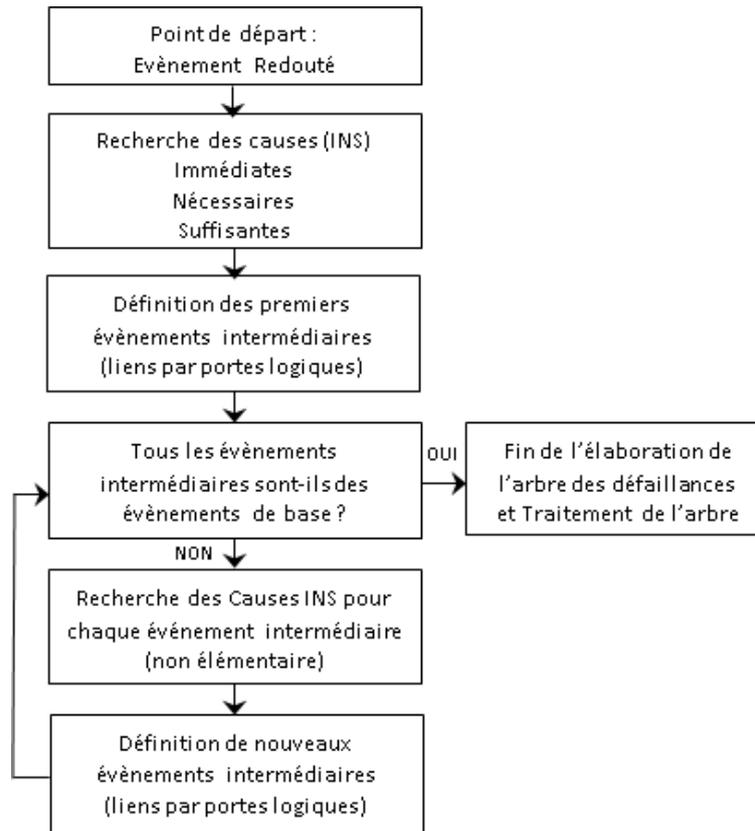
Dans le cadre d'une enquête après accident, des arbres similaires peuvent être établis pour essayer de présenter la ou les causes possibles de l'accident, on parle alors d'arbre des causes.

3.2.1.1 PRINCIPE DE CONSTRUCTION DE L'ARBRE

Si pour la même installation, plusieurs arbres sont à réaliser, il convient de bien définir une méthodologie de construction et le niveau de détail voulu pour garantir la cohérence entre les différents arbres.

La construction de l'arbre des défaillances vise à déterminer les combinaisons d'évènements pouvant conduire à l'évènement indésirable retenu. Cette analyse se termine lorsque toutes les causes potentielles correspondent à des évènements élémentaires.

L'élaboration de l'arbre des défaillances suit le déroulement suivant :



La recherche systématique des causes immédiates, nécessaires et suffisantes des évènements intermédiaires est donc à la base de la construction de l'arbre. Il s'agit probablement de l'étape la plus délicate et il apparaît donc comme extrêmement utile de procéder à cette construction au sein d'un groupe de travail pluridisciplinaire. À ce titre, la mise en œuvre préalable d'autres méthodes d'analyse des risques peut faciliter la recherche des défaillances pour l'élaboration de l'arbre.

Enfin, il est nécessaire de respecter certaines règles supplémentaires durant la construction de l'arbre à savoir :

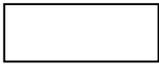
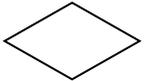
- vérifier que le système est cohérent :
 - la défaillance de tous ses composants entraîne la défaillance du système ;
 - le bon fonctionnement de tous ses composants entraîne le bon fonctionnement du système ;
 - lorsque le système est en panne, le fait de considérer une nouvelle défaillance ne rétablit pas le fonctionnement du système ;
 - lorsque le système fonctionne correctement, la suppression d'une défaillance ne provoque pas la défaillance du système.

Il peut en effet arriver qu'une défaillance survenant sur un composant annule les effets d'une défaillance antérieure et permet ainsi le fonctionnement du système. Dans un tel cas de figure (système non cohérent), le deuxième composant doit être supposé, dans l'analyse, en fonctionnement lorsque la première défaillance survient.

- s'assurer que tous les évènements d'entrée d'une porte logique ont bien été identifiés avant d'analyser leurs causes respectives ;
- éviter de connecter directement deux portes logiques ;
- vérifier que les évènements en amont immédiat d'une même porte sont indépendants⁴.

3.2.1.2 LES SYMBOLES

Les principaux symboles utilisés pour la construction des arbres sont les suivants :

Symbole	Description
	Élément intermédiaire Élément relatif à un événement qui a au moins un antécédent « cause » relié avec une porte logique.
	Porte « ET » L'évènement de sortie se réalise si tous les évènements reliés à la porte se réalisent en même temps.
	Porte « OU » L'évènement de sortie se réalise si seulement un seul des évènements reliés à la porte se réalise.
	Porte « K sur N » L'évènement de sortie se réalise si K évènement parmi les N reliés à la porte se réalisent en même temps.
	Élément de base Élément relatif à un événement qui ne nécessite pas de développement, les limites de résolution sont atteintes.
	Transfert Ce triangle indique que l'arbre correspondant à l'évènement auquel il est relié est développé séparément.
	Évènement non développé L'évènement ne sera pas développé car soit ces conséquences sont trop faibles, soit il n'y a pas d'informations disponibles.

⁴ Pour des applications spécifiques, il est possible de considérer des évènements dépendants en vue de déterminer la probabilité de la combinaison de ces évènements. Dans ce cas, le lecteur pourra s'appuyer sur les considérations exposées dans la norme ISO/TR 12489:2013.

3.2.1.3 EXEMPLE D'ARBRE

En définitive, l'application de ces règles aux réflexions menées peut conduire à la construction d'un arbre de la forme suivante :

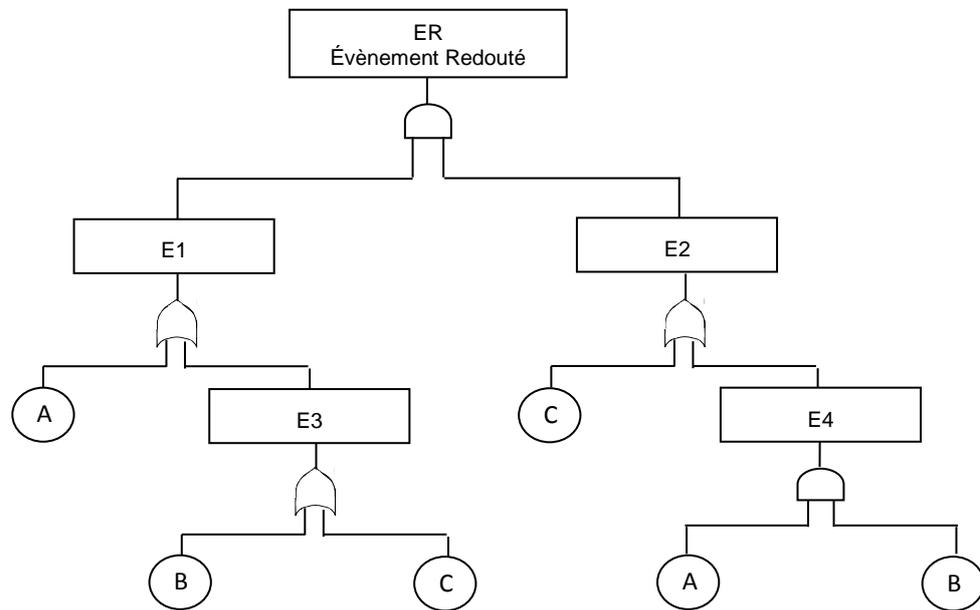


Figure 3 : Exemple d'arbre des défaillances

3.2.1.4 COMMENTAIRES SUR LA MÉTHODE

Limites

Le modèle de l'arbre des défaillances est booléen : un événement à seulement 2 états, vrai ou faux, les modes dégradés ne sont pas pris en compte.

L'arbre des défaillances ne prend pas en compte l'aspect temporel et l'ordre dans lequel doivent se réaliser les événements élémentaires pour aboutir à l'évènement redouté.

Une méthode simple et facilement applicable

La méthode de l'arbre de défaillances est très formalisée, elle permet d'avoir une bonne vision des différentes causes et de leurs combinaisons. Après recherche des coupes minimales (voir § 6.1.2), elle permet d'identifier les chemins critiques et permet de « focaliser » sur les causes primaires d'un évènement dans une politique de réduction de la probabilité d'occurrence de l'évènement (étude de sensibilité).

L'arbre des causes est une méthode déductive qui peut être aussi bien utilisée qualitativement que quantitativement.

Cette méthode s'adapte très bien à la communication et est facilement compréhensible.

Une méthode coûteuse

Elle s'applique seulement à des systèmes dont on est capable de décrire le fonctionnement ou les scénarios menant à l'ERC de façon complète.

La quantification des arbres nécessite la connaissance des probabilités des événements de base, or il n'existe pas toujours de données à ce sujet.

Pour les systèmes complexes, il est conseillé de mettre en œuvre des outils spécifiques car le calcul des coupes minimales (notion définie au § 6.1.2) peut facilement devenir très fastidieux et source d'erreurs.

3.2.2 AVAL DE L'ERC : ARBRES DES ÉVÈNEMENTS

Le principe des arbres des évènements consiste à considérer un événement ou une défaillance, et à regarder l'enchaînement des événements possibles qui en découlent.

La démarche généralement retenue pour réaliser une analyse par arbre des évènements est la suivante :

- définir l'évènement initial à considérer ;
- identifier les fonctions de sécurité prévues pour y faire face ou les paramètres qui peuvent influencer le déroulement du scénario à partir de l'évènement initial ;
- construire l'arbre ;
- décrire et exploiter les séquences d'évènements identifiées.

3.2.2.1 PRINCIPE DE CONSTRUCTION DE L'ARBRE

À partir de l'évènement initial, il faut déterminer les différentes fonctions de sécurité assurées par des barrières en réponse à l'évènement initial. Elles ont en général pour objectif d'empêcher que l'évènement initial soit à l'origine d'un phénomène dangereux ou d'en minimiser la gravité potentielle.

Les paramètres pouvant influencer le déroulement du scénario peuvent être par exemple la présence d'une source d'inflammation qui transformerait une fuite de gaz inflammable en feu torche.

Les différentes barrières de sécurité et paramètres n'intervenant généralement pas de manière simultanée, une fois identifiés, ces derniers doivent être classés par ordre chronologique d'action. Le plus simple est de réaliser un tableau chronologique récapitulatif des différentes fonctions et de leurs paramètres.

La construction de l'arbre consiste alors, à partir de l'évènement initial, à envisager soit le bon fonctionnement soit la défaillance des barrières de sécurité les unes après les autres ou alors la survenue du paramètre.

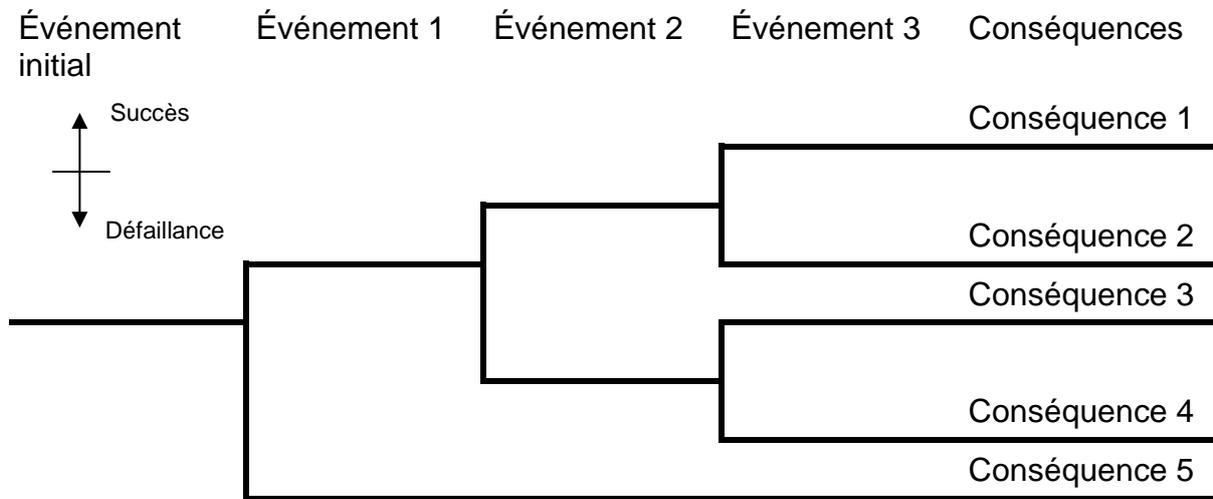
Cette démarche temporelle permet en définitive d'identifier des séquences d'évènements susceptibles de conduire ou non à un accident potentiel. Elle n'est cependant généralement pas suffisante en vue de construire un arbre. Il est ainsi indispensable durant la construction de l'arbre d'observer les points suivants :

- si une barrière dépend du fonctionnement d'autres barrières, elle doit être considérée après ces barrières ;
- si l'échec d'une barrière implique automatiquement l'échec d'autres barrières, le succès de ces dernières n'est pas à considérer. Ainsi, si la défaillance d'un sous-système entraîne la défaillance commune de plusieurs barrières assurant des fonctions de sécurité, ce sous-système doit être considéré avant ces systèmes. Ce cas de figure envisage ainsi les défaillances de mode commun.

Le respect de ces règles et l'élimination des branches physiquement impossibles conduit à l'élaboration d'un arbre des évènements réduit.

3.2.2.2 EXEMPLE D'ARBRE

La représentation graphique de l'arbre d'événement est de type⁵ :



Les événements retenus peuvent être le fonctionnement des barrières de sécurité ou d'autres événements ayant un impact sur la séquence accidentelle (présence d'une source d'inflammation pour une fuite de nuage inflammable par exemple).

