

RAPPORT D'ETUDE
N° DRA-18-171229-00918A

26/01/2018

**Agrégation semi-quantitative des probabilités
dans les études de dangers des installations
classées – OMEGA 25**

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |

Agrégation semi-quantitative des probabilités dans les études de dangers des installations classées

OMEGA 25

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

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Yann FLAUW, Marion DEMEESTERE, François MASSÉ

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.

	Rédacteur	Relecture	Verification		Approbation
NOM	François MASSÉ	Franck PRATS	Valérie DE-DIANOUS	Frédéric MERLIER	Sylvain CHAUMETTE
Qualité	Ingénieur de l'unité Quantification des Risques et Performance des Barrières (QRIB) Direction des Risques Accidentels	Référent technique du pôle Analyse et Gestion intégrées des Risques (AGIR) Direction des Risques Accidentels	Responsable de l'unité Quantification des Risques et Performance des Barrières (QRIB) 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	9
1. INTRODUCTION.....	11
1.1 Les référentiels OMÉGA.....	11
1.2 Cadre réglementaire.....	11
1.3 Objectif et organisation de ce document	13
2. PANORAMA GÉNÉRAL DES TRAVAUX DE L'INERIS EN MATIÈRE DE DETERMINATION DE LA PROBABILITÉ D'ACCIDENT	15
3. RAPPELS SUR QUELQUES NOTIONS	17
3.1 Représentation des scénarios d'accident.....	17
3.2 Probabilité et fréquence.....	19
3.3 Approche semi-quantitative	20
4. AGRÉGATION DES FRÉQUENCES LE LONG DU NŒUD PAPILLON	25
4.1 Introduction.....	25
4.2 Données d'entrée	25
4.3 Traitement des portes OU entre EI.....	28
4.4 Traitement des portes ET entre EI.....	31
4.5 Traitement des événements secondaires.....	33
4.6 Traitement des barrières de sécurité	35
4.7 Domaines de validité des formules d'agrégation semi-quantitative	36
4.8 La probabilité finale	37
5. AGRÉGATION DE LA PERFORMANCE DE PLUSIEURS BARRIÈRES DE SÉCURITÉ	39
5.1 Introduction.....	39
5.2 Agrégation de plusieurs BIS	40
5.3 Agrégation de plusieurs dispositifs actifs.....	44
5.4 Agrégation de plusieurs dispositifs passifs	44
5.5 Agrégation de plusieurs barrières humaines de sécurité.....	45
5.6 Agrégation de barrières de typologies différentes	46
6. CONCLUSION	49
7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	51
8. ANNEXES	53

REPertoire DES MODIFICATIONS

Révision	Relecture	Application	Modifications
Version 1	Octobre 2015		Edition du document
Version 2	Janvier 2018		Intégration d'un numéro de rapport Oméga Réactualisation des références bibliographiques Généralisation des formules de calculs relatives au traitement des portes ET

GLOSSAIRE

APR	Analyse Préliminaire des Risques
BHS	Barrière Humaine de Sécurité
BIS	Barrière Instrumentée de Sécurité
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion
EDD	Étude De Dangers
EDR	Étude Détaillée des Risques
EI	Événement initiateur
ERC	Événement Redouté Central
ES	Événement Secondaire
FIS	Fonction Instrumentée de Sécurité
MD	Marchandises Dangereuses
NC	Niveau de Confiance
PFD	Probability Failure on Demand Probabilité de défaillance à la sollicitation
PhD	Phénomène Dangereux
POA	Probabilité d'Occurrence Annuelle
PPRT	Plan de Prévention des Risques Technologiques
SIS	Système Instrumenté de Sécurité
TMD	Transport de Marchandises Dangereuses
UVCE	Unconfined Vapour Cloud Explosion

1. INTRODUCTION

1.1 LES RÉFÉRENTIELS OMÉGA

Les référentiels OMÉGA (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 CADRE RÉGLEMENTAIRE

Avant 2003, l'approche suivie par la France pour analyser et évaluer les risques accidentels générés par un site industriel était déterministe, c'est-à-dire basée sur l'analyse de scénarios d'accidents prédéfinis, susceptibles de générer les effets les plus importants (aussi appelés « scénarios maximum physiquement possibles », ou SMPP). De fait, des scénarios potentiellement plus probables mais ayant des conséquences moindres pouvaient être exclus de l'étude.

La loi du 30 juillet 2003, qui a fait suite à l'explosion de l'usine AZF à Toulouse, a introduit l'approche probabiliste dans les études de dangers. Cette dernière a l'avantage de permettre une analyse aussi exhaustive que possible des scénarios d'accidents potentiels, qui sont quantifiés en probabilité et en gravité, et de valoriser des barrières de sécurité en prévention et en protection de ces scénarios.

Dans ce contexte, l'article L 512-1 du Code de l'Environnement exprime le besoin d'estimer la probabilité des accidents :

« Le demandeur fournit une étude de dangers qui précise les risques auxquels l'installation peut exposer, directement ou indirectement, les intérêts visés à l'article L. 511-1 en cas d'accident, que la cause soit interne ou externe à l'installation.

Le contenu de l'étude de dangers doit être en relation avec l'importance des risques engendrés par l'installation. En tant que de besoin, cette étude donne lieu à une analyse de risques qui prend en compte la probabilité d'occurrence, la cinétique et la gravité des accidents potentiels selon une méthodologie qu'elle explicite. Elle définit et justifie les mesures propres à réduire la probabilité et les effets de ces accidents ».

Dans le cadre des études de dangers (EDD), l'estimation de la probabilité d'occurrence d'un accident s'effectue dans la phase d'Étude Détaillée des Risques (EDR). Cette phase a pour objectif de déterminer la probabilité, la gravité et la cinétique des phénomènes dangereux 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.

Probabilités et gravités sont estimées selon des échelles définies dans l'Annexe 1 de l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005¹ en vue d'apprécier la maîtrise des risques d'accident majeur de l'établissement considéré. Cet arrêté précise que l'approche utilisée pour l'évaluation de la probabilité d'occurrence peut être qualitative, semi-quantitative ou quantitative, afin d'inscrire les phénomènes dangereux et accidents potentiels sur l'échelle de probabilité présentée ci-dessous.

Tableau 1: Échelle de probabilité (extraite de l'arrêté du 29/09/2005)

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

¹ 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.

La probabilité d'occurrence d'un accident est estimée de façon quantitative ou semi-quantitative selon des règles mathématiques précises. Il est apparu que les règles encadrant le traitement semi-quantitatif des données n'étaient pas clairement établies dans la littérature existante. Ce document a pour but de les préciser.

Notes :

- L'estimation en probabilité et gravité des scénarios d'accident permet d'en déterminer l'acceptabilité selon une grille présentée dans la circulaire du 10 mai 2010². Le document Oméga 9 de l'INERIS³, relatif aux EDD des installations classées, reprend ces éléments.
- L'estimation de la probabilité peut aussi être réalisée dans d'autres cadres que celui de l'EDD, comme des études de sécurité non réglementaires, des analyses de risques prenant en compte la sécurité des personnes et des biens situés à l'intérieur des sites, etc. Ainsi, certains éléments contenus dans ce document peuvent être utilement employés en dehors du cadre réglementaire.

1.3 OBJECTIF ET ORGANISATION DE CE DOCUMENT

Le présent document introduit les règles de calcul permettant d'agréger les données de fréquence / probabilité le long de la séquence accidentelle selon une méthode semi-quantitative, et ce afin d'estimer la classe de probabilité d'occurrence des accidents.

L'estimation de la probabilité d'occurrence d'un accident 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 et affectation d'une classe de probabilité d'occurrence⁴ pour l'accident potentiel ou le phénomène dangereux (PhD) conformément à l'Annexe 1 de l'arrêté du 29 septembre 2005.

Cette démarche est illustrée dans le schéma page suivante.

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 Oméga 9. DRA35 – Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs : L'étude de dangers d'une installation classée. Rapport d'étude n°46055. INERIS : 2006, 103 p.

⁴ Approche française où un traitement semi-quantitatif des données est réalisé.

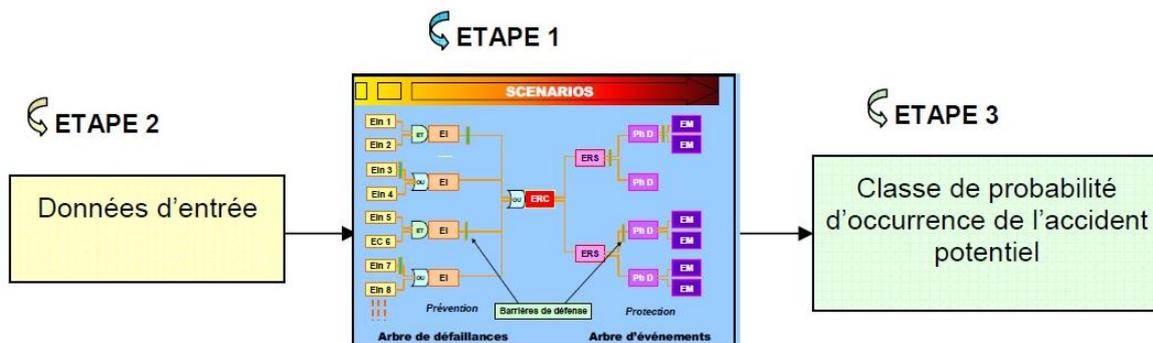


Figure 1: Étapes de l'estimation de la probabilité d'occurrence d'un PhD

Il n'existe pas de méthode unique d'estimation de la probabilité d'occurrence des accidents potentiels. 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). Le choix de cette méthode ainsi que la collecte et le traitement probabiliste des données d'entrée ne sont pas abordés dans ce document. Étant donné le peu de littérature qui se rapporte à la méthode semi-quantitative, seule cette méthode est ici traitée.

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 rappelle la représentation des scénarios d'accident de type nœud papillon et couvre les notions essentielles à connaître sur les probabilités et les fréquences.

Le chapitre 4 détaille les règles mathématiques d'agrégation des fréquences dans le cas où un traitement semi-quantitatif est adopté (Étape 3 du schéma ci-dessus). Des éléments concernant les incertitudes inhérentes au traitement semi-quantitatif y sont également abordés. Le cas particulier de l'agrégation de la performance de plusieurs barrières de sécurité sur une même séquence accidentelle est présenté dans le chapitre 5.

2. PANORAMA GÉNÉRAL DES TRAVAUX DE L'INERIS EN MATIÈRE DE DETERMINATION 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 » [2]
« Démarche d'évaluation des Barrières Humaines de Sécurité – Ω 20 » [4]	« Méthode d'évaluation des fréquences et des probabilités à partir des données de retour d'expérience » [8]
« Proposition d'une méthode semi-quantitative d'évaluation des probabilités d'inflammation » [5]	
Estimation de la probabilité d'un accident	
Approche semi-quantitative	Approche quantitative
Le présent rapport	« Probabilité dans les études de sécurité et études de dangers– Ω 24 » [1]
Documents à destination sectorielle	
Guide pratique pour la validation des probabilités des phénomènes dangereux des dépôts de gaz de pétrole liquéfié (GPL). 3 ^{ème} version » [6]	
Guide pratique pour la validation des probabilités des phénomènes dangereux des installations de stockage d'ammoniac » [7]	
Guide Dépôts de Liquides Inflammables Version - Octobre 2008 [9]	

3. RAPPELS SUR QUELQUES NOTIONS

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

3.1 REPRÉSENTATION DES SCÉNARIOS D'ACCIDENT

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 plate-forme 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 beaucoup d'autres entreprises à la fin des années 90.

Cette représentation des scénarios d'accidents, qui combine pour un système arbre de défaillances et arbre d'événements, est très répandue en France. En effet elle donne un aperçu global des scénarios menant aux accidents majeurs, 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 :

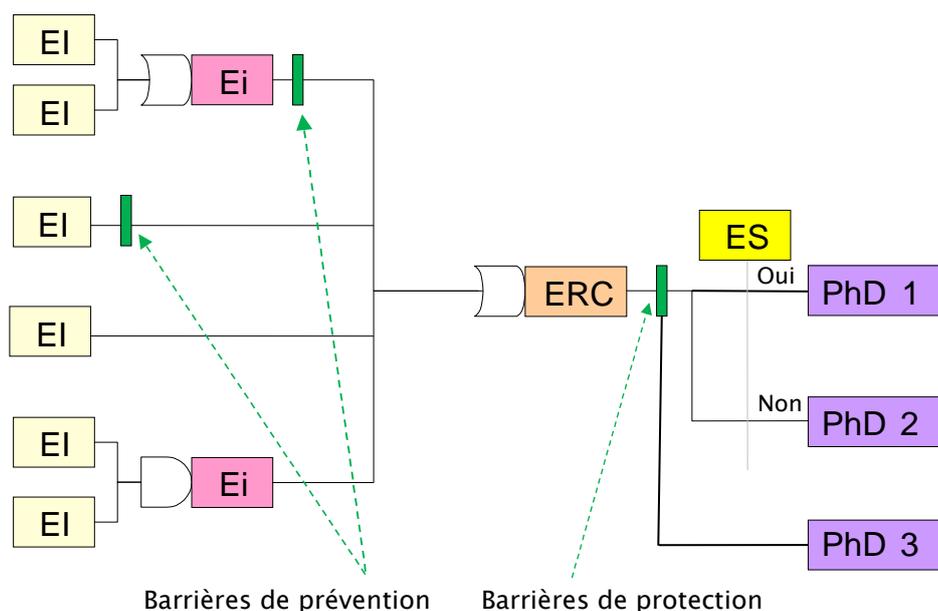


Figure 2 : Représentation d'un scénario d'accident sous forme de nœud papillon

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. Dans le cadre des EDD, 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.

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'intensité a priori plus faible 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 du PhD.

- 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 et de probabilité proche, la probabilité de fonctionnement sur sollicitation d'une barrière performante étant supposée proche de 1.

Si elle ne fonctionne pas, le scénario initial se réalise et est de gravité équivalente, mais de probabilité plus faible (la probabilité de dysfonctionnement sur sollicitation d'une barrière performante est en règle générale inférieure à 0,1).