Comme pour l'arbre de défaillances, la définition de l'événement initial est importante et va conditionner le bon déroulement de l'analyse par arbre d'événements. En effet, cette démarche peut devenir très lourde si l'événement initial est mal choisi. Dans le cadre d'une étude de sécurité, l'événement initial est choisi parmi les événements redoutés centraux pouvant conduire à un phénomène dangereux. Ceci suppose donc de connaître, au moins de manière partielle, les principaux risques associés à l'installation considérée.

L'ordre de prise en compte des événements modifie la présentation de l'arbre mais ne modifie pas le calcul de la fréquence de la conséquence ; à partir d'une même fréquence d'occurrence de l'événement initial, on obtient les mêmes fréquences de la conséquence quelle que soit la représentation. Cependant il est plus facile de travailler avec des arbres les plus réduits possibles.

3.2.2.3 COMMENTAIRES SUR LA MÉTHODE

Limite

Les paramètres ne peuvent se représenter que sous forme d'événement booléen.

Une méthode simple et facilement applicable

La méthode de l'arbre des événements est très formalisée, elle permet d'avoir une bonne vision des différentes conséquences et de leur combinaison.

L'arbre des événements est une méthode inductive qui peut être aussi bien utilisée qualitativement que quantitativement.

Cette méthode s'adapte très bien à la communication et est facilement compréhensible.

⁵ Dans l'exemple présenté, le « succès » des événements susceptibles de survenir est représenté vers le haut. Une représentation inverse est également possible.

Une méthode coûteuse

La construction de l'arbre et son exhaustivité sont basées sur une bonne connaissance des scénarios susceptibles de survenir. La quantification des arbres nécessite la connaissance des probabilités des événements de base, or il n'existe pas toujours de données à ce sujet.

A l'instar de l'arbre de défaillances, la construction de l'arbre peut facilement devenir très fastidieuse et source d'erreurs.

3.2.3 REPRÉSENTATION DES SCÉNARIOS D'ACCIDENTS SOUS FORME DE NŒUD PAPILLON

La représentation des scénarios d'accidents sous la forme de nœud papillon, qui combine, pour un système, arbre de défaillances et arbre d'événements, est très répandue en France. Même si l'origine de la méthode est sans doute antérieure, c'est dans la première moitié des années 90 que le groupe Royal Dutch/Shell a développé de manière conséquente la technique du nœud papillon, suite à l'accident de la plateforme pétrolière Piper Alpha survenu en Mer du Nord en 1988. Shell est dès lors connu comme étant la première grande société à avoir pleinement intégré la méthodologie du nœud papillon dans ses pratiques, avant qu'elle devienne une approche standard dans d'autres entreprises à la fin des années 90.

En règle générale, dans le cas d'une représentation sous forme de nœud papillon :

- l'Évènement Redouté Central est l'évènement indésirable sommet de l'arbre des défaillances;
- les événements initiateurs et les défaillances des barrières de prévention sont les événements élémentaires utilisés dans la construction de l'arbre.

Ainsi, cette représentation des scénarios d'accidents donne un aperçu global des enchaînements menant aux accidents dont on veut estimer la probabilité d'occurrence, en mettant en évidence les différentes causes possibles avec les liens logiques existant entre elles et en mettant en valeur les barrières de sécurité permettant de réduire leur probabilité d'occurrence. De plus, la représentation permet de visualiser les chemins critiques, c'est à dire d'identifier les branches causales les plus contributives à l'occurrence du scénario d'accident en vue d'améliorer la maîtrise des risques.

Le nœud papillon, s'il est correctement construit, s'avère être un support privilégié d'agrégation des données de fréquences et de probabilités le long d'un scénario d'accident.

Un nœud papillon se présente généralement de la manière suivante :

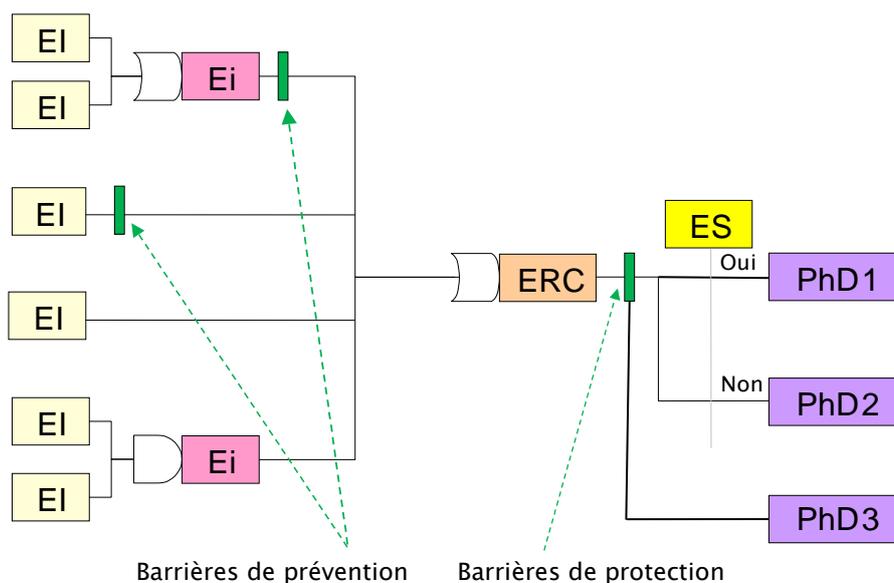


Figure 4 : Représentation d'un scénario d'accident sous forme de nœud papillon

Légende :

EI : Événement Initiateur

Ei : Événement Intermédiaire

ERC : Événement Redouté Central. Il s'agit généralement d'une perte de confinement.

ES : Événement Secondaire. Il peut s'agir d'une inflammation d'un nuage de gaz, qui peut être soit immédiate (et donnera lieu à un feu torche par exemple), soit retardée (et donnera lieu à un UVCE par exemple).

PHD : Phénomène Dangereux. Les PHD correspondent à des phénomènes tels que des explosions, incendies, dispersions toxiques, mettant en œuvre des substances et mélanges dangereux et pouvant porter atteinte à des intérêts à protéger.

Les événements initiateurs peuvent être de natures différentes :

Tableau 3 : Les grandes catégories d'événements initiateurs

Typologie des causes / événements initiateurs	Exemple d'événements initiateurs
Causes externes à l'établissement et naturelles	Séisme, Glissement de terrain, volcan, feu de forêt
	Inondation
	Vent, tempête, neige
	Foudre
Causes externes à l'établissement et d'origine anthropique	Chute d'avions
	Effets dominos externes (rupture de canalisation, trafic sur voies externes au site, etc.)
Causes internes à l'établissement mais externes aux installations	Intervention externe (travaux, choc d'un engin, etc.)
	Effets dominos internes
Causes internes aux installations	Défaillance interne (technique ou humaine)
	Effets dominos internes

Note :

Les méthodes décrites ci-avant sont adaptées aux événements de nature stochastique. Les événements de natures malveillante et terroriste, qui résultent d'actes intentionnels, ne peuvent donc pas être étudiés de cette manière. Ainsi, la réglementation française en exclut l'étude dans le cadre des EDD (cf. circulaire du 10/05/2010). De plus, étant donné le faible retour d'expérience de ces événements, il apparaît difficile d'en estimer une fréquence d'occurrence.

Les barrières de sécurité (prévention ou protection) sont prises en compte comme explicité au § 3.2. Pour illustration, voici un exemple de nœud papillon construit à partir d'une analyse des risques d'une tuyauterie transportant un produit toxique :

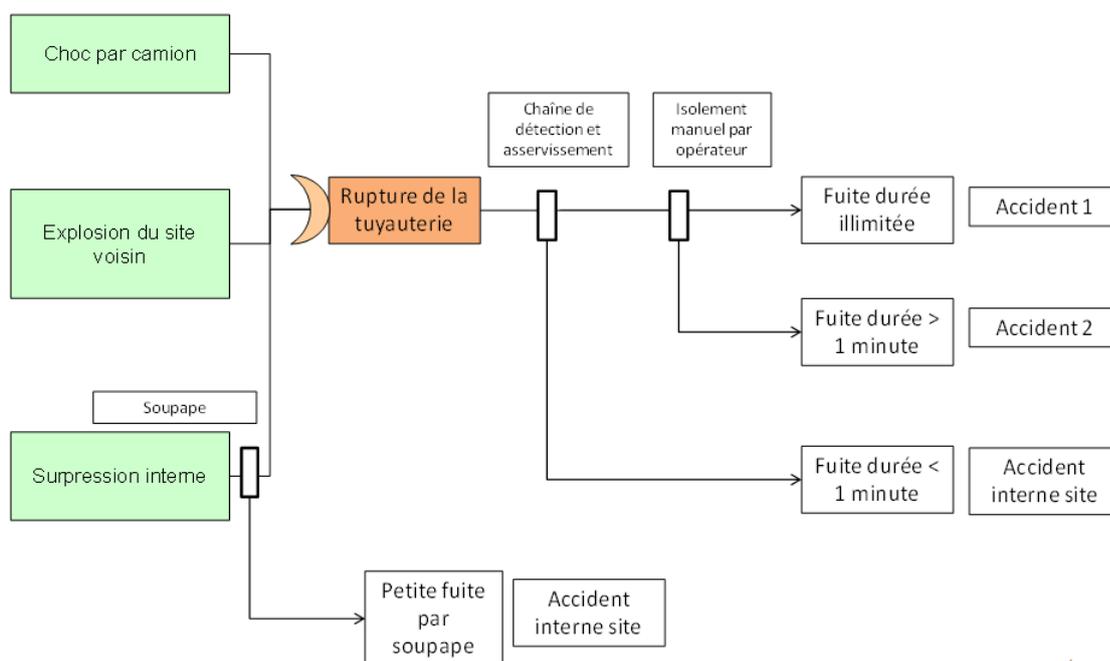


Figure 5 : Nœud papillon d'une rupture de tuyauterie

Règles de bonnes pratiques – Écueils à éviter

La construction d'un nœud papillon, support de l'estimation probabiliste, doit être correctement réalisée en vérifiant notamment les points cités ci-dessous :

- Traitement exhaustif des données issues de l'analyse de risques, menée selon les règles de l'art (méthodologie adaptée et respectée) ;
- Dans le cadre des EDD, identification des événements initiateurs qui peuvent ne pas être retenus dans la quantification probabiliste (voir paragraphe 5.2) ;
- Sélection préalable des barrières de sécurité suffisamment performantes et adaptées aux événements (respect des critères explicités dans les référentiels $\Omega 10$ [3] et $\Omega 20$ [5]) ;
- Positionnement correct des barrières de sécurité sur le nœud papillon (affectation de la bonne barrière pour le bon scénario). Une attention particulière est à apporter à l'emplacement des barrières dans le nœud papillon : une barrière ne peut pas être valorisée plusieurs fois sur le même scénario d'accident ;

- Bien identifier les barrières qui, bien que positionnées sur plusieurs chemins conduisant au même accident, ont une performance qui diffère selon la séquence accidentelle (par exemple : disque de rupture dimensionné à une partie seulement des événements initiateurs identifiés) ;
- Prise en compte des sous-scénarios engendrés par le fonctionnement des barrières de sécurité (ex : ouverture des soupapes de sécurité).

Ces règles sont notamment rappelées dans le référentiel Ω 9 [10] pour ce qui concerne la réalisation des EDD pour répondre aux exigences de la réglementation française.

3.2.4 SYNTHÈSE SUR LES APPROCHES ARBORESCENTES

L'approche par arbre donne une bonne vision des enchaînements et permet de guider la recherche des solutions les plus efficaces de réduction du risque à la source. Elle peut être adaptée en fonction des données disponibles et des objectifs ; par exemple, il est possible de considérer l'arbre de défaillances et l'arbre des événements séparément ou de coupler les deux approches sous forme de nœud papillon.

Le traitement probabiliste des ERC se fait par agrégation des différents scénarios menant à un même ERC, ce qui ne pose pas de difficultés majeures dans la mesure où l'on sélectionne au préalable une coupe minimale évitant toute redondance.

De manière générale, l'estimation probabiliste d'un phénomène dangereux nécessite un soin particulier dans la mesure où les nœuds-papillons (conjugaison d'un arbre de défaillances et d'un arbre d'événements) sont centrés sur les ERC et non sur les phénomènes. Ainsi, plusieurs ERC différents peuvent mener au même phénomène dangereux (ex : feu de cuvette). Dans ce cas, s'ils n'ont aucune cause commune, alors l'estimation de la fréquence du phénomène dangereux s'effectue de manière simple en agrégeant les fréquences des différents ERC – exactement comme lorsqu'on agrège les différentes branches menant à un ERC donné.

En revanche, il est possible que ces ERC aient des causes en commun, telles : chocs, défaillance de la régulation de pression, perte d'utilité... Dans ce cas un travail spécifique est nécessaire pour dessiner un nouvel arbre de défaillances considérant toutes les causes qui aboutissent au phénomène dangereux, via divers ERC, et en déterminer une coupe minimale (voir § 6.1.2).

Une autre manière de se focaliser sur les phénomènes dangereux est de centrer le nœud papillon sur le phénomène dangereux considéré et d'avoir la même démarche qu'avec l'événement redouté central. De manière pratique, il est souvent plus aisé de travailler sur l'événement redouté central car, dans la plupart des cas, un seul ERC peut générer plusieurs phénomènes dangereux.

Le traitement probabiliste d'un scénario d'accident donné est relativement simple (cf. chapitre 6).

La présentation par « arbres » est adaptée à des systèmes dont le niveau de connaissance est élevé ou peu complexes⁶. Il est très important de définir au préalable le niveau de détail requis et la méthode qui va être utilisée pour construire l'arbre en fonction des objectifs et des contraintes. De manière générale, plus un arbre est complexe ou exhaustif plus les probabilités doivent être précises.

⁶ La complexité s'entend ici à des systèmes ne pouvant pas être décrit facilement notamment par manque de connaissance de son fonctionnement.