Ceci est illustré dans le schéma ci-dessous :

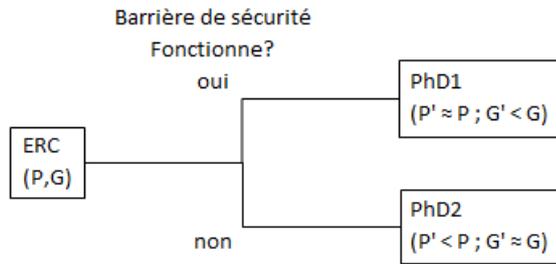


Figure 3 : Barrière de protection

Pour illustration, voici un exemple de nœud papillon construit à partir d’une analyse des risques d’une tuyauterie transportant un produit toxique :

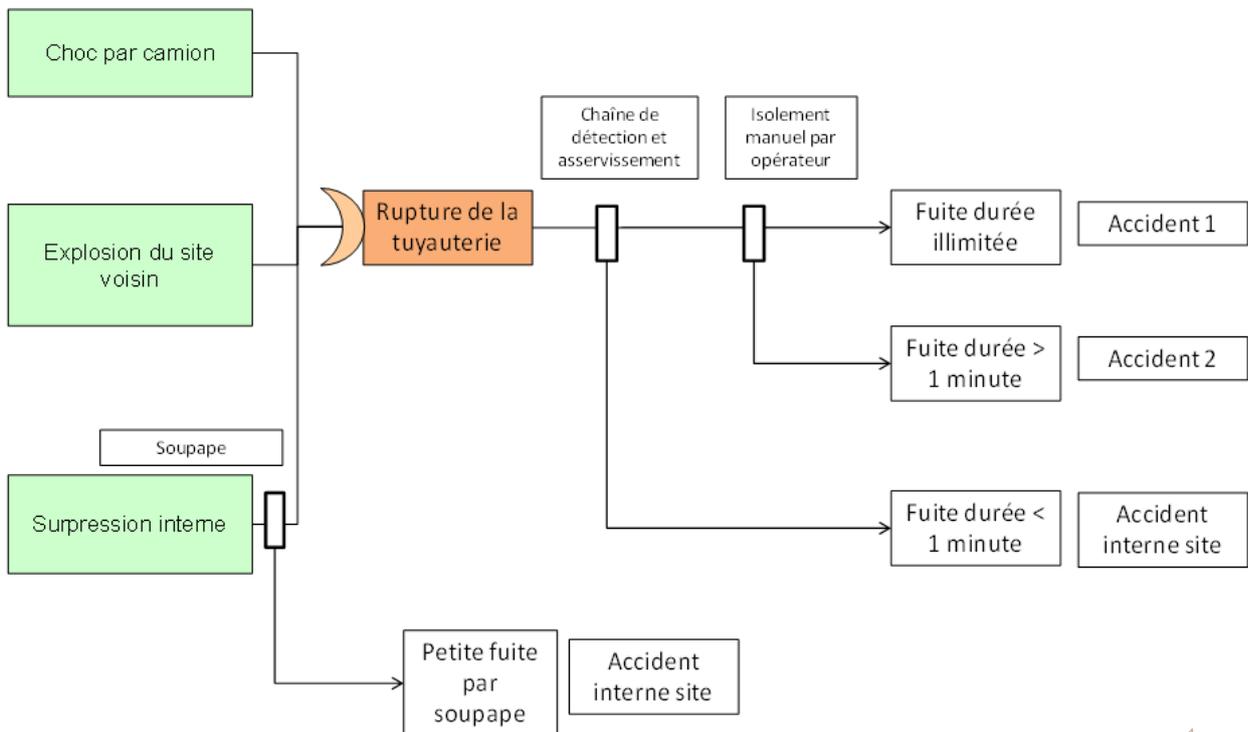


Figure 4 : Nœud papillon d’une rupture de tuyauterie

3.2 PROBABILITÉ ET FRÉQUENCE

3.2.1 ÉCHELLE DE COTATION UTILISÉE

L’échelle de probabilité de l’arrêté du 29/09/2005 présentée dans le Tableau 1 est 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 évènements initiateurs ou évènements redoutés centraux sont par nature plus fréquents que le phénomène dangereux ou l’accident. 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	$10^{+1}/\text{an} \leq \text{Fréquence} < 10^{+2}/\text{an}$	10 à 100 fois/an
F-1	$1/\text{an} \leq \text{Fréquence} < 10^{+1}/\text{an}$	1 à 10 fois/an
F0	$10^{-1}/\text{an} \leq \text{Fréquence} < 1/\text{an}$	1 fois tous les 1 à 10 ans
F1	$10^{-2}/\text{an} \leq \text{Fréquence} < 10^{-1}/\text{an}$	1 fois tous les 10 à 100 ans
F2	$10^{-3}/\text{an} \leq \text{Fréquence} < 10^{-2}/\text{an}$	1 fois tous les 100 à 1000 ans
...		
Fx	$10^{-(x+1)}/\text{an} \leq \text{Fréquence} < 10^{-x}/\text{an}$	

Note :

Par cohérence avec le choix de l'échelle logarithmique pour les classes de fréquence, la valeur représentative de la classe x (dont les fréquences sont comprises entre $10^{-x-1}/\text{an}$ et $10^{-x}/\text{an}$), est $10^{-x-0,5}/\text{an} = 3,16 \cdot 10^{-x-1}/\text{an}$.

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.

3.2.2 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 :

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

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.

3.2.3 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'ISO⁵ 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.

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

• ⁵ FD ISO GUIDE 73 Décembre 2009 - Indice de classement : X50-251

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'événement 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'événement 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 événement A sachant qu'un autre événement 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.

3.3 APPROCHE SEMI-QUANTITATIVE

Comme indiqué au paragraphe 1.3, les règles de calcul propres à l'approche semi-quantitative sont détaillées dans le présent document. Les principes de cette approche sont rappelés dans les paragraphes ci-dessous.

3.3.1 APPROCHE SEMI-QUANTITATIVE TRADITIONNELLE (SANS HISTORIQUE)

Dans une approche semi-quantifiée, la probabilité d'occurrence annuelle du PhD 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 succinctement abordée au paragraphe 4.2.

Les règles proposées dans cette approche ne tiennent pas compte de l'historique, c'est-à-dire qu'elles ne gardent pas en mémoire la classe des événements menant à la porte étudiée : seuls les événements directement en amont de la porte sont considérés. Ce cas est celui couramment utilisé dans les études de dangers, dans lesquelles l'utilisation de classes est admise pour démontrer l'acceptabilité des risques. Les règles de calcul de ce mode sont extrêmement simplifiées mais à utiliser avec précaution dans le cas de nœuds papillon complexes (au moins 2 portes OU enchainées).

Le chapitre 4 aborde plus en détails les règles de calcul propres à cette approche.

3.3.2 APPROCHE SEMI-QUANTITATIVE AVEC HISTORIQUE

Le chapitre 4 présente également une nouvelle approche développée par l'INERIS : le traitement semi-quantitatif avec historique du nœud papillon. Par opposition 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. Cela permet d'éviter de sous-estimer les fréquences de l'ERC et donc la POA des phénomènes dangereux.