L'approche par arbre ou par nœud papillon permet notamment de répondre aux besoins de la réglementation sur l'estimation des probabilités des accidents potentiels et, par ailleurs, d'identifier les chemins critiques conduisant à ces accidents.

Les avantages et inconvénients des approches arborescentes sont présentés de façon synthétique ci-après :

- les avantages :
 - facile, traçable, communicable ;
 - adaptable à de nombreuses méthodes d'analyse de risques telles que l'APR ou HAZOP ;
 - employable aussi bien dans le cadre d'une approche quantitative que d'une approche semi-quantitative ;
 - permet l'identification des chemins « critiques » ou l'étude de sensibilité des systèmes.
- les inconvénients :
 - peu adapté à des systèmes complexes ;
 - méthodes lourdes à mettre en œuvre, surtout lorsqu'il y a des causes communes ;
 - ne permet pas de voir la dépendance temporelle des événements ;
 - la disponibilité, l'adéquation et les incertitudes des données influent sur la quantification lors d'une utilisation purement quantitative. Cependant il existe des solutions partielles : méthodes de Monté Carlo et/ou approche Bayésienne (ces approches ne sont pas traitées dans le présent document).

4. CHOIX D'UNE MÉTHODE D'ESTIMATION DE LA PROBABILITÉ

4.1 DIFFÉRENTES APPROCHES POSSIBLES POUR L'ESTIMATION DE LA PROBABILITÉ

Il existe plusieurs méthodes d'estimation de la probabilité d'occurrence des accidents. La méthode retenue dépendra des données à disposition et de la finesse de la modélisation du système que l'on cherche à étudier (principe de proportionnalité).

L'estimation de la probabilité d'occurrence des accidents peut se faire de manière qualitative, au moyen de calculs en utilisant des classes de probabilité (méthode semi-quantitative) ou des valeurs (méthode quantitative). Ces différentes méthodes sont présentées dans les paragraphes ci-après.

4.1.1 L'APPROCHE QUALITATIVE

L'approche qualitative se traduit par une estimation des fréquences réalisée sans faire intervenir de valeur ni de calcul. Il s'agit d'estimer si ce type d'événement est :

- extrêmement improbable ;
- improbable ;
- probable ...

Plus souvent, un retour d'expérience non chiffré est utilisé, comme par exemple :

- ne s'est jamais produit ;
- ne s'est pas produit sur le site mais dans des installations similaires ;
- s'est déjà produit sur le site ...

Cette approche se base principalement sur le retour d'expérience, les dires d'experts et les bonnes pratiques. Elle présente l'avantage d'être rapide et relativement simple à mettre en œuvre, l'expert se basant sur l'expérience acquise dans le domaine dans lequel se fait l'étude pour évaluer le risque.

Néanmoins, la démarche reste très approximative et peu fiable (par exemple, le REX peut ne pas être exploitable si l'échantillon utilisé n'est pas représentatif). De manière générale, cette approche ne considère que les événements passés sans considération de la taille de l'échantillon et ne se projette pas dans l'avenir.

À notre connaissance, cette approche n'est pas ou très peu utilisée dans le cadre de la réalisation des études de sécurité et/ou de dangers. De plus, et sauf cas particulier, nous ne considérons pas cette approche comme suffisamment robuste dans le cadre d'un processus de maîtrise des risques. Ainsi, cette méthode ne sera pas étudiée plus en détails dans ce document.

4.1.2 L'APPROCHE SEMI-QUANTITATIVE

Dans une approche semi-quantifiée, la probabilité d'occurrence de l'accident est estimée sous forme de classe (intervalle de probabilité). Les données d'entrée pour caractériser les événements initiateurs et les barrières de sécurité sont des classes et les probabilités conditionnelles des événements secondaires sont des ordres de grandeurs. La détermination de ces données d'entrée est abordée au chapitre 5.

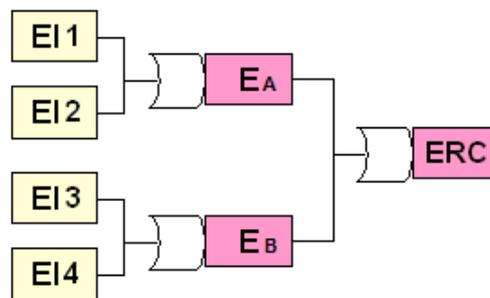
L'estimation de la probabilité finale peut être réalisée sans ou avec prise en compte des événements en amont de l'événement à caractériser (voir exemples ci-après). Les règles mathématiques associées à cette approche sont présentées en détails dans le référentiel Ω 25 [1].

4.1.2.1 APPROCHE TRADITIONNELLE (SANS HISTORIQUE)

Cette approche est celle couramment utilisée dans les études de sécurité et/ou de dangers où l'utilisation de classes est admise pour démontrer l'acceptabilité des risques. Les règles de calcul sont extrêmement simplifiées mais à utiliser avec précaution dans le cas de nœuds papillon complexes.

Dans cette approche, la classe de probabilité d'un élément est déterminée à partir des classes d'événement des éléments directement en amont de la porte qui lui est associée et ainsi de suite jusqu'à déterminer la classe de probabilité de l'ERC, du PHD ou de l'accident selon les besoins.

Si l'on considère le nœud papillon suivant, la classe de l'ERC est déterminée à partir des classes des événements E_A et E_B , eux-mêmes déterminés par les classes des événements E_1 et E_2 pour l'événement E_A , et E_3 et E_4 pour l'événement E_B .



Dans l'approche sans historique, la classe de probabilité d'un événement (ici de l'ERC) est estimée en prenant en compte les classes de fréquences des événements intermédiaires (ici E_A et E_B) sans tenir compte de l'historique complet des classes de fréquences de tous les événements situés en amont (ici E_1 à E_4)

4.1.2.2 APPROCHE AVEC HISTORIQUE

Une nouvelle approche a été développée par l'INERIS. Il s'agit du traitement semi-quantitatif avec historique du nœud papillon. Complémentairement à l'approche précédente, les règles de calcul tiennent ici compte de l'historique, c'est-à-dire qu'elles permettent de tracer la suite d'événements menant à la porte étudiée, et non pas de seulement considérer les événements directement en amont de la porte. Dans l'exemple précédent, cela signifie que la classe de fréquence de l'ERC est estimée directement à partir des classes de fréquences des événements initiateurs E_1 à E_4 et non par l'intermédiaire du calcul des classes de fréquences des éléments E_A et E_B . Ce mode de calcul présente des formules assez simples pour les portes OU et les barrières de sécurité. Il présente également l'avantage de tenir compte du cumul de plusieurs événements de même classe dans le nœud-papillon.

4.1.2.3 APPROCHE SEMI-QUANTITATIVE ET DONNÉES QUANTIFIÉES

Dans le cas où l'on possède comme données d'entrée une fréquence quantifiée adaptée au contexte, et que l'on choisit de convertir la fréquence en classe pour effectuer le traitement semi-quantitatif⁷, les formules du traitement semi-quantitatif vont revenir à attribuer une valeur arbitraire à cette fréquence alors que l'on en connaissait une valeur plus précise (à l'incertitude près). Si les données sont fiables, la conversion en classe :

- introduit une étape supplémentaire dans le traitement ;
- provoque une perte d'information pouvant conduire à une mauvaise-estimation du risque : par exemple, un EI de fréquence 9.10^{-3} / an sera au travers des règles de calculs beaucoup plus pénalisant qu'un EI de classe F2 ;
- demande l'utilisation de règles de calculs plus complexes et moins rigoureuses que l'approche quantitative.

Si en pratique on choisit de convertir les valeurs en classes de fréquence, il faut garder à l'esprit ces différentes limites (notamment pour les valeurs proches des bornes des intervalles), en particulier la sous-estimation potentielle du risque.

De plus, il est à noter qu'introduire une règle de calcul sur des classes revient implicitement à associer une valeur quantifiée exacte à une classe. Ainsi, des écarts (effets de seuil) peuvent apparaître en raison des simplifications qui ont été réalisées sur les formules des méthodes semi-quantitatives pour les rendre facilement utilisables.

Aussi, lorsque des données fiables existent et/ou que les enjeux sont importants, il est recommandé de suivre une approche quantitative.

4.1.3 L'APPROCHE QUANTITATIVE

Dans cette approche, les fréquences d'occurrence des événements initiateurs, les probabilités de défaillance à la sollicitation des barrières de sécurité et les probabilités conditionnelles des événements secondaires sont des valeurs.

Dans la mesure où les données utilisées sont fiables et que les incertitudes associées sont connues et prises en compte, ce mode de calcul est celui qui assure la meilleure estimation de la valeur moyenne de la fréquence de l'ERC ou du PHD que l'on cherche à connaître, en permettant de ne perdre aucune information sur les données d'entrée à l'instar du traitement semi-quantitatif.

D'autre part, les règles mathématiques associées à cette approche sont généralement très simples : une addition ou une multiplication. Les règles générales encadrant cette approche sont introduites au chapitre 6.

⁷ Certaines méthodes de calculs relatives aux approches quantitatives sont applicables dans des approches semi-quantifiées, par exemple en utilisant comme classe de fréquence le logarithme de la fréquence (une fréquence de 1.10^{-3} /an/site correspond une classe de fréquence F3).

Points de vigilance :

- Il est impératif de réaliser les calculs de propagation dans le nœud papillon avec des fréquences pour les EI et les événements intermédiaires et des probabilités pour les barrières de sécurité et les ES, et de ne convertir en POA qu'au niveau de l'ERC et des PHD. Cela permet d'éviter de nombreuses erreurs de confusion entre fréquences et probabilités.
- Les incertitudes associées aux données d'entrée utilisées sous forme de valeurs sont à prendre en compte dans le choix de l'approche suivie pour quantifier le nœud papillon. Si les données ne sont pas suffisamment fiables, les incertitudes associées peuvent en effet être telles que les valeurs deviennent moins précises qu'une classe de fréquences.
- Dans le cas où les données d'entrée sont sous forme de classe et que l'on souhaite les traiter de façon quantitative, elles devront être converties en valeurs quantifiées. Cette démarche présente l'inconvénient d'associer aux différents événements des valeurs exactes de fréquences alors que l'idée derrière l'introduction de classes est justement l'incertitude sur la valeur précise de la fréquence associée. Il s'agira donc de s'assurer que les incertitudes associées aux données d'entrée sont bien considérées ou, à défaut, que l'estimation est réalisée en appliquant des hypothèses prudentes.

4.2 DIFFÉRENTS POINTS DE DÉPART POSSIBLES POUR L'ESTIMATION QUANTITATIVE DE LA PROBABILITÉ D'UN ACCIDENT

Il existe 2 cheminements principaux, schématisés ci-après, pour estimer la probabilité d'occurrence d'un accident :

- de façon générique à partir de bases de données d'ERC ou de phénomènes dangereux,
- à partir des données descriptives des événements initiateurs (EI).

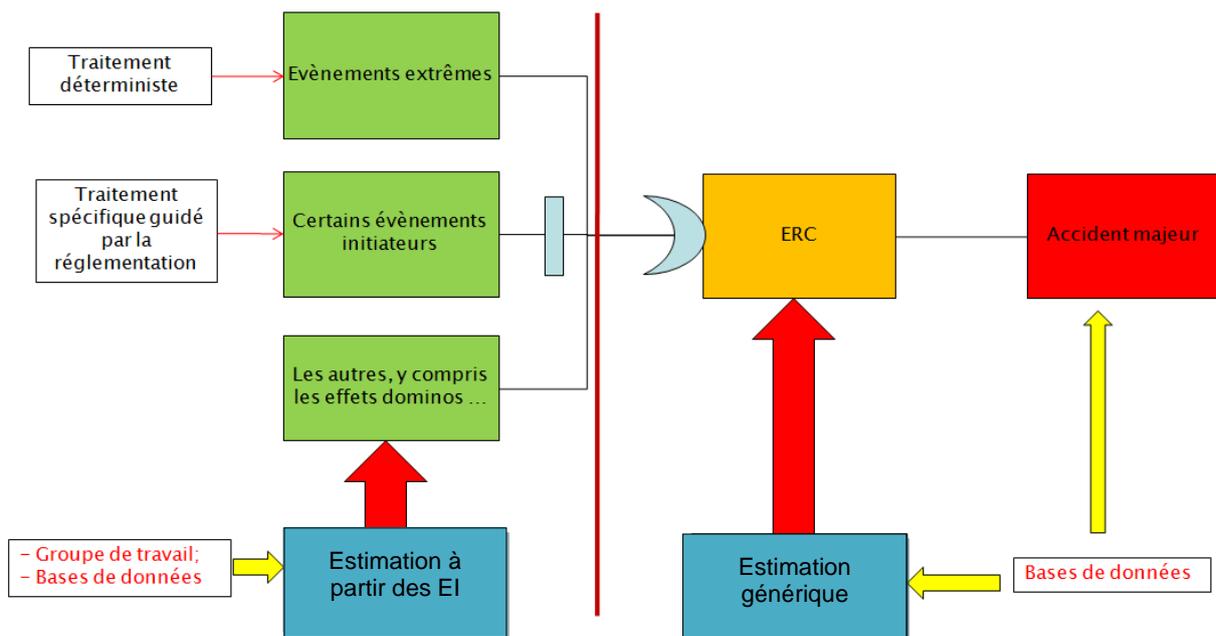


Figure 6: Différents points de départ pour l'estimation probabiliste

4.2.1 ESTIMATION GÉNÉRIQUE DE L'ERC OU DU PHD

Cette approche consiste à évaluer la probabilité d'occurrence à partir des ERC ou directement à partir du PHD. C'est une approche simplifiée et rapide. Elle est applicable, par exemple, lorsque l'installation est répandue dans l'industrie dans des configurations similaires ; c'est le cas notamment pour les dépôts de liquides inflammables (voir documents : Guide Dépôts de Liquides Inflammables, [8], [9]). Basée sur un retour d'expérience, elle permet a priori de bien apprécier la fréquence d'occurrence de l'accident potentiel.

De par son caractère générique, la difficulté principale de cette démarche est la justification de l'adéquation de la probabilité d'occurrence retenue avec le scénario étudié : la probabilité est-elle cohérente avec les barrières de sécurité en place au sein de l'installation étudiée et avec les événements initiateurs identifiés ? Les effets dominos des installations voisines (et donc spécifiques à la configuration du site) sont-ils pris en compte ?

Ainsi, la réalisation complémentaire d'une analyse des risques et de l'évaluation de la performance des barrières associées doit permettre de s'assurer que les conditions rencontrées (événements initiateurs particuliers, barrières de sécurité non performantes ou absentes, conditions climatiques spécifiques, etc.) dans le cas spécifique étudié sont proches de celles utilisées pour déterminer les probabilités⁸.

4.2.2 ESTIMATION À PARTIR DES EI

Cette approche consiste à évaluer la probabilité d'occurrence à partir des événements initiateurs. C'est l'approche classique la plus complète, aussi connue sous le nom d'approche « barrières ». L'avantage est que l'installation peut être particulière et tous les éléments spécifiques seront pris en compte dans l'estimation de la probabilité. Par exemple, elle est utile lorsque :

- l'étude porte sur une installation qui ne dispose pas suffisamment de retour d'expérience (installation qui n'a pas encore été beaucoup exploitée, installation unique ou peu présente dans le monde, etc.) et qu'il n'y a donc pas d'autre approche suffisamment fiable ;
- l'accident n'est pas acceptable : les mesures mises en place en prévention de l'événement redouté central doivent alors être valorisées ;
- l'installation comporte des barrières de sécurité particulières que l'on veut valoriser notamment dans le cadre du Système de Gestion de la Sécurité.

Cette approche est, en revanche, plus longue et peut être source d'estimation erronée et d'une maîtrise des risques inadaptée notamment si les fréquences unitaires retenues pour les événements initiateurs ou ERC ainsi que les probabilités de défaillance des barrières de sécurité sont estimées de façon inadaptée.

⁸ Cette analyse est à proportionner aux enjeux à protéger.

5. COLLECTE ET TRAITEMENT PROBABILISTE DES DONNÉES D'ENTRÉE

L'objectif de ce chapitre est de fournir des éléments pratiques pour collecter les données nécessaires à l'estimation de la probabilité d'occurrence des accidents.

5.1 LES DONNÉES D'ENTRÉE NÉCESSAIRES

Les données d'entrée nécessaires à l'estimation de la probabilité des accidents sont les suivantes :

- fréquence ou classe de fréquence d'occurrence annuelle des EI ou ERC (selon l'approche retenue). Par exemple⁹ :
 - si l'événement « vanne en aval bloquée » se produit entre 10^{-3} et 10^{-2} fois par an, il se verra attribuer une classe de fréquence F2 ;
 - le nombre d'erreurs lors des opérations de dépotage peut être donné par opération de dépotage (ex : une mauvaise connexion de flexible peut se produire à une fréquence de 10^{-3} /opération de dépotage). Il s'agit alors de se ramener à une fréquence annuelle en prenant en compte le nombre d'opérations de dépotage effectuées à l'année sur le site étudié ;
 - la fréquence d'occurrence annuelle de rupture d'une tuyauterie aérienne d'un diamètre nominal inférieur à 75 mm est estimée à 10^{-6} par mètre de tuyauterie¹⁰. La fréquence pourra être déterminée après avoir multiplié cette valeur par la longueur réelle de la tuyauterie.
- probabilité de défaillance des barrières de sécurité (qui est l'un des critères permettant d'évaluer la performance de la barrière dans son environnement d'utilisation).
- probabilité d'occurrence conditionnelle des événements secondaires (ES). Par exemple, la probabilité d'inflammation d'un nuage de gaz provenant de l'évaporation d'un liquide inflammable de catégorie 3 en zone classée ATEX avec présence de personnel occasionnelle peut être estimée à 10^{-21} .

Les données utilisées pour mener l'évaluation de la probabilité d'occurrence des phénomènes dangereux et leur adéquation avec la spécificité de l'installation considérée doivent être justifiées. Le retour d'expérience de l'installation ou d'installations similaires doit être préférentiellement étudié. Des moyens pour l'exploiter sont indiqués dans le rapport intitulé « Méthode d'évaluation des fréquences et des probabilités à partir des données de retour d'expérience » [6]. Dans le cas où le retour d'expérience est indisponible ou inadapté, d'autres données, provenant par exemple de bases de données génériques dont le choix devra être justifié, pourront être employées (voir paragraphes 5.2 à 0).

⁹ Les valeurs indiquées ci-après sont indiquées à titre d'exemple et ne sont pas à considérer comme génériques.

¹⁰ Valeur provenant du Reference Manual BEVI Risk Assessments

¹¹ Valeur provenant du guide Dépôts de Liquides Inflammables – Version Octobre 2008 – Ressource internet

Dans le cas où l'approche retenue consiste à évaluer la probabilité d'occurrence directement à partir du phénomène dangereux (approche abordée au paragraphe 5.3), aucune information sur les fréquences d'occurrence des EI, ERC, ES, niveaux de confiance des barrières de sécurité n'est nécessaire. La probabilité d'occurrence du phénomène dangereux est directement extraite des bases de données pertinentes (sous réserve que les installations soient suffisamment génériques et que les données disponibles soient jugées fiables et adaptées).

5.2 TRAITEMENT PROBABILISTE DES EI

Les EI peuvent être d'origine externe (naturelle ou anthropique) ou d'origine interne au site. Lors de l'attribution des fréquences d'occurrence annuelles aux EI, il s'agit d'être vigilant à ne pas les sous-estimer. Les EI traités dans les paragraphes ci-après sont les suivants :

- événements d'origine externe :
 - Événements naturels : paragraphe 5.2.1 ;
 - Événements anthropiques :
 - Impact dû au transport aérien conventionnel : paragraphe 5.2.2.1 ;
 - Effets dominos externes : TMD, sites voisins, canalisations de transport : paragraphes 5.2.2.3 à 5.2.2.5 ;
- événements d'origine interne :
 - Interventions sur site (chocs véhicule, travaux, etc.) : voir paragraphe 5.2.3.1 ;
 - Défaillance interne (technique ou humaine) : voir paragraphe 5.2.3.3 ;
 - Effets dominos internes : voir paragraphe 5.2.3.3.

Rappel : les événements de nature malveillante et terroriste ne sont pas traités (voir paragraphe 3.2).

5.2.1 CAUSES EXTERNES À L'ÉTABLISSEMENT D'ORIGINE NATURELLE

Les événements d'origine naturelle traités ici sont les événements de type séisme, foudre, inondation, neige et vent, mouvements de terrain, feux de forêt, volcanisme, etc. De manière générale, la caractérisation de ce type d'événement doit être menée de façon adaptée au contexte. Par exemple, les effets d'un cyclone ne seront pas étudiés pour des installations implantées en Métropole alors qu'ils le seront pour des installations implantées dans certains Départements, Territoires ou Provinces d'Outre-Mer.

Ce type d'événement est encadré par la réglementation française. Le contexte réglementaire prévoit la conformité des installations à des textes spécifiques et/ou standards ainsi que la réalisation d'audits de conformité ou d'inspections. Dans ce cadre, si les exigences réglementaires et conclusions des inspections ont été prises en compte par l'exploitant, alors les effets de ce type d'événement sur les installations peuvent être jugés suffisamment peu probables pour qu'ils aient un poids significatif dans la probabilité d'occurrence des accidents. Ainsi, dans la mesure où ce type d'événement est identifié et suivi par l'exploitant, il peut ne pas être pris en compte dans l'estimation de la probabilité d'occurrence des accidents.

Dans le cadre des EDD, la circulaire du 10 mai 2010 consacre un chapitre sur la prise en compte de ces événements (« EI spécifiques »). Elle précise que la fréquence d'occurrence d'un événement initiateur type « aléa naturel » n'a pas à être évaluée dans le cadre d'une étude de dangers et qu'il n'est pas tenu compte de cet événement initiateur dans la probabilité de l'accident correspondant sous réserve que l'étude de dangers justifie de façon précise que la réglementation idoine est respectée. Il est néanmoins nécessaire que l'analyse de risques réalisée dans le cadre de l'EDD identifie cet événement initiateur ainsi que la ou les mesures de maîtrise des risques (barrières de sécurité) en correspondance avec la réglementation associée.

Des guides techniques traitant de la prise en compte de ce type d'événements dans les EDD sont disponibles. On peut notamment citer le référentiel Ω 3 de l'INERIS « Protection contre la foudre des ICPE », le guide de bonnes pratiques « Feux de forêt pour les installations industrielles » de juillet 2007, le rapport d'étude INERIS « Référentiel méthodologique concernant la maîtrise du risque inondation dans les installations classées » du 13/06/2014.

Dans le cas où une détermination de la probabilité d'accident suite à un événement naturel devrait être réalisée, il serait nécessaire, *a minima*, de prendre en considération :

- la fréquence à retenir en un point donné du territoire : la localisation précise de l'installation analysée ;
- le caractère systémique de cette sollicitation. En effet, un événement de type séisme ou inondation est susceptible de générer des effets sur l'ensemble des installations soumises à la sollicitation et donc présenter un caractère assimilable à une cause commune ;
- la résistance spécifique de chaque installation potentiellement impactée à la sollicitation ainsi que, naturellement, l'intensité de cette dernière.

5.2.2 CAUSES EXTERNES À L'ÉTABLISSEMENT D'ORIGINE ANTHROPIQUE

Pour attribuer une fréquence aux causes non naturelles d'origine externe au site, il faut, autant que faire se peut :

- utiliser le retour d'expérience (REX) pour les risques liés au transport aérien conventionnel et au Transport de Marchandises Dangereuses (TMD) ;
- utiliser des données de probabilité des sites et canalisations de transport voisins pour quantifier en probabilité les effets dominos impactant le site.

Les paragraphes ci-après fournissent plus de détails sur les données de probabilité de ce type d'événement initiateur.

5.2.2.1 TRANSPORT AÉRIEN CONVENTIONNEL

Si des données de retour d'expérience de chute d'avions spécifiques à la zone où se situe le site étudié existent, elles seront à privilégier pour l'étude probabiliste de ce type d'événement. Dans le cas contraire, le REX pour les risques liés au transport aérien conventionnel peut provenir de la littérature :

- « Éléments de sûreté nucléaire », Jacques Libmann, 1996
Cet ouvrage fournit entre autres des données de probabilités de chutes d'avion en fonction du type d'aviation (aviation commerciale, militaire et générale). Les probabilités retenues incluent les phases de décollage, d'atterrissage et de vol. Il est précisé que la probabilité peut être divisée par trois pour chacune des trois phases de vol. Pour des installations implantées en dehors des zones de décollage ou d'atterrissage, la probabilité pourra donc être divisée par trois. Pour une installation donnée, de surface connue, on peut alors estimer la probabilité de chute d'avion en multipliant les fréquences indiquées par la surface de l'installation concernée.
Les valeurs indiquées sont des moyennes, ne tiennent pas compte de la position du site par rapport à un aéroport spécifique ou aux couloirs aériens, et peuvent donc être améliorés. Par ailleurs, les valeurs indiquées sont issues d'une étude avec un trafic aérien qui a évolué.
- Guide de sûreté AIEA N° NS-G-3.1, DOE standard « Accident analysis for aircraft crash into hazardous facilities »
Ce document propose des éléments pour quantifier le risque d'impact d'une installation par la chute d'avion. Ces éléments prennent en compte l'envergure de l'avion, l'angle d'incidence, le dérapage de l'avion, la surface de l'installation pouvant être impactée, la situation de l'installation par rapport aux pistes de décollage et d'atterrissage. Des éléments sont proposés pour réaliser une distribution spatiale du risque autour des pistes de décollage ou d'atterrissage, avec une maille de l'ordre du mile.

- IPSN, Département d'évaluation de sûreté, Rapport DES/021, « Approche de la sûreté des sites nucléaires », Jean Fauré, Août 1991 :
La démarche proposée tient compte pour un site donné de la proximité avec un aéroport, et du trafic de celui-ci. L'éloignement du site par rapport à la piste, l'angle du site au milieu de la piste sont d'autres paramètres qui permettent de préciser la probabilité de chute d'avion sur un site par m² et par an. Comme pour la précédente référence, trois types d'aviation sont retenus (aviation commerciale, militaire et générale). Les probabilités de chute par vol pour chaque type d'aviation sont pondérées par différents facteurs. On se reportera au rapport cité pour plus d'informations.

Une autre approche consiste à estimer la durée de survol du site afin d'en déduire, à partir d'une probabilité de chute par heure de vol, la probabilité de chute sur un site. La durée cumulée de survol d'un site est faite à partir du nombre de vols, de la vitesse moyenne des avions et de la longueur du site.

Dans différentes études, un taux de chute par heure de vol de 10⁻⁷/h a pu être pris en compte. Il serait issu de l'ouvrage « Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels – Fiabilité, facteurs humains et informatisation », Alain Villemeur, 1997. Mais ce taux n'est pas utilisable tel quel : il correspond à un objectif de risque et ne concerne que les causes liées à la structure de l'avion. Les défaillances humaines ne sont notamment pas intégrées.

Dans le cadre des EDD, la chute d'avion ne doit pas faire l'objet d'un traitement probabiliste dès lors que les installations industrielles sont 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 et d'atterrissage (cf. circulaire du 10 mai 2010 et Guide Professionnel GESIP n°2008/01 (édition de janvier 2014) au sujet des installations annexes des canalisations de transport)¹².

Dans le cas contraire (le site étudié se situe à moins de 2 km de tout point des pistes de décollage et d'atterrissage), les éléments concernant la fréquence de chute d'avions peuvent être trouvés dans la littérature citée ci-avant.