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.

Ce traitement est cependant moins précis que le traitement quantitatif, et nécessite de garder une trace de l'historique sous forme d'un nombre d'événements de la classe représentative. Il faudra également appliquer une règle de conversion au niveau de l'ERC pour obtenir une classe de fréquence.

4. AGRÉGATION DES FRÉQUENCES LE LONG DU NŒUD PAPILLON

4.1 INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est de présenter les règles mathématiques utilisées pour propager les fréquences le long d'une séquence accidentelle ou d'un nœud papillon pour arriver à l'estimation de la probabilité d'occurrence annuelle des PhD et accidents majeurs.

Le traitement probabiliste semi-quantitatif des données d'entrée est ici présenté, c'est-à-dire :

- Le traitement des portes OU et ET entre EI (paragraphe 4.3 et 4.4) ;
- Le traitement des événements secondaires (paragraphe 4.5) ;
- Le traitement des barrières de sécurité (paragraphe 4.6 et 5.6) ;

Un bref rappel sur l'estimation des données d'entrée est effectué au paragraphe 4.2.

L'ensemble des règles probabilistes énoncées ci-après sont illustrées sur un exemple concret en Annexe 2.

4.2 DONNÉES D'ENTRÉE

4.2.1 NATURE DES DONNÉES D'ENTRÉE

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

- Fréquence ou classe de fréquence d'occurrence annuelle des EI / ERC. Par exemple :
 - 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 tuyauterie⁶ (la classe de fréquence pourra être déterminée après avoir multiplié cette valeur par la longueur réelle de la tuyauterie) ;

⁶ Valeur provenant du Reference Manual BEVI Risk Assessments

- Niveau de confiance (NC) des barrières de sécurité, qui est l'un des critères permettant d'évaluer la performance de la barrière dans son environnement d'utilisation.

Dans le cas de barrières de sécurité fonctionnant à la sollicitation (lorsque la fonction de sécurité est déclenchée en réponse aux conditions du processus ou à d'autres sollicitations), le niveau de confiance est lié à la probabilité de défaillance à la sollicitation de la barrière (aussi appelée PFD pour Probability Failure on Demand). Le lien entre NC et PFD est le suivant :

A un NC donné : $10^{-NC-1} \leq PFD < 10^{-NC}$
--

Le NC correspond à une réduction de risques comprise entre 10^{NC} et 10^{NC+1} . De manière conservatrice, on peut retenir que le NC est associé à une réduction de risques de 10^{NC} . Il correspond à la probabilité pour qu'une barrière de sécurité technique, dans son environnement d'utilisation, assure la fonction de sécurité pour laquelle elle a été choisie. Cette probabilité est calculée pour une capacité de réalisation et un temps de réponse donnés.

Dans la pratique, c'est le NC qui est utilisé pour quantifier le nœud papillon en probabilité. Le principe d'allocation d'un NC à une barrière de sécurité est explicité en détails dans les Rapport [3] « Oméga 10 : Performance des barrières de sécurité techniques » et Rapport [4] « Oméga 20 : Performance des barrières de sécurité humaines ».

Par exemple :

- Sur 10 sollicitations d'une soupape de sécurité, la soupape fonctionnera au moins 9 fois sur 10 : son niveau de confiance est noté égal à NC1 (sa probabilité de défaillance à la sollicitation est comprise entre 10^{-2} et 10^{-1}). La soupape permet de diviser la probabilité d'un facteur 10 ;
 - Sur 100 sollicitations, le disque de rupture fonctionnera au moins 99 fois sur 100 : son niveau de confiance est noté égal à NC2 (sa probabilité de défaillance à la sollicitation est comprise entre 10^{-3} et 10^{-2}). Le disque permet de diviser la probabilité d'un facteur 100 ;
- 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 est estimée à 10^{-27} .

Ces données d'entrée peuvent être évaluées de plusieurs manières. Si elles sont disponibles et adaptées au cas d'étude, des données de retour d'expérience peuvent être utilisées. Dans le cas contraire, d'autres données ou méthodes d'évaluation devront être employées.

⁷ Valeur provenant du guide Dépôts de Liquides Inflammables – Version Octobre 2008

4.2.2 CAS OÙ LES DONNÉES D'ENTRÉE SONT DES VALEURS

Le traitement semi-quantitatif des données d'entrée nécessite de disposer des classes de fréquences d'occurrence annuelle des EI / ERC en données d'entrée. Si on dispose des fréquences de ces événements sous forme de valeurs, la formule suivante permet de les convertir en classes :

$$\text{Classe}(f) = -\text{Ent}(\log f) - 1$$

Où Ent() désigne la partie entière, log le logarithme en base 10 et f la fréquence de l'événement étudié que l'on veut convertir en classe.

Si en pratique on choisit de convertir les valeurs en classes de fréquence, il faut garder à l'esprit que la conversion en classe :

- Introduit une étape supplémentaire dans le traitement (conversion d'une valeur en classe) ;
- Provoque une perte d'information pouvant conduire à une sous-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.

Ainsi, il est conseillé de n'utiliser le traitement semi-quantitatif présenté dans les paragraphes qui suivent que si les données d'entrée sont des classes et des niveaux de confiance (NC). Lorsque les données d'entrée sont des valeurs de fréquence et de probabilité, il conviendra de préférer un traitement quantitatif.

4.2.3 POINTS DE VIGILANCE POUR LE TRAITEMENT DES DONNÉES D'ENTRÉE

Unités des données d'entrée

Il est recommandé de mentionner les unités pour chacune des données utilisées. Cette précaution permettra d'éviter des erreurs lors de l'estimation de la probabilité d'occurrence annuelle des phénomènes dangereux, par exemple :

- Confusion dans la nature des données que l'on traite, notamment entre fréquence annuelle – en an^{-1} – et probabilité – sans unité – (voir paragraphes 3.2.2 et 3.2.3)
- Cas où la donnée initiale disponible n'est pas la fréquence annuelle d'un EI mais par exemple la fréquence par opération ou par sollicitation : il est nécessaire de se ramener à une fréquence annuelle en prenant en compte les caractéristiques du site (ici le nombre d'opérations effectuées à l'année ou le nombre de sollicitations). On passe alors de la fréquence par opération à la fréquence annuelle en multipliant la fréquence par opération par le nombre d'opérations effectuées à l'année.

Exemple : la fréquence de rupture d'un flexible est estimée à 10^{-2} par opération de transfert. 40 opérations sont effectuées par an. La fréquence annuelle de rupture du flexible est donc estimée à 10^{-2} / opération x 40 opérations / an = 4.10^{-1} / an.

Fréquences et probabilités

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 phénomènes dangereux. Cela permet d'éviter de nombreuses erreurs de confusion entre fréquences et probabilités.

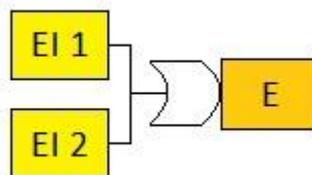
Fonctionnement des barrières de sécurité

La fréquence des EI ne doit pas être estimée en prenant en compte le fonctionnement des barrières de sécurité. De plus, les barrières de sécurité déjà prises en compte dans la fréquence des EI ne doivent pas être comptabilisées. Le risque mentionné ici est de comptabiliser deux fois le fonctionnement de la barrière de sécurité identifiée en prévention.