5.2.2.2 *TRANSPORT ROUTIER ET FERROVIAIRE CONVENTIONNEL*

Dans le cas où le site étudié est situé à proximité d'axes routiers (routes départementales, nationales, autoroutes) ou ferroviaires, il est recommandé de décrire qualitativement les éléments d'appréciation de la vulnérabilité des installations à un choc mécanique direct ou indirect au regard de ces flux, par exemple : distance et configuration par rapport aux axes de transport, flux approximatif de véhicules, etc.

¹² Le retour d'expérience indique que la majorité des accidents d'avion ont lieu autour des pistes et principalement en amont et en aval des pistes (cf. feuille d'information OFAC, guide de sûreté AIEA N° NS-G-3.1, étude commerciale pour l'aéroport de Francfort du NATS (UK)).

De plus, les statistiques de la société Boeing montrent que plus de la moitié des accidents surviennent lors des phases de décollage et d'atterrissage : 16% des accidents mortels ont lieu en phase de décollage et 37% en phase d'atterrissage.

S'il s'avère que ces occurrences sont plausibles (à cause par exemple d'une configuration particulière : voie ferrée traversant le site, site en contrebas d'un axe de transport, etc.), des éléments de quantification provenant du retour d'expérience lié au transport routier et ferroviaire conventionnel peuvent être fournis sur la base :

- des données fournies par les exploitants des réseaux concernés (par exemple : SNCF, gestionnaires de routes départementales, nationales ou autoroutes, etc.) ou par les communes ;
- des données fournies par le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité, le développement durable et l'aménagement (CEREMA) ;
- des données fournies par la mission TMD du ministère en charge de l'écologie.

5.2.2.3 *EFFETS DOMINOS EXTERNES : TRANSPORT DE MARCHANDISES DANGEREUSES (TMD)*

Dans le cas où le site étudié est situé à proximité d'axes routiers, ferroviaires, fluviaux ou maritimes sur lesquels des marchandises dangereuses sont transportées, il est recommandé dans la réglementation française de décrire qualitativement les éléments d'appréciation de la vulnérabilité des installations au regard de ces flux, par exemple : distance et configuration par rapport aux axes de transport, flux approximatif de véhicules/navires, nature des marchandises dangereuses transportées, ordre de grandeur de l'intensité de l'agression susceptible d'atteindre l'installation, etc. Dans le cas où des installations auraient été qualifiées de vulnérables au regard de ces flux, l'exploitant s'assurera qu'il a mis en place les mesures nécessaires pour protéger les installations concernées.

S'il s'avère nécessaire de réaliser une approche quantitative de ces risques, une des difficultés est l'obtention de la description des flux TMD transitant à proximité du site (le TMD étant variable dans le temps et dans sa nature) ; dans ce cas des études de trafic pourraient s'avérer nécessaires.

Pour le transport routier, et sur la base de la description de ces trafics ;

- des données d'accidentologie spécifiques au transport routier de TMD sont disponibles par le biais du Centre d'Études des Tunnels (CETU) qui est en charge de l'instruction des dossiers de sécurité des tunnels routiers français (ainsi que des trajets alternatifs à l'air libre). Des statistiques d'accidents peuvent également être trouvées par le biais de l'AIPCR qui met à disposition un outil de comparaison des risques du transport de TMD entre 2 itinéraires¹³ ;
- des scénarios génériques en fonction des dangers des matières dangereuses sont également disponibles.

Pour le transport ferroviaire et fluvial, des études spécifiques seront à réaliser.

¹³ Transport des marchandises dangereuses dans les tunnels routiers : le modèle EQR. Cet outil a été développé dans le cadre d'un programme du projet ERS2 (1997-2001) de l'AIPCR et l'OCDE et conçu par l'INERIS en association avec WS ATKINS.

5.2.2.4 EFFETS DOMINOS EXTERNES : SITES VOISINS

Les sites voisins peuvent représenter des potentiels de dangers pouvant être à l'origine d'effets dominos sur le site étudié. Des effets de phénomènes dangereux générés par ces sites voisins peuvent en effet atteindre des installations du site étudié et être à l'origine d'un accident sur le site.

La possibilité d'atteinte des installations du site étudié par des effets de phénomènes dangereux provenant de sites voisins est à déterminer sur la base des études réalisées par les sites voisins concernés (par exemple étude de dangers si le site voisin est sous le régime de l'autorisation ou bien classé Seveso). Ces études fourniront également la probabilité d'occurrence du ou des phénomènes dangereux susceptibles de générer des effets dominos sur le site étudié.

5.2.2.5 EFFETS DOMINOS EXTERNES : CANALISATIONS DE TRANSPORT

Les canalisations de transport d'hydrocarbures liquides ou liquéfiés, de gaz naturel ou assimilé et de produits chimiques peuvent représenter des potentiels de dangers pouvant être à l'origine d'effets dominos sur le site étudié. Des effets de phénomènes dangereux générés par ces canalisations de transport peuvent en effet atteindre des installations du site étudié et être à l'origine d'un accident sur le site.

La possibilité d'atteinte des installations du site étudié par des effets de phénomènes dangereux provenant de canalisations de transport voisines est à déterminer sur la base des études réalisées dans le cadre de l'exploitation de ces canalisations. La plupart des ouvrages de transport de produits dangereux par canalisation fait l'objet d'études de dangers dont la finalité est de s'assurer qu'ils présentent un niveau de risque maîtrisé¹⁴. Ces études fourniront également la probabilité d'occurrence du ou des phénomènes dangereux susceptibles de générer des effets dominos au niveau du site étudié.

La détermination des distances d'effets des phénomènes dangereux et la quantification en probabilité d'occurrence sont réalisées soit de façon spécifique, soit de façon générique en utilisant les données fournies par le Guide Professionnel GESIP n°2008/01 (édition de janvier 2014) ; le guide fournit en Annexe 9 des tableaux de distances d'effets génériques selon le produit transporté et l'événement redouté impliqué et en Annexe 10 des fréquences génériques linéiques de brèches et rupture de canalisation et des données concernant les probabilités d'inflammation selon le produit transporté et le diamètre de la canalisation.

Ainsi, dans le cas où la canalisation de transport n'a pas fait l'objet d'une étude de dangers, ou bien que celle-ci n'est pas accessible, une estimation de la probabilité de l'ERC peut être réalisée à partir des données et méthodologie disponibles dans le guide GESIP (en intégrant la longueur de la canalisation qui, en cas de fuite, et pour chaque PHD potentiellement impactant, entraînerait des conséquences sur l'équipement ou l'installation étudié).

¹⁴ Le Guide Professionnel GESIP n°2008/01 (édition de janvier 2014) « Guide méthodologique pour la réalisation d'une étude de dangers concernant une canalisation de transport » fournit un cadre pour la réalisation d'une telle étude.

La fréquence finale du PHD impactant sera ensuite déduite de la combinaison de la fréquence de l'ERC avec les éventuelles probabilités conditionnelles (p.e. probabilité d'avoir un jet dans la bonne direction, ...) et/ou probabilités des événements secondaires (p.e. probabilité d'inflammation, ...) nécessaires (cf. paragraphe 5.5).

Note : Le même type de raisonnement est également applicable aux canalisations d'usine jouxtant la limite d'un autre établissement industriel (ou du site objet de l'étude dans le cas de l'étude des effets dominos internes).

5.2.3 CAUSES INTERNES À L'ÉTABLISSEMENT

Les causes internes à l'établissement regroupent principalement :

- les événements dus aux interventions sur site (chocs véhicule, travaux, etc.) ;
- les défaillances d'origine technique ou humaine ;
- les effets dominos générés par d'autres installations du site.

Les paragraphes ci-après fournissent plus de détails sur les données de probabilité de ce type d'événement initiateur.

5.2.3.1 INTERVENTIONS SUR SITE

Les chocs par des véhicules circulant sur le site ou dus à des travaux effectués à proximité des installations sont des événements initiateurs à prendre en compte dans l'évaluation de la probabilité d'occurrence des accidents. Les références suivantes indiquent des données :

- Layer Of Protection Analysis (LOPA) – Simplified process risk assessment, Octobre 2001;
- « Mechanical Lifting Failures », Risk Assessment Data Directory, OGP, Mars 2010.

Toutefois, la quantification en fréquence d'occurrence de ce type d'événements est fortement liée à la configuration du site industriel et des évaluations issues du retour d'expérience interne pourront être menées en groupe de travail.

5.2.3.2 DÉFAILLANCES D'ORIGINE TECHNIQUE

Différents types de défaillances techniques peuvent survenir sur les équipements d'un site industriel (pompes, vannes, tuyauteries, réservoirs, etc.). Ces défaillances peuvent avoir pour origine un défaut métallurgique des équipements, le vieillissement des installations, des dérives de procédés, etc.

Un groupe de travail peut être constitué pour évaluer la fréquence des EI de type « défaillances techniques » à partir :

- des évaluations issues du retour d'expérience du site industriel et du secteur d'activité : cette évaluation réalisée en groupe de travail permettra d'évaluer de manière semi-quantitative ou quantitative la fréquence des événements à partir de l'expérience des opérateurs, de la société chargée de la maintenance, des informations contenues dans la GMAO (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur), etc. ;
- de l'expérience des experts ;

- de données génériques relatives aux défaillances d'équipements (fréquences de pertes de confinement selon le type d'équipement) et à la fiabilité des barrières de sécurité (probabilités de défaillance à la sollicitation). Ces données sont disponibles dans des bases de données reconnues relatives à des ERC (cf. paragraphe 5.3) ou à des équipements de sécurité.

Point de vigilance : Prise en compte du nombre et/ou de la durée des opérations

Pour les installations qui ne fonctionnent pas en continu (opérations de transfert, batch, etc.) et pour lesquelles le risque n'est pas continu mais est conditionné à un état du système qui n'est pas permanent (taux d'utilisation), il faudra tenir compte du ratio de temps entre la durée où le risque existe et la durée totale de référence. Ainsi, lorsque la fréquence d'occurrence de la cause générique servant de base à l'estimation correspond à un fonctionnement annuel, la fréquence d'occurrence de l'événement initiateur étudié doit être modifiée pour tenir compte de la durée réelle de l'opération à risques. Nous citerons pour illustration deux exemples issus du LOPA¹⁵ dans lesquels les probabilités de défaillance proposées initialement correspondent à un fonctionnement de l'équipement supposé toute l'année.

Cas n°1 : si la probabilité de défaillance d'un flexible relié de manière continue (environ 8 000 heures/an) est de $1.10^{-2}/\text{an}$ mais que l'opération de transfert n'a lieu que 40 fois par an pendant 2 heures, alors la fréquence réelle de la cause (défaillance du flexible) sera :

$$F = (1.10^{-2}/\text{an}) \times (40 \times 2) / 8000 = 1.10^{-4}/\text{an}$$

Cas n° 2 : une régulation de débit sur une opération par batch a une probabilité de défaillance de $10^{-2}/\text{an}$. L'opération batch a lieu 8 fois par an et dure 1 heure. Le taux de défaillance, en tenant compte de la durée et de la fréquence des opérations, est alors :

$$F = 1.10^{-2} \times 8 / 8000 = 1.10^{-5} /\text{an}$$

5.2.3.3 DÉFAILLANCES D'ORIGINE HUMAINE

La détermination de la probabilité de défaillance d'origine humaine est par nature complexe. En effet, la nature déterminée de l'agir humain est couramment contestée à raison. Les conditions de réalisation d'une tâche (ergonomie du poste de travail, conditions environnementales de réalisation de la tâche, ...) ainsi que la complexité relative de cette dernière peuvent influencer sur le taux d'erreur. Et, au-delà de toute considération de performance individuelle, l'organisation dans laquelle les actions humaines s'inscrivent ainsi que le niveau de formation des opérateurs sont d'une grande importance et également d'une grande variabilité.

¹⁵ Layer Of Protection Analysis (LOPA) – Simplified process risk assessment, Octobre 2001

L'estimation de la probabilité d'une défaillance humaine ou de la probabilité d'erreur humaine peut être réalisée en groupe de travail en considérant le retour d'expérience de l'entreprise, l'expérience des experts et les valeurs de probabilité moyenne de défaillance à la demande (PFD) :

Tableau 4 : Exemples de PFD fournies dans l'annexe F de la norme NF-EN 61511-3

Action d'un homme entraîné et sans stress	1.10^{-2} à 1.10^{-4} (1)
Réponse d'un opérateur à une alarme	1.10^{-1}
Action d'un homme stressé	0,5 à 1

(1) La valeur retenue dépendra notamment de la complexité relative de l'action à réaliser.

Ces valeurs peuvent également être affinées par le recours à des méthodes d'estimation de la fiabilité humaine. Le rapport « Opération A – État de l'art des méthodes d'évaluation probabiliste de la fiabilité humaine ¹⁶ » indique des méthodes pouvant être utilisées à cette fin sachant que le recours à un spécialiste de la fiabilité humaine peut être nécessaire à leur utilisation.

Pour rappel, pour obtenir la fréquence d'un évènement initiateur, il sera nécessaire de multiplier la probabilité ainsi déterminée par le nombre d'opérations réalisées dans l'année. De plus, le nombre d'opérations réalisées par an peut avoir un impact sur la probabilité de défaillance par opération.

5.2.3.4 EFFETS DOMINOS INTERNES

Selon la configuration géographique du site étudié, les installations peuvent représenter des potentiels de dangers les unes sur les autres. Des effets de phénomènes dangereux générés par une installation du site étudié peuvent en effet atteindre d'autres installations du site et être à l'origine d'un accident sur le site.

La possibilité d'atteinte des installations du site étudié par des effets de phénomènes dangereux provenant d'autres installations du site est à déterminer sur la base d'études réalisées sur les autres installations concernées (par exemple dans le cadre d'une étude de dangers ou d'une étude de sécurité). Ces études fourniront également la probabilité d'occurrence du ou des phénomènes dangereux susceptibles de générer des effets dominos sur le site étudié.