Remarque : la collecte d'information de retour d'expérience sur le nombre de sollicitations d'une barrière sur une période d'observation donnée peut permettre d'évaluer la fréquence annuelle de l'EI en amont de cette barrière.

4.3 TRAITEMENT DES PORTES OU ENTRE EI

La porte OU signifie que l'événement E se réalise si au moins un des événements en amont de la porte se réalise.



Légende :

- EI : Événement Initiateur
- E : Événement de sortie
-  : Symbole de la porte OU

Remarque importante :

Les règles probabilistes énoncées ci-après sont valables dans le cas où les événements initiateurs en amont de la porte OU sont indépendants, c'est-à-dire que l'occurrence de l'un n'est pas conditionnée par l'occurrence de l'autre.

Le cas « dépendant » fait référence aux cas où les événements initiateurs sont liés de façon déterministe à une cause commune. Dans ce cas, les règles de calcul présentées ci-après sont majorantes.

4.3.1 CAS SEMI-QUANTITATIF SANS HISTORIQUE

Pour le traitement probabiliste en semi-quantitatif, les données d'entrée sont les classes de fréquence annuelle des EI. La classe de fréquence annuelle de l'événement de sortie E peut être estimée par :

$$\text{Classe}(E) = \min [\text{Classe}(EI1), \text{Classe}(EI2)]$$

Attention, cette formule conduit à sous-estimer le risque si EI1 et EI2 sont de même classe.

Dans le cas où plus de deux événements se trouvent en amont de la porte OU, la classe de fréquence de E est alors estimée de la façon suivante⁸ :

Soit x_0 la classe la plus faible :

- Si 3 EI ou moins sont de classe F_{x_0} , $\text{classe}(E) = F_{x_0}$
- Si 4 EI ou plus sont de classe F_{x_0} , $\text{classe}(E) = F_{(x_0 - 1)}$

Exemple : $3F2 + 2F4 = F2$ et $4F2 + F4 = F1$

4.3.2 CAS SEMI-QUANTITATIF AVEC HISTORIQUE

Pour le traitement probabiliste en semi-quantitatif avec historique, les données d'entrée sont les classes de fréquence annuelle des EI. La classe de fréquence annuelle de l'événement de sortie E peut être estimée par :

$$\text{Classe}(E) = \text{Classe}(EI1) + \text{Classe}(EI2)$$

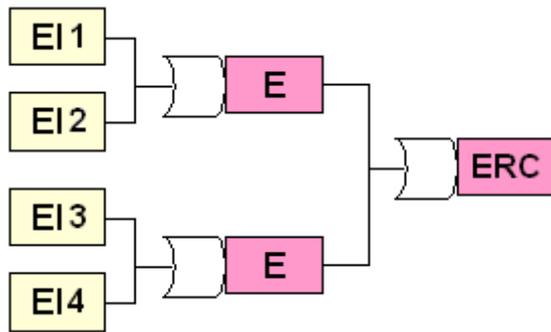
Dans le cas où plus de deux événements se trouvent en amont de la porte OU, il est important de conserver l'historique de toutes les portes OU de la partie arbre des défaillances, et ce afin de ne pas sous-estimer les fréquences de l'ERC et donc la probabilité d'occurrence annuelle des phénomènes dangereux.

Pour cela, la règle à suivre est la suivante : on conserve l'historique des classes de fréquences jusqu'à l'ERC en utilisant la formule suivante :

$$F_x = 0,1 \times F_{(x - 1)}$$

⁸ Comme indiqué au paragraphe 3.2.1, la valeur représentative de la classe x est $3,16 \cdot 10^{x-1}/\text{an}$. Ainsi, si l'on obtient plus de 3,2 fois une classe de fréquence, on passe dans la classe inférieure.

Exemple :



Si les EI ont pour classe F4 pour 3 d'entre eux et F3 pour le dernier, alors les 2 événements intermédiaires sont de fréquence $2F4$ pour l'un et $F3 + F4 = F3 + 0,1F3 = 1,1F3$ pour l'autre.

La fréquence de l'ERC est donc :

$$2F4 + 1,1F3 = 0,2F3 + 1,1F3 = 1,3F3$$

La règle suivante est alors à appliquer au niveau de l'ERC ou des phénomènes dangereux :

- Si l'on obtient plus de 3,2 fois⁹ une classe de fréquence, on passe dans la classe inférieure (un ERC de classe $4F3$ est assimilé à un événement de classe $F2$).
- Sinon, on reste dans la même classe (un ERC de classe $3F3$ est assimilé à un événement de classe $F3$).

Attention, cette règle n'est à appliquer qu'au niveau de l'ERC ou des phénomènes dangereux et pas avant dans la propagation des fréquences le long du nœud papillon, et ce afin de conserver l'historique.

En particulier, si l'on cumule 4 portes OU ayant chacune 4 EI de même classe $F4$, les événements intermédiaires en sortie des portes OU sont chacun de classe $4F4$ et l'ERC de classe $16F4$ ($1,6F3$), assimilée à $F3$ d'après la règle précédente. Convertir la classe des événements intermédiaires en $F3$ aurait amené à un ERC de classe $4F3$, assimilée à une classe $F2$, alors que la valeur moyenne de la fréquence de l'ERC est en fait dans la classe $F3$.

De plus, cette règle est également à appliquer pour les ERC ne découlant pas directement du traitement d'une porte OU (mais découlant par exemple d'un événement auquel une ou plusieurs barrières de sécurité ont été appliquées).

Exemples :

Données d'entrée : 1 événement de classe $F2$, 2 événements de classe $F3$.

$$\text{Classe}(E) = F2 + 2F3 = 1,2F2 = F2.$$

Données d'entrée : 3 événements de classe $F2$, 1 événement de classe $F3$.

$$\text{Classe}(E) = 3F2 + F3 = 3,1F2 = F2.$$

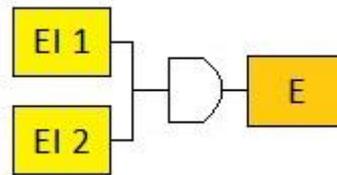
Données d'entrée : 4 événements de classe $F2$, 3 événements de classe $F3$.

$$\text{Classe}(E) = 4F2 + 3F3 = 4,3F2 = F1.$$

⁹ Comme indiqué au paragraphe 3.2.1, la valeur représentative de la classe x est $3,16 \cdot 10^{-x-1}/\text{an}$.

4.4 TRAITEMENT DES PORTES ET ENTRE EI

La porte ET signifie que l'événement E se réalise si les deux événements en amont de la porte EI 1 et EI 2 se réalisent simultanément.