5.3 TRAITEMENT PROBABILISTE DES ERC ET PHD

Les données pour les fréquences des ERC sont principalement extraites de bases de données propres aux sites/secteurs industriels ou empruntées à des bases internationales, par exemple :

- Reference manual BEVI risk assessment, (RIVM 2009) aux Pays-Bas ;
- Failure rate and event data (FRED), (HSE 2010) en Angleterre ;
- Handboek Faalfrequenties (HFF), (LNE 2009) en Belgique flamande.

16 PERINET, R. - État de l'art des méthodes d'évaluation probabiliste de la fiabilité humaine. DRA-10-111793-01257A. INERIS : 2010, 49 p. hors annexes (à paraître).

Le Rapport [4] « Panorama des bases de données utilisées dans le domaine des analyses quantitatives des risques » présente un aperçu des bases de données de fiabilité et de pertes de confinement couramment rencontrées.

Il convient de souligner que les données publiques fiables et statistiquement représentatives pour quantifier la fréquence d'occurrence des ERC sont rares. Cette rareté des données est tout d'abord due à la nature des événements étudiés qui sont par définition rares et difficilement observables. Elle s'explique également par la variété et la complexité des systèmes étudiés qui génèrent un grand nombre de situations différentes, et donc, potentiellement, une variabilité importante des fréquences des ERC.

De plus, les données empruntées aux banques internationales (fréquences d'événements initiateurs, fréquences de perte de confinement, probabilité d'occurrence de phénomènes dangereux, etc.) comportent des incertitudes importantes. Notamment, leur domaine d'applicabilité est souvent restreint car leur origine n'est pas détaillée. Elles sont à considérer comme représentatives d'un « état de l'art moyen de la sécurité », qui reste mal défini (évolution des normes de conception, prise en compte des barrières de sécurité et aspects organisationnels). Il appartient donc à l'utilisateur, lorsqu'il utilise ces données pour réaliser une étude de sécurité, d'identifier et de tenir compte des spécificités du site étudié. De plus, il n'existe pas d'indépendance totale des sources de données entre elles, les travaux publiés dans la littérature spécialisée citant souvent les mêmes sources de données initiales. Cet état de fait limite fortement la valeur des comparaisons des valeurs de fréquence entre elles. Toutefois, les rapports [8] et [9] indiquent des fourchettes de valeurs possibles, tirées de bases de données considérées comme robustes, pour les secteurs respectifs des dépôts de GPL et des installations de stockage de l'ammoniac.

Point de vigilance : Utilisation de données homogènes

Du moment qu'une base de données a été sélectionnée, il est fortement recommandé de réaliser l'estimation de la probabilité en se cantonnant aux valeurs de cette base. Dans le cas contraire, l'emploi de plusieurs sources de valeurs pour le même système doit, *a minima*, être justifié.

Point de vigilance : Prise en compte du nombre et/ou de la durée des opérations

Comme indiqué précédemment (cf. § 5.2.3.2) il est nécessaire de tenir compte du ratio de temps entre la durée où le risque existe et la durée totale de référence.

5.4 LES FACTEURS DE RÉDUCTION DU RISQUE DES BARRIÈRES DE SÉCURITÉ

Pour qu'une barrière de sécurité soit valorisée sur une séquence accidentelle, il faut qu'elle remplisse les critères minimaux suivants :

- elle doit être indépendante du scénario d'accident sur lequel elle intervient ainsi que des autres barrières de sécurité intervenant sur ce scénario. Notamment, il s'agit de s'assurer que le déroulement accidentel ou le dysfonctionnement d'une autre barrière de sécurité ne conduit pas à un dysfonctionnement de la barrière. De plus, la fréquence de la cause à laquelle la barrière est associée ne doit pas déjà intégrer l'action de ladite barrière, celle-ci étant alors valorisée deux fois ;
- elle doit être efficace au regard du scénario sur lequel elle intervient, c'est-à-dire qu'elle doit être apte à remplir la fonction de sécurité pour laquelle elle a été choisie, dans son contexte d'utilisation et pendant une durée donnée de fonctionnement ;
- elle doit avoir un temps de réponse adapté au scénario sur lequel elle intervient, c'est-à-dire que le temps entre le moment où la barrière est sollicitée¹⁷ et le moment où la fonction de sécurité est réalisée dans son intégralité est compatible avec la cinétique du phénomène dangereux redouté ;
- ses performances doivent être maintenues dans le temps, au travers d'une politique de tests et de maintenance adaptée.

Dans la mesure où la barrière de sécurité remplit ces critères de performance, elle peut se voir attribuer un niveau de confiance (NC), qui correspond à la probabilité pour qu'une barrière de sécurité, dans son environnement d'utilisation, assure la fonction de sécurité pour laquelle elle a été choisie. Dans le cas d'une barrière de sécurité technique fonctionnant à la sollicitation, la relation entre la probabilité de défaillance à la sollicitation (aussi appelée PFD pour Probability of Failure on Demand) et le NC est PFD est alors la suivante : $10^{-NC-1} \leq PFD < 10^{-NC}$.

Le NC peut être traduit en facteur de réduction de risques, compris entre 10^{NC} et 10^{NC+1} . De manière conservatrice, dans le cadre de l'approche semi-quantitative, on retient généralement que le NC est associé à une réduction de risques d'un facteur 10^{NC} .

Lorsque plusieurs barrières viennent à l'encontre d'une même séquence, il peut s'agir d'un choix très conservateur. Dans ce cas, les règles à appliquer pour agréger les performances des barrières sont présentées dans le chapitre 5 du référentiel Ω 25 [1].

Il est possible de prendre en compte le retour d'expérience réalisé sur un site sur les barrières de sécurité de façon à déterminer un taux de défaillance environné ou spécifique. Concernant ce point, le lecteur pourra s'appuyer utilement sur les considérations exposées dans le rapport « Méthode d'évaluation des fréquences et des probabilités à partir des données de retour d'expérience du 01/07/2015 [6] » pour obtenir des valeurs consolidées. Toutefois, il existe peu de retour d'expérience, issu d'un site industriel, qui soit formalisé et comporte un nombre de données suffisantes sur les barrières pour pouvoir en déduire leur probabilité de défaillance. D'autre part,

¹⁷ Le temps nécessaire à la détection est également à prendre en compte si pertinent.

les sources de données existantes apparaissent souvent comme des moyennes de données de fiabilité de dispositifs. Les conditions d'utilisation sont imprécises et les valeurs sont de ce fait difficilement utilisables dans un contexte spécifique. Leur utilisation suppose également une bonne connaissance des termes de la fiabilité (distinction entre taux de défaillances sûres et non sûres, temps de référence correspondant à la fréquence des maintenances). Des données génériques sont disponibles dans le BEVI, FRED ou les bases de données types OREDA ou EIREDA, mais les valeurs de probabilité de défaillance affichées sont très faibles et nécessiteraient une validation par le retour d'expérience et une adaptation à la configuration du site (notamment l'architecture de sécurité mise en œuvre).

Pour pallier ces faiblesses, l'INERIS a développé une méthode de détermination des niveaux de confiance des barrières techniques et humaines de sécurité, décrite dans les référentiels Ω 10 (pour les barrières de sécurité techniques) [3] et Ω 20 (pour les barrières de sécurité humaines) [5].

5.5 TRAITEMENT PROBABILISTE DES ÉVÉNEMENTS SECONDAIRES

La réalisation de l'ERC peut donner lieu à des phénomènes dangereux de nature, de probabilités et de distances d'effets différentes, selon les conditions dans lesquelles l'ERC se produit. Ces conditions, appelées « événements secondaires » dans cette partie, conditionnent la probabilité des accidents qui peuvent avoir lieu.

Les événements secondaires communément rencontrés sont les suivants :

- l'inflammation d'un nuage de gaz ;
- la présence d'eau.

Le traitement probabiliste de ces événements est abordé dans les paragraphes qui suivent.

5.5.1 INFLAMMATION DU NUAGE DE GAZ

Dans un nœud-papillon, les inflammations suite à une perte de confinement de substances inflammables sont le plus souvent représentées comme des événements secondaires conditionnés à un ERC de type perte de confinement. Il est donc nécessaire de connaître les probabilités conditionnelles d'inflammation sachant qu'un rejet a eu lieu.

Il est excessivement difficile d'obtenir la probabilité d'inflammation d'un nuage de gaz en agrégeant les probabilités d'occurrence de toutes les causes d'inflammation (13 sources recensées dans la norme NF EN 1127-1) et les probabilités de défaillance des barrières de sécurité associées (on a notamment des difficultés à traiter correctement les règles d'interdiction de fumer, des permis de travaux par points chauds, etc.).

Il est de ce fait plus judicieux d'estimer directement cette probabilité en prenant en compte de façon qualitative les causes potentielles, les barrières de sécurité existantes et le phénomène en lui-même. Par exemple, pour des liquides inflammables anciennement de catégorie B, il peut être envisagé de prendre une probabilité de 0,01 si le nuage reste limité à une zone ATEX sans présence de personnel (zone de stockage), à 0,1 si le nuage reste limité à une zone ATEX avec présence de personnel

(zone de dépotage par exemple) et de 1 sinon¹⁸. Par contre, il est nécessaire pour cela d'identifier les principales causes d'inflammation et d'évaluer qualitativement si les mesures de sécurité associées sont pertinentes.

Il est à noter que d'autres paramètres doivent être pris en compte comme la réactivité de la substance, l'étendue du nuage, la durée de la fuite, la nature de la cause de la perte de confinement, etc.

Les notions de probabilité et de fréquence d'inflammation, les différents types d'inflammation (immédiate / retardée) et les différentes méthodologies d'évaluation des probabilités et fréquences d'inflammation sont traités en détail dans le rapport [7]. De plus, ce rapport propose une approche d'évaluation semi-quantitative des probabilités d'inflammation et des fréquences d'occurrence des phénomènes dangereux de type explosion en fonction du type de produit.

5.5.2 PRÉSENCE D'EAU

Dans le cas où le scénario d'accident implique des substances réagissant violemment au contact de l'eau, la réalisation de l'événement secondaire « présence d'eau » (ex : pluie) peut donner lieu à des phénomènes dangereux de nature différente, d'intensités potentiellement plus importantes mais de probabilité moins élevée.

Dans le cas où l'eau proviendrait de la pluie, ce traitement probabiliste revient à récolter des paramètres de pluviométrie propres au site.

5.5.3 PRÉSENCE DE VENT

Les phénomènes de dispersion de gaz, toxique ou inflammable, sont fortement impactés par les conditions atmosphériques de rejet (classe de stabilité atmosphérique, vitesse de vent) ; leur direction et leur étendue en dépendent directement. Pour chaque modélisation, des couples stabilité-vitesse de vent peuvent être considérés, et l'influence de la direction du vent peut être prise en compte si elle est connue.

Les règles sur la prise en compte du vent présentées dans la fiche n°5 de la circulaire du 10 mai 2010, applicables dans le cadre des EDD, sont générales et peuvent également être employées en dehors du cadre réglementaire. Elles présentent différentes options de prise en compte des caractéristiques du vent dans la détermination de la probabilité / gravité des accidents, selon le niveau de finesse recherché.

5.5.4 PRÉSENCE DE PERSONNES

Dans certaines configurations, le nombre de personnes susceptibles d'être impactées en cas d'accident varie en fonction du temps (jour / nuit, période de travaux / période de fonctionnement normal, événement exceptionnel, stade, route avec risque de bouchons, etc.).

¹⁸ Guide de Maîtrise des Risques Technologiques dans les Dépôts de Liquides Inflammables – Version Octobre 2008

Ces différentes périodes peuvent être prise en compte dans le calcul de la probabilité d'un accident.

Par exemple, supposons qu'un accident de probabilité P^{19} impacte potentiellement 100 personnes mais que ces personnes sont présentes 10 % du temps et que le reste du temps 10 personnes sont potentiellement présentes. Alors, :

- la probabilité d'atteindre 100 personnes est de $0,1 \times P$,
- la probabilité d'atteindre « au moins » 10 personnes est égale à P .

¹⁹ La probabilité P est considérée constante dans le temps.

6. QUANTIFICATION DE LA PROBABILITÉ D'OCCURRENCE DES ERC, PHD ET ACCIDENTS

Ce chapitre présente les règles mathématiques à appliquer dans le cas, uniquement, d'un traitement quantitatif des ERC, PHD et accidents. Les règles encadrant le traitement semi-quantitatif des données afin d'estimer la probabilité d'occurrence d'un accident sont détaillées dans le référentiel Ω 25 [1].

Les paragraphes suivants présentent la façon de quantifier les arbres de défaillance et les arbres d'événements. Un nœud papillon étant la combinaison de ces deux arbres, il s'agira de se reporter à ces deux paragraphes pour appréhender les règles de quantification des phénomènes dangereux et des accidents :

- la quantification d'un ERC à partir des événements initiateurs se faisant sur la base de règles associées aux arbres de défaillances ;
- la quantification d'un PHD ou d'un accident à partir de la quantification d'un ERC se faisant sur la base des règles associées aux arbres d'événements.

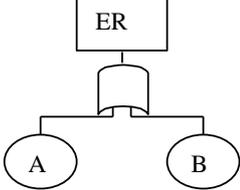
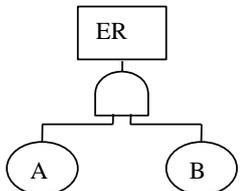
Notre volonté est d'exposer les règles de quantifications couramment usitées dans le cadre de la réalisation d'études de sécurité. Ainsi, pour l'ensemble des considérations exposées dans les paragraphes ci-après, il est considéré que les fréquences sont assimilables à des POA et donc annualisées (cf. 3.1.2).

6.1 QUANTIFICATION DES ERC

6.1.1 TRAITEMENT QUANTIFIÉ DE L'ARBRE DES DÉFAILLANCES

L'arbre de défaillances (ADD) permet d'estimer la probabilité d'occurrence d'un événement redouté à partir des probabilités d'occurrence des événements initiateurs, de leurs éventuelles combinaisons et des probabilités de défaillances des barrières de sécurité.