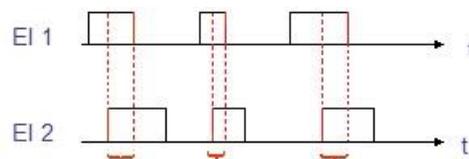


Légende :

- EI : Evénement Initiateur
- E : Evénement de sortie
-  : Symbole de la porte ET

L'étude de la simultanéité d'occurrence des événements en amont de la porte nécessite une analyse détaillée de la nature des événements. Ainsi, la durée des événements initiateurs doit être prise en compte, en plus de leur fréquence d'occurrence annuelle :

- Si la durée de chaque événement étudié est négligeable par rapport à la période de référence qui est l'année (c'est-à-dire que les événements sont ponctuels), alors la fréquence d'occurrence simultanée de ces événements pourra être considérée comme suffisamment faible pour que l'événement en aval de la porte ET ne soit pas retenu dans l'estimation de la fréquence d'occurrence annuelle de l'ERC étudié (car sa fréquence d'occurrence sera alors négligeable devant celles des autres EI).
- Si la durée des deux événements étudiés n'est plus négligeable, alors la période « à risque » n'est plus négligeable comme l'illustre le schéma ci-dessous. On représente ici sur un axe temporel les instants d'occurrence des événements et leur durée par des créneaux. Les périodes à risque (correspondant à la réalisation simultanée des deux événements) correspondent aux périodes en rouge sur le schéma ci-dessous.



Remarque importante :

Les règles probabilistes énoncées ci-après sont valables dans le cas où les événements initiateurs en amont de la porte ET sont indépendants.

Le cas « dépendant » fait référence aux cas où les événements initiateurs sont liés de façon déterministe à une cause commune. Dans ce cas, la fréquence en sortie de

la porte ET est égale à la fréquence de la cause commune¹⁰.

Les données d'entrée du calcul probabiliste sont :

Événement étudié	Donnée d'entrée : classe de fréquence de l'événement (sans unité)	Donnée d'entrée : durée moyenne de l'événement (en an)
E11	<i>Classe (E11)</i>	d_{E11}
E12	<i>Classe (E12)</i>	d_{E12}

Où d_{Eix} est un ratio de temps correspondant à la durée de l'événement ramenée à l'année.

Pour le traitement probabiliste en semi-quantitatif, la classe de fréquence annuelle de l'événement de sortie est estimée par :

$$\text{Classe}(E) = \max [\text{Classe}(E11), \text{Classe}(E12)]$$

Cette formule est très majorante car elle ne prend pas en compte le fait que les deux événements initiateurs, indépendants, doivent se produire **simultanément** pour que l'événement E se produise, ce qui est très peu probable. La classe de E peut donc être beaucoup plus faible (fréquence plus élevée) que les autres classes de fréquences du nœud papillon. Le cas échéant, un traitement fin devra être effectué.

La classe de l'événement de sortie est alors estimée par :

$$\text{Classe}(E) = \text{Classe}(E11) + \text{Classe}(E12) + \text{Tronque}(-\log(d_{E11} + d_{E12}))$$

Où Tronque() désigne la troncature à l'unité et log le logarithme en base 10.

Cette formule est directement issue de la formule du traitement quantitatif¹¹, non développé dans ce document : $F(E) = F(E11) \times F(E12) \times (d_{E11} + d_{E12})$. Elle est valable quand la proportion du temps ou les E_i sont présents est petite, soit pour $10^{-(\text{Min}(\text{Classe}(E11); \text{Classe}(E12)))} * (d_{E11} \cdot d_{E12}) \leq 0,1$.

Si cette condition n'est pas respectée, on peut appliquer l'approximation $\text{Classe}(E) = \max [\text{Classe}(E11), \text{Classe}(E12)]$

¹⁰ Il s'agit en pratique d'une très bonne approximation.

¹¹ Voir document [1] « Probabilité dans les études de sécurité et études de dangers – Ω 24 »

Exemple :

Événement étudié	Donnée d'entrée : classe de fréquence de l'événement (sans unité)	Donnée d'entrée : durée moyenne de l'événement (en h)
EI1	1	1
EI2	1	2

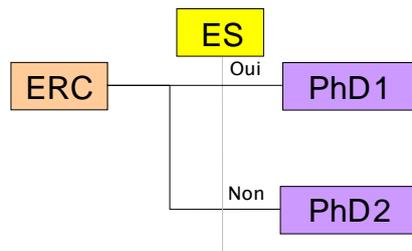
La première formule donne : $Classe(E) = \max(1,1) = 1$

La formule plus fine donne : $Classe(E) = 1 + 1 + Tronque\left(-\log\left(\frac{1+2}{8760}\right)\right) = 5$

(Les durées doivent être exprimées en années, d'où le facteur $\frac{1}{24 \times 365} = \frac{1}{8760}$)

Soit une surestimation de la fréquence d'un facteur 10^4 en utilisant la formule simplifiée. Ainsi, si le scénario d'accident n'est pas acceptable du point de vue de la grille présentée dans la circulaire du 10/05/2010, il peut être possible de réduire sa probabilité d'occurrence en utilisant la formule plus fine présentée ci-dessus.

4.5 TRAITEMENT DES ÉVÉNEMENTS SECONDAIRES



Légende :

- ERC : Événement Redouté Central
- ES : Événement Secondaire (exemple : présence d'une source d'inflammation, présence de vent, etc.) : équivalent à une probabilité conditionnelle
- PhD : Phénomène Dangereux

PhD1 se réalise si ERC se réalise et si ES se réalise conditionnellement à l'ERC.

PhD2 se réalise si ERC se réalise et si ES ne se réalise pas conditionnellement à l'ERC.

Pour le traitement en semi-quantitatif, les données d'entrée nécessaires sont la classe de fréquence de l'ERC et la probabilité conditionnelle d'avoir l'événement ES sachant que l'occurrence de l'ERC, ici notée p .

Les classes des événements de sortie sont estimées par :

$$\begin{aligned} \text{Classe}(\text{PhD1}) &= \text{Classe}(\text{ERC}) - \text{Tronque}(\log(p) - 0,5) \\ \text{Classe}(\text{PhD2}) &= \text{Classe}(\text{ERC}) - \text{Tronque}(\log(1 - p) - 0,5) \end{aligned}$$

Sachant que :

- La valeur représentative de la classe de l'ERC est $10^{-\text{classe}(\text{ERC})-0,5}$;
- La conversion de la fréquence f en classe est réalisée à l'aide de la formule suivante :
 $\text{Classe}(f) = -\text{Ent}(\log f) - 1$ (cf. § 4.2.2).

Remarque importante dans le cas où l'ES consiste en la présence d'une source d'inflammation :

Suite à un ERC de type rejet de gaz inflammable, plusieurs phénomènes dangereux sont susceptibles de se produire en présence d'une source d'inflammation :

- le jet enflammé (ou feu torche) ;
- le VCE ou l'UVCE ;
- la dispersion atmosphérique.

L'occurrence de ces phénomènes dépend du type d'inflammation qui peut avoir lieu : inflammation immédiate ou bien retardée. Le schéma ci-dessous présente ces phénomènes selon le type d'inflammation.

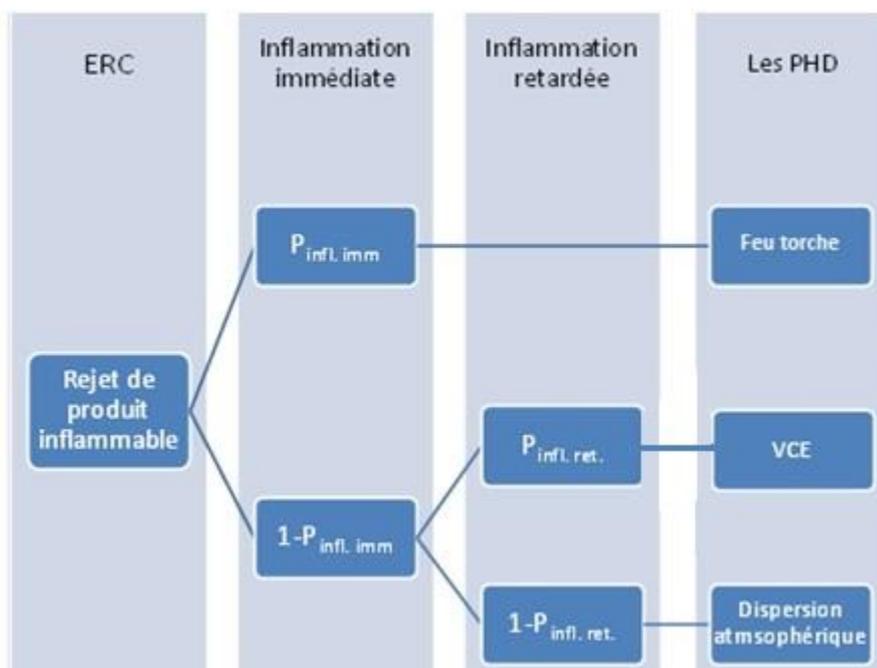


Figure 5 : Différents types d'inflammation et phénomènes dangereux

Distinguer les cas d'inflammation immédiate / retardée se révèle donc important, tant du point de vue de la phénoménologie que du point de vue de la quantification en probabilité (les valeurs de probabilité d'inflammation diffèrent entre autres selon que

celle-ci est immédiate ou retardée).

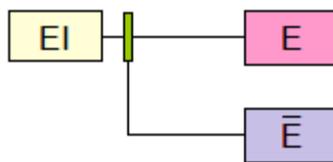
De plus, il convient d'être vigilant à l'écueil suivant : une surestimation de p (probabilité d'inflammation, qu'elle soit immédiate ou retardée) conduit à sous-estimer $1-p$ et donc à sous-estimer la probabilité d'occurrence du ou des phénomènes dangereux résultants. Pour plus de détails, il conviendra de se référer aux documents suivants :

- Le Rapport [1] « Probabilité dans les études de sécurité et études de dangers – $\Omega 24$ », qui fournit des précisions et illustrations complémentaires.
- Le Rapport [5] « Proposition d'une méthode semi-quantitative d'évaluation des probabilités d'inflammation », qui aborde en détail le traitement probabiliste particulier des ES du type « présence d'une source d'inflammation ».

4.6 TRAITEMENT DES BARRIÈRES DE SÉCURITÉ

4.6.1 CAS D'UNE BARRIÈRE DE SÉCURITÉ

La barrière de sécurité est supposée fonctionner à la sollicitation suite à l'occurrence de l'EI. Ainsi, l'événement de sortie E se réalise si l'EI se réalise et si la barrière de sécurité ne fonctionne pas lors de sa sollicitation. Dans le cas contraire (bon fonctionnement de la barrière de sécurité suite à la réalisation de l'EI), un événement complémentaire (\bar{E}) peut se produire.



Légende :

EI : Événement Initiateur

E : Événement de sortie ; \bar{E} : Événement complémentaire à E



: Symbole de la barrière

Pour le traitement en semi-quantitatif, les données d'entrée nécessaires sont la classe de fréquence annuelle de l'événement étudié et le niveau de confiance NC de la barrière de sécurité lors de sa sollicitation. Comme vu au paragraphe 3.2.1, il est proposé de noter les classes de fréquence de la forme nFx , n étant issu de l'historique, toujours égal à 1 pour le traitement sans historique.

Les deux cas de figure suivants peuvent se présenter :

- La barrière de sécurité ne fonctionne pas lors de sa sollicitation. L'événement de sortie E se produira donc et sa classe de fréquence sera la suivante :

- Cas du traitement semi-quantitatif sans historique :

$$Classe(E) = Classe(EI) + NC = F(x + NC)$$

- Cas du traitement semi-quantitatif avec historique :

$$Classe(E) = 4n \times F(x + NC + 1)$$

Exemple : Classe (EI) = 2F3 et NC = 1. Alors x = 3 et :

Cas sans historique : Classe (E) = F4 ;

Cas avec historique : n = 2 et Classe (E) = 8F5

- La barrière de sécurité fonctionne lors de sa sollicitation. Le bon fonctionnement d'une barrière de sécurité peut donner lieu à l'occurrence d'un événement (par exemple : rejet d'un mélange gazeux en surpression suite à l'ouverture d'une soupape de sécurité), dont la fréquence d'occurrence peut être calculée de la façon suivante :

$$f(\bar{E}) = f(EI) \times (1 - PFD) < f(EI)$$

La classe de fréquence de \bar{E} peut donc être majorée par :

$$Classe(\bar{E}) = Classe(EI)$$

4.6.2 CAS DE DEUX BARRIÈRES DE SÉCURITÉ ET PLUS

Le traitement du cas où plusieurs barrières de sécurité s'appliquent à un EI ou un ERC est traité dans le chapitre 5.

4.7 DOMAINES DE VALIDITÉ DES FORMULES D'AGRÉGATION SEMI-QUANTITATIVE

4.7.1 INTRODUCTION

A chaque traitement probabiliste présenté dans ce chapitre, il existe des incertitudes liées à l'utilisation de classes de fréquences. En effet, par nature, le traitement semi-quantitatif n'est pas exact ; il permet, à l'aide d'approximations, de donner des formules simples pour les différentes portes rencontrées dans le nœud papillon.

Ainsi, l'objectif est de vérifier si les approximations fournies dans ce chapitre sont correctes, et ce en calculant les probabilités que les formules du traitement semi-quantitatif soient pertinentes¹². Seules les conclusions sont présentées dans ce paragraphe, le détail des calculs figure en Annexe 5.

¹² Pour des raisons de clarification, ces probabilités sont appelées « indices de confiance » de la formule étudiée.

4.7.2 CAS DU TRAITEMENT D'UNE PORTE OU

Dans le cas d'une porte OU entre 2 événements de classes différentes, les formules introduites aux paragraphes 4.3.1 et 4.3.2 présentent un indice de confiance supérieur à 98%. Elles sont donc bien adaptées.

Dans le cas d'une porte OU entre événements de même classe (plus de 3), les formules présentées aux paragraphes 4.3.1 et 4.3.2 sont également pertinentes. En effet, si l'on cumule au moins 4 événements de même classe x dans une porte OU, il y a une plus grande probabilité (75%) d'être dans la classe $x-1$, qui est la classe retenue par les formules.

4.7.3 CAS DU TRAITEMENT DE BARRIÈRES DE SÉCURITÉ

Avec simplement une barrière de sécurité, l'indice de confiance de la formule du traitement semi-quantitatif présentée au paragraphe 4.6.1 est de 50%. Cette formule est néanmoins acceptable, car elle retient la plus pénalisante (ou plus prudente) des deux classes possibles.