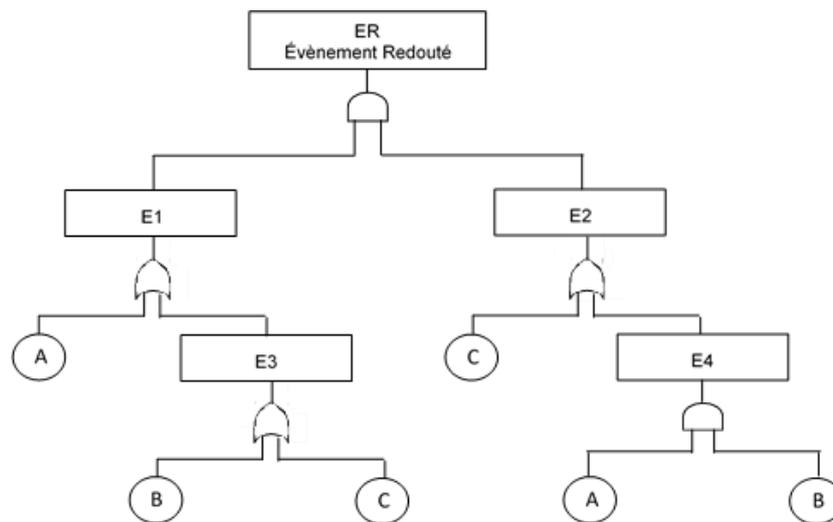
Les combinaisons des probabilités (considérées à l'instant t) se font à partir des règles suivantes :

Porte	Schéma	Probabilité
Portes « OU »		$P(ER) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$ Théorème de Poincaré $P(ER) \approx P(A) + P(B)$ Le dernier terme est négligé dès lors que la probabilité est faible
Portes « ET »		$P(ER) = P(A) * P(B)$

L'exploitation quantitative de l'arbre des défaillances peut nécessiter un traitement de l'ADD construit de façon à éliminer les fausses redondances préalablement à l'exploitation de cet arbre. Cette étape fait appel aux notions de coupes minimales et de réduction d'arbres.

6.1.2 RÉDUCTION D'ARBRE ET QUANTIFICATION DE L'ERC

Une coupe minimale représente la plus petite combinaison d'évènements pouvant conduire à l'évènement indésirable ou redouté. On parle parfois également de « chemin critique ». Dans l'exemple suivant (présenté au §3.2.1.2) :



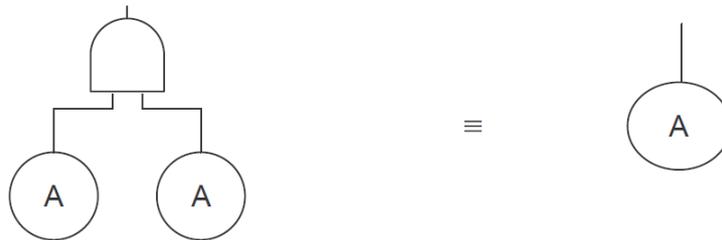
l'occurrence des évènements A, B et C conduit effectivement à l'évènement final. Il ne s'agit cependant pas d'une coupe minimale puisque la combinaison A.B seule peut être à l'origine de l'évènement final.

La recherche des coupes minimales est effectuée à partir des règles de l'algèbre de Boole en considérant que :

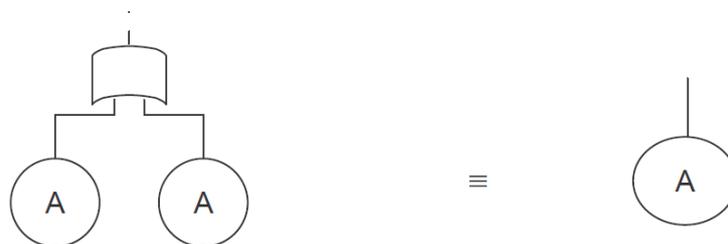
- à chaque évènement de base correspond une variable booléenne ;
- l'évènement de sortie d'une porte « ET » est associé au produit des variables booléennes correspondant aux évènements d'entrée ;
- l'évènement de sortie d'une porte « OU » est associé à la somme des variables booléennes correspondant aux évènements d'entrée.

Les trois règles principales de l'algèbre de Boole sont les suivants :

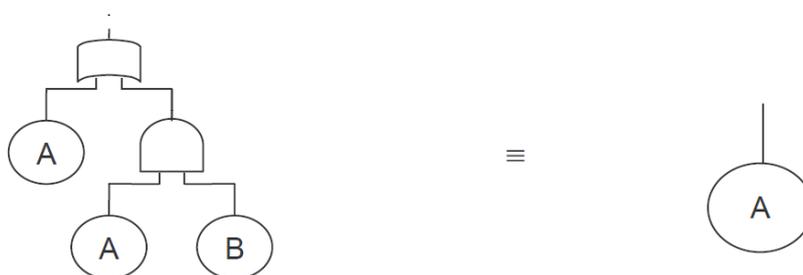
1. Porte « ET » : Idempotence du produit : $A.A = A$



2. Porte « OU » : Idempotence de la somme : $A+A = A$



3. Absorption : $A +(A.B) =A$



Les principales règles de l'algèbre de Boole sont résumées dans le tableau suivant :

Propriétés	Produit	Somme
Commutativité	$A.B = B.A$	$A + B = B+A$
Idempotence	$A . A =A$	$A + A = A$
Absorption	$A . (A+B) = A$	$A + A.B = A$
Associativité	$A . (B . C) = (A . B) . C$	$A + (B + C) = (A + B) + C$
Distributivité	$A . (B + C) = A.B + A.C$	$A + B.C = (A+B) . (A+C)$
Éléments neutres	$A + 0 = A$	$A.1 = A$
Absorption	$A + A.B = A$	$0.A = 0$
Simplification	$A + \bar{A}.B = A + B$	$A . (\bar{A} + B) = A . B$

Tableau 5 : Algèbre de Boole

Ainsi, dans l'exemple précédent, la recherche des coupes minimales peut s'effectuer comme suit :

$$ER = E1 \cdot E2$$

$$E1 = A + E3 \text{ avec } E3 = B + C$$

$$E2 = C + E4 \text{ avec } E4 = A \cdot B$$

Au total, nous avons donc :

$$ER = (A+B+C) \cdot (C+A \cdot B) = A \cdot C + A \cdot B + B \cdot C + A \cdot B + C + C \cdot A \cdot B$$

Or, $A \cdot C + C = C$ et $A \cdot B + A \cdot B \cdot C = A \cdot B$ (par absorption)

$$ER = C + A \cdot B + B \cdot C + A \cdot B$$

De plus, $A \cdot B + A \cdot B = A \cdot B$ (Idempotence) et $C + B \cdot C = C$ (Absorption)

$$\text{D'où } ER = C + A \cdot B$$

Il apparaît ainsi que l'évènement C seul ou la combinaison des évènements A.B conduisent à l'évènement redouté. Il n'existe pas de combinaison plus petite conduisant à cet évènement. L'arbre présenté en exemple admet donc deux coupes minimales : C ainsi que A.B.

On définit alors l'ordre d'une coupe comme le nombre d'évènements combinés qui figurent dans cette coupe.

Finalement, cet arbre comporte :

- une coupe minimale d'ordre 1 : C ;
- une coupe minimale d'ordre 2 : A.B.

L'arbre représentant ces coupes minimales est appelé « arbre réduit ». Pour l'exemple considéré précédemment l'arbre réduit est le suivant :

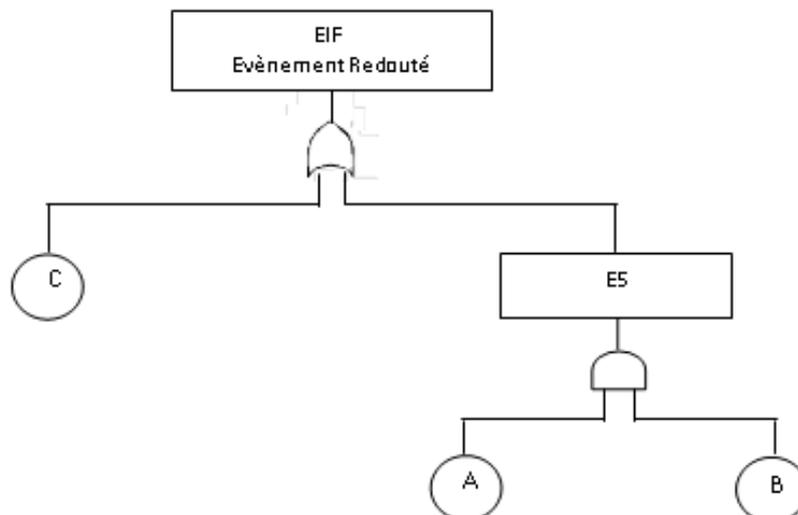


Figure 7 : Réduction de l'arbre des défaillances pris en exemple

Nous avons donc :

$$P(EIF) = P(C + A \cdot B) = P(C) + P(A) \cdot P(B) - P(A) \cdot P(B) \cdot P(C) \text{ (théorème de POINCARÉ)}$$

$$\text{d'où } P(EIF) \approx P(C) + P(A) \cdot P(B)$$

Point de vigilance :

La recherche des coupes minimales peut rapidement devenir fastidieuse pour des arbres de taille importante. Pour répondre à cette difficulté, il existe un certain nombre d'outils informatiques qui permettent d'automatiser cette démarche. Ces outils démontrent toute leur utilité pour la réduction d'arbres complexes. Leur utilisation ne doit cependant pas faire oublier que la définition précise de l'événement redouté constitue la première étape en vue de limiter la complexité de l'arbre des causes.

6.1.3 TRAITEMENT DES PORTES OU

Dans le cas de n événements initiateurs indépendants²⁰ en amont d'une porte OU, la fréquence annuelle de l'événement de sortie E est estimée par :

$$f_{Porte\ OU} = f_E = \sum_{k=1}^n f_{EIk}$$

Avec f_{EIk} les fréquences annuelles des événements en amont de la porte OU.

Point de vigilance :

Cette formule est valable uniquement dans le cas où $\max_k(f_{EIk}) \times \max_k(d_{EIk}) \leq \frac{1}{100}$, avec d_{EIk} les durées moyennes (exprimées en année) des événements en amont de la porte OU.

Dans le cas contraire, un calcul exact ne sera pas possible et il faudra majorer la fréquence de sortie par la somme des fréquences d'entrée.

6.1.4 TRAITEMENT DES PORTES ET

Pour des raisons de clarté, le traitement des portes ET est présenté pour 2 événements en amont et généralisé à n événements dans un second temps.

Dans le cas de 2 événements indépendants en amont d'une porte ET, une règle erronée bien que fréquemment utilisée pour estimer la fréquence annuelle de l'événement de sortie E est la suivante :

$$f_E = f_{EI1} \times f_{EI2}$$

Cette formule, non homogène (problème d'unités) ne traduit pas la simultanéité des événements EI1 et EI2. Elle traduit la probabilité pour que EI1 et EI2 se produisent la même année mais pas la probabilité qu'ils se produisent en même temps. Ainsi, de façon à prendre en compte la simultanéité des événements, la fréquence annuelle de l'événement de sortie E est estimée par :

$$f_{Porte\ ET} = f_E = f_{EI1} \times f_{EI2} \times (d_{EI1} + d_{EI2})$$

avec f_{EIk} et d_{EIk} respectivement les fréquences annuelles et durées moyennes (exprimées en année) des événements en amont de la porte ET.

Points de vigilance :

- Cette formule est valable uniquement dans le cas où $\max(f_{EI1}, f_{EI2}) \times \max(d_{EI1}, d_{EI2}) \leq \frac{1}{100}$.

²⁰ Les événements sont considérés comme indépendants si l'occurrence de l'un d'entre eux n'apporte pas d'information sur l'occurrence des autres.

- Si besoin (portes enchaînées), il est possible d'estimer la durée moyenne de l'événement en sortie de la porte ET par :

$$\text{Si } \max(f_{EI1}, f_{EI2}) \times \max(d_{EI1}, d_{EI2}) \leq \frac{1}{100}, \text{ alors } d_E = \frac{d_{EI1} \times d_{EI2}}{d_{EI1} + d_{EI2}}.$$

Dans le cas de n événements initiateurs indépendants en amont d'une porte ET, la fréquence annuelle de l'événement de sortie E est estimée par :

$$f_{\text{porte ET}} = \left(\prod_{i=1}^n f_i \cdot d_i \right) \sum_{i=1}^n 1/d_i$$

avec f_{EIn} et d_{EIn} respectivement les fréquences annuelles et durées moyennes (exprimées en année) des événements en amont de la porte ET.

6.1.5 INTÉGRATION DES BARRIÈRES DE SÉCURITÉ

6.1.5.1 CAS GÉNÉRAL

Dans le cas où une ou plusieurs barrières de sécurité indépendantes s'appliquent à un événement initiateur, la fréquence annuelle de l'événement de sortie E est estimée par :

$$f_E = f_{EI} \times \prod_{k=1}^n \gamma_k$$

où f_{EI} est la fréquence annuelle de l'événement en amont de la barrière et γ_k la probabilité de défaillance à la sollicitation de la barrière k.

Si l'on souhaite estimer l'événement complémentaire, correspondant au bon fonctionnement de la barrière, sa fréquence annuelle peut être estimée par :

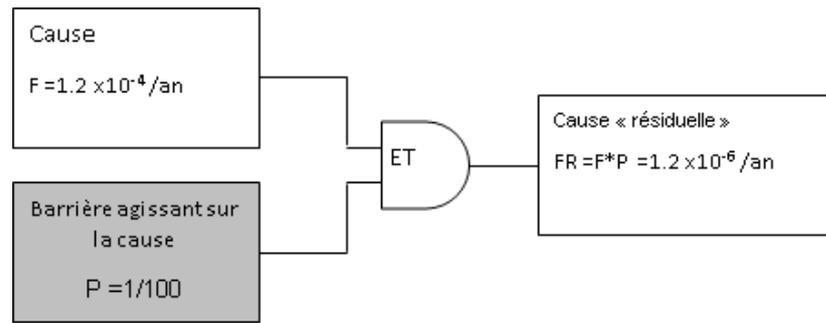
$$f_{\bar{E}} = f_{EI} \times (1 - \gamma)$$

6.1.5.2 APPLICATION AUX ADD

Les barrières de sécurité agissant en prévention (en amont de l'ERC) permettent de réduire la probabilité d'occurrence d'un événement redouté central : la barrière agit en mode à la sollicitation, on peut multiplier la fréquence d'occurrence de la cause exprimée en F/an par la probabilité de défaillance de la barrière exprimée en probabilité de défaillance à la sollicitation (PFD).

Généralement le fonctionnement de ce type de barrière ne conduit pas à un deuxième scénario : si la barrière fonctionne, l'ERC ne se produit pas. En revanche, pour certains dispositifs, dont le fonctionnement génère le rejet d'une substance dangereuse (par exemple, les soupapes de sécurité), un scénario résiduel est issu du fonctionnement de la barrière. Mais il s'agit alors d'un autre ERC (avec souvent des conséquences différentes).

Sommairement, l'ajout d'une barrière de sécurité équivaut à intégrer une porte ET à l'événement initiateur à traiter :



6.1.6 EXPLOITATION DE LA QUANTIFICATION DANS LE CADRE DE LA MAÎTRISE DES RISQUES

L'examen des probabilités des événements intermédiaires conduisant à l'événement final permet de hiérarchiser les priorités de modifications du système en identifiant les causes les plus probables d'un événement indésirable ou final.

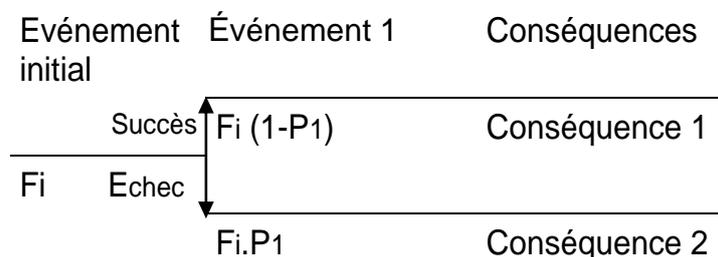
La réduction de la probabilité de cet événement final peut alors être envisagée de plusieurs manières :

- en supprimant ou réduisant la probabilité d'occurrence des événements de base ;
- en améliorant la fiabilité du système par l'ajout de portes « ET » ou de barrières de sécurité entre l'événement final et les événements de base. Les portes « ET » placées au plus proche de l'événement final permettent de traiter un maximum de coupes minimales et le cas échéant, de traiter certaines causes qui n'auraient pas été envisagées.

6.2 ESTIMATION DE LA PROBABILITÉ D'OCCURRENCE DES PHD

6.2.1 TRAITEMENT QUANTIFIÉ DE L'ARBRE DES ÉVÉNEMENTS

La fréquence des événements finaux (conséquences) est obtenue en multipliant la fréquence de l'événement initial par la probabilité conditionnelle de survenue des événements intermédiaires comme illustré ci-après.



Où :

- Fi est la fréquence de l'événement initial ;
- P1 est la probabilité de survenue de l'événement 1.

Dans le cadre des études de sécurité cette démarche sera appliquée à l'estimation de la probabilité de survenue des PHDs possibles.

6.2.2 TRAITEMENT D'UN ES CONDITIONNELLEMENT À UN ERC

Dans le cas d'un phénomène dangereux noté PHD1 se réalisant si l'ERC se réalise et si l'ES se réalise conditionnellement à l'ERC et d'un phénomène dangereux noté PHD2 se réalisant si l'ERC se réalise et si l'ES ne se réalise pas conditionnellement à l'ERC, les fréquences annuelles des phénomènes dangereux 1 et 2 sont estimées par :

$$f_{PHD1} = f_{ERC} \times p$$
$$f_{PHD2} = f_{ERC} \times (1 - p)$$

où p est la probabilité conditionnelle d'avoir l'événement ES sachant l'occurrence de l'ERC.

Notes :

- Pour des probabilités conditionnelles faibles ($p \leq 10^{-2}$), la fréquence annuelle d'occurrence du PHD2 est assimilable à celle de l'ERC ;
- Si plusieurs événements secondaires sont présents en aval de l'ERC, il faut appliquer cette démarche de manière itérative. Par exemple, si l'ERC est une perte de confinement de gaz toxique et inflammable, deux événements secondaires possibles sont la présence de vent qui disperse ou non le nuage, et la présence d'une source d'inflammation qui conduira à différents PHDs. Ainsi, on calculera dans un premier temps les fréquences d'occurrences annuelles d'un nuage dispersé et d'un nuage non dispersé, puis pour chacun de ces deux événements, on découpera à nouveau en deux suivant la présence ou non d'une source d'inflammation. Si nécessaire, la construction d'un arbre d'événements peut faciliter la quantification.

6.2.3 INTÉGRATION DES BARRIÈRES DE SÉCURITÉ

Les barrières agissant en protection (aval de l'ERC) permettent de réduire la probabilité d'occurrence du phénomène dangereux et/ou de l'accident. Elles permettent de réduire la probabilité d'occurrence de l'événement avec conséquences maximales et de réduire les conséquences de l'événement mitigé. Il en résulte souvent deux phénomènes dangereux :

1. quand la barrière fonctionne, le phénomène dangereux est réduit (réduction de la gravité potentielle), la probabilité associée à ce phénomène varie peu du phénomène sans prise en compte des barrières.
2. quand la barrière ne fonctionne pas, le phénomène dangereux est le même mais a une probabilité réduite.

Il est possible d'illustrer ce principe par le schéma suivant :

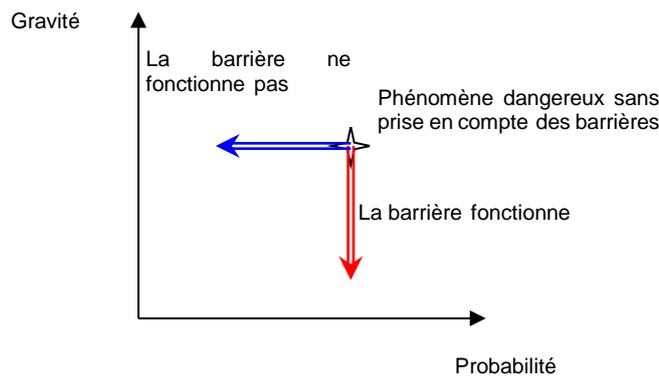


Figure 8 : Prise en compte des barrières de sécurité

Dans l'arbre des défaillances, il est possible de représenter les deux phénomènes dangereux et leur probabilité d'occurrence de la manière suivante :

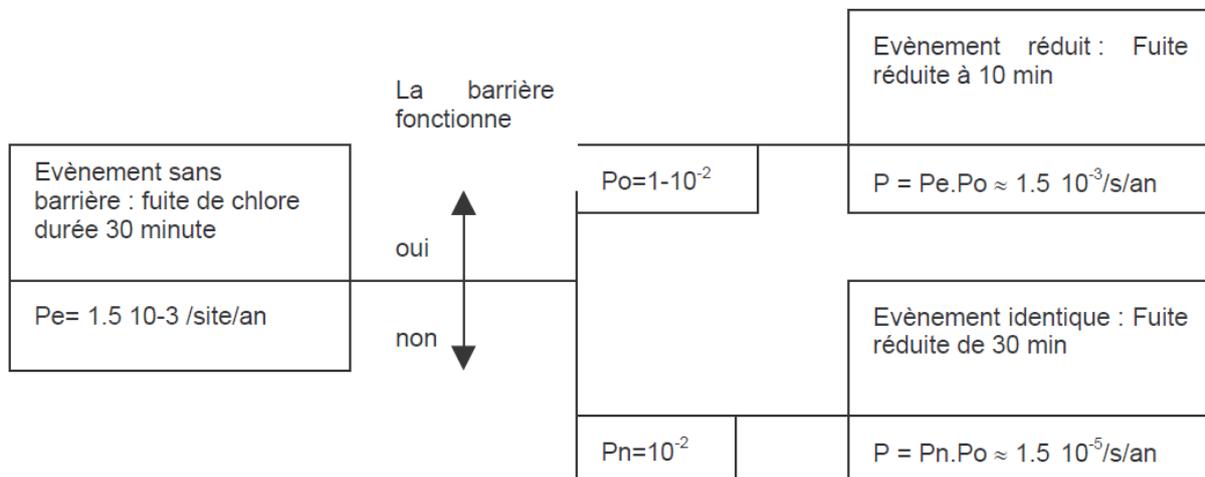


Figure 9 : Prise en compte des barrières dans un arbre des événements

6.3 QUANTIFICATION DES ACCIDENTS

Une fois la probabilité d'occurrence du phénomène dangereux évaluée, celle de l'accident peut être déterminée en prenant en compte la probabilité d'atteinte des cibles humaines (cas des EDD dans le contexte réglementaire français). En général, celle-ci est prise égale à 1, auquel cas la probabilité de l'accident est égale à celle du phénomène dangereux.

S'il est nécessaire d'affiner l'évaluation des probabilités, la probabilité d'atteinte des cibles peut être prise inférieure à 1. Son évaluation s'appuie sur des résultats de modélisations (taille d'un nuage toxique, dimensions d'un feu torche, taille d'un nuage inflammable) ainsi que la dimension relative de la cible, sa position par rapport à l'équipement et la présence d'obstacles. Les conditions atmosphériques (stabilité du vent, température ambiante, rose des vents) peuvent également être prises en compte (voir § 5.5.3.).

De même, la probabilité de présence de cibles peut permettre de pondérer la probabilité d'accident en cas de présence intermittente de cibles (voir § 5.5.4.).

7. CONCLUSION

L'évaluation des probabilités des phénomènes dangereux et des accidents associés est devenue une étape clé des études de dangers et autres études non réglementaires. Des sources de données de formes différentes existent : formules issues de jugements d'experts, données génériques issues du retour d'expérience, retour d'expérience de sites, etc. Ces données peuvent être employées pour des démarches d'évaluation de type quantitative ou semi-quantitative, à partir des événements initiateurs, de l'événement redouté central ou du phénomène dangereux.

Ce document présente les approches courantes d'estimation de la probabilité couramment rencontrées dans les risques industriels ainsi que leurs limites au regard de l'expérience de l'INERIS. Ce rapport fait également le lien entre les différents travaux que l'INERIS a réalisés dans le domaine de l'estimation de la probabilité des accidents.

L'utilisation de données génériques se révélant source d'incertitudes importantes, l'INERIS tend à valoriser la réalisation d'une analyse de risques spécifique à chaque événement redouté central ou phénomène dangereux identifié, couplée à l'intégration du retour d'expérience des industriels et à l'évaluation des performances des barrières de sécurité en place sur le site. Ceci, afin de faire le lien entre :

- l'analyse de risques permettant de choisir et dimensionner l'architecture de sécurité du site et les contraintes réelles locales ;
- l'étude de dangers présentant une image de l'acceptabilité du site au moment de sa réalisation et le Système de Gestion de la Sécurité dont une des missions est d'assurer le maintien des performances dans le temps de l'architecture de sécurité.

Néanmoins l'utilisation de données génériques est possible en mettant en œuvre une analyse a posteriori des résultats pour identifier au cas par cas si des conditions spécifiques au site (effets dominos, absence de barrières de prévention...) ne tendent pas à augmenter les fréquences des ERC, PHD et accidents. Cette approche peut notamment être utilisée dans le cadre d'installations avec de faibles enjeux.

8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] MASSE, F., FLAUW, Y., DEMEESTERE, M. Ω 25 – Agrégation semi-quantitative des probabilités dans les études de dangers des installations classées. Rapport d'étude n° DRA-18-171229-00918A INERIS : 2018, 49 p.
- [2] LENOBLE, C., CHANTELAUVE, G. Mise en perspective des approches probabilistes françaises et néerlandaises, 2010.
- [3] ADJADJ, A., DRANGUET, J.M., MASSE, F. Ω 10 - Évaluation des performances des Barrières Techniques de Sécurité. DRA-17-164432-10199A. INERIS : 2017, 67 p.
- [4] LENOBLE, C. Panorama des sources de données utilisées dans le domaine des analyses quantitatives des risques. DRA-12-124789-07543A. INERIS : 2012, 97 p.
- [5] MICHE, E., PERINET, R. Ω 20 - Démarche d'évaluation des Barrières Humaines de Sécurité. DRA-09-103041-06026B. INERIS : 2009, 49 p.
- [6] FLAUW, Y. Méthode d'évaluation des fréquences et des probabilités à partir des données de retour d'expérience. DRA-15-149432-05862A. INERIS : 2015, 47 p.
- [7] FLAUW, Y., KRIBI, S. DRA71 – Opération B.1.2 : Proposition d'une méthode semi-quantitative d'évaluation des probabilités d'inflammation. DRA-13-133211-12545A. INERIS : 2014, 51 p.
- [8] LENOBLE, C. Guide pratique pour la validation des probabilités des phénomènes dangereux des dépôts de gaz de pétrole liquéfié (GPL). 3ème version. DRA-13-133211-08941B. INERIS : 2014, 65 p.
- [9] DEMEESTERE, M. Guide pratique pour la validation des probabilités des phénomènes dangereux des installations de stockage d'ammoniac. DRA-13-133211-11876C. INERIS : 2014, 71 p.
- [10] BALOUIN, T., KRIBI, S., PRATS, F. Ω 9 – Étude de dangers d'une installation classée. Rapport d'étude n° DRA-15-148940-03446A. INERIS : 2015, 112 p.



INERIS

*maîtriser le risque
pour un développement durable*

Institut national de l'environnement industriel et des risques

Parc Technologique Aiaia
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>