Pour 2 barrières, l'approche semi-quantitative avec historique bénéficie d'un indice de confiance de 66,7%, tandis que l'approche sans historique donne une classe de fréquence plus prudente mais avec un indice de confiance de 16,7%.

Pour plus de 2 barrières, bien que l'indice de confiance n'a pas été déterminé, l'approche avec historique aboutie aux résultats les plus probables.

4.8 LA PROBABILITÉ FINALE

Dans le cas d'un traitement semi-quantitatif, des classes de fréquence annuelles sont utilisées plutôt que des valeurs. Les approximations suivantes seront alors retenues :

- Lorsque la classe de fréquence est supérieure à 0 (fréquence inférieure à $1.an^{-1}$), alors l'approximation suivante est valable :
Classe (POA) = Classe (fréquence), avec les correspondances suivantes :

Echelle quantitative	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	
Classes de fréquence	F5	F4	F3	F2	F1
Classes de probabilité	E	D	C	B	A

- Sinon, si la classe de fréquence est inférieure à 0 (par exemple, l'événement étudié se produit 2 fois par mois et sa classe de fréquence est donc de classe -2), alors la classe de probabilité ne peut être assimilée à la classe de fréquence. Dans ce cas, on approxime par : classe (POA) = $[10^{-1} ; 1]$.

5. AGRÉGATION DE LA PERFORMANCE DE PLUSIEURS BARRIÈRES DE SÉCURITÉ

5.1 INTRODUCTION

Pour agréger plusieurs barrières de sécurité sur un même scénario, il est nécessaire dans un premier temps d'évaluer individuellement leurs performances puis d'évaluer la performance de l'ensemble des barrières de sécurité. Les barrières doivent tout d'abord être agrégées par type :

- Agrégation des barrières instrumentées de sécurité (BIS)¹³ : voir paragraphe 5.2 ;
- Agrégation des dispositifs actifs : paragraphe 5.3 ;
- Agrégation des dispositifs passifs : voir paragraphe 5.4 ;
- Agrégation des barrières humaines de sécurité (BHS) : voir paragraphe 5.5.

Puis ces barrières de 4 typologies différentes sont agrégées entre elles (voir paragraphe 5.6).

L'ensemble des règles d'agrégation des barrières de sécurité énoncées ci-après sont illustrées sur un exemple concret en Annexe 4.

La performance globale est limitée par les dépendances entre les barrières de sécurité ($NC_{global} \leq \sum NC_i$). Il s'agit donc d'évaluer le degré de dépendance entre les barrières de sécurité afin de déterminer les limites à apporter à leur agrégation.

Trois types de dépendances doivent être pris en compte pour l'agrégation des performances des barrières venant à l'encontre d'un même scénario :

- Les modes communs et les causes communes de défaillance ;
- Les dépendances fonctionnelles lorsqu'il s'agit de barrières réalisant la même fonction de sécurité ;
- Les dépendances matérielles lorsque des éléments matériels sont communs à plusieurs barrières.

Les modes communs de défaillance sont des défaillances de plusieurs entités, caractérisées par le même mode de panne, par exemple :

- Alimentations en utilités (air, azote, huile, électricité, etc.) ;
- Deux capteurs qui utilisent la même technologie.

¹³ Une BIS remplit une fonction de sécurité particulière. Elle s'inscrit en général au sein d'un système instrumenté de sécurité (SIS), qui comprend l'ensemble des éléments matériels de détection et traitement de l'information et des actionneurs associés (capteurs, automates, vannes par exemple). Un SIS peut remplir plusieurs fonctions de sécurité i.e. peut contenir plusieurs BIS.

Les causes communes de défaillance sont des défaillances qui affectent plusieurs entités à partir d'un événement unique et qui ne résultent pas les unes des autres, par exemple :

- Phénomènes extérieurs (foudre, inondation, incendie, etc.) ;
- Bouchage ou fermeture d'une vanne sur un piquage s'il y a plusieurs équipements de sécurité sur ce même piquage.

Les éléments matériels communs à plusieurs barrières (automate, capteur, vanne, etc.) ne constituent pas des modes communs ou des causes communes mais des dépendances matérielles entre les barrières. Lorsque des barrières disposent d'éléments communs, le NC de leur ensemble est limité par le NC des éléments communs ($NC_{global} \leq NC_{éléments_communs}$).

5.2 AGRÉGATION DE PLUSIEURS BIS

L'agrégation de plusieurs BIS peut se faire de deux manières :

- Méthode « simplifiée » : considérer que toutes les BIS remplissent la même Fonction Instrumentée de Sécurité (FIS), et appliquer dans ce cas l'Oméga 10 (avec un NC max global limité à 3).
- Méthode « avancée » en deux étapes :
 1. Agrégation des barrières réalisant la même FIS pour obtenir le NC de FIS : dépendances fonctionnelles.
 2. Agrégation des différentes FIS entre elles.

Le résultat de l'agrégation ne correspondra pas nécessairement à la somme des différents NC car il sera limité par les éléments matériels communs et les causes communes de défaillance.

Pour mener à bien cette dernière méthode, il est nécessaire dans un premier temps d'identifier les différentes FIS intervenant sur la séquence accidentelle étudiée et les différentes BIS réalisant chacune de ces FIS.

On estime que des BIS intervenant dans une même séquence accidentelle réalisent des fonctions différentes si elles mesurent et traitent des paramètres physiques différents ou elles interviennent à des moments différents de la séquence accidentelle.

Des BIS ne remplissant pas ces conditions sont supposées réaliser la même FIS.

Dans un souci de simplification, il est préconisé, pour une séquence accidentelle donnée, d'agréger l'ensemble des BIS selon la méthode « simplifiée », et de ne mettre en œuvre la méthode « avancée » que si la démonstration de la maîtrise des risques le nécessite (NC_{global} recherché supérieur ou égal à 4).

Note : La règle d'agrégation des FIS entre elles est assez pénalisante. De ce fait, il est probable que la mise en œuvre de la méthode « avancée » amène à déterminer un NC plus faible que par l'application de la méthode « simplifiée ». Dans ce cas, il faut retenir la valeur du NC déterminée par la mise en œuvre de la méthode simplifiée. En d'autres termes, si l'on met en œuvre la méthode « avancée », le NC à retenir est le maximum des NC calculés par les deux méthodes.

5.2.1 ÉTAPE 1 : IDENTIFICATION ET ARCHITECTURE DES BIS POUR UNE FONCTION DONNÉE

Lorsque plusieurs BIS sont présentes sur une même séquence accidentelle et réalisent une même fonction, il convient d'identifier les éléments des différentes chaînes de sécurité en prenant soin de distinguer ce qui est redondant (deux actionneurs qui agissent indépendamment l'un de l'autre sur la séquence accidentelle) de ce qui est complémentaire (deux actionneurs qui doivent fonctionner ensemble pour que la séquence accidentelle soit maîtrisée). En effet, deux BIS différentes correspondent à deux chaînes de sécurité dont les détecteurs peuvent être différents mais dont les unités de traitement (automates) et/ou les actionneurs (une vanne d'isolement par exemple) peuvent être communs.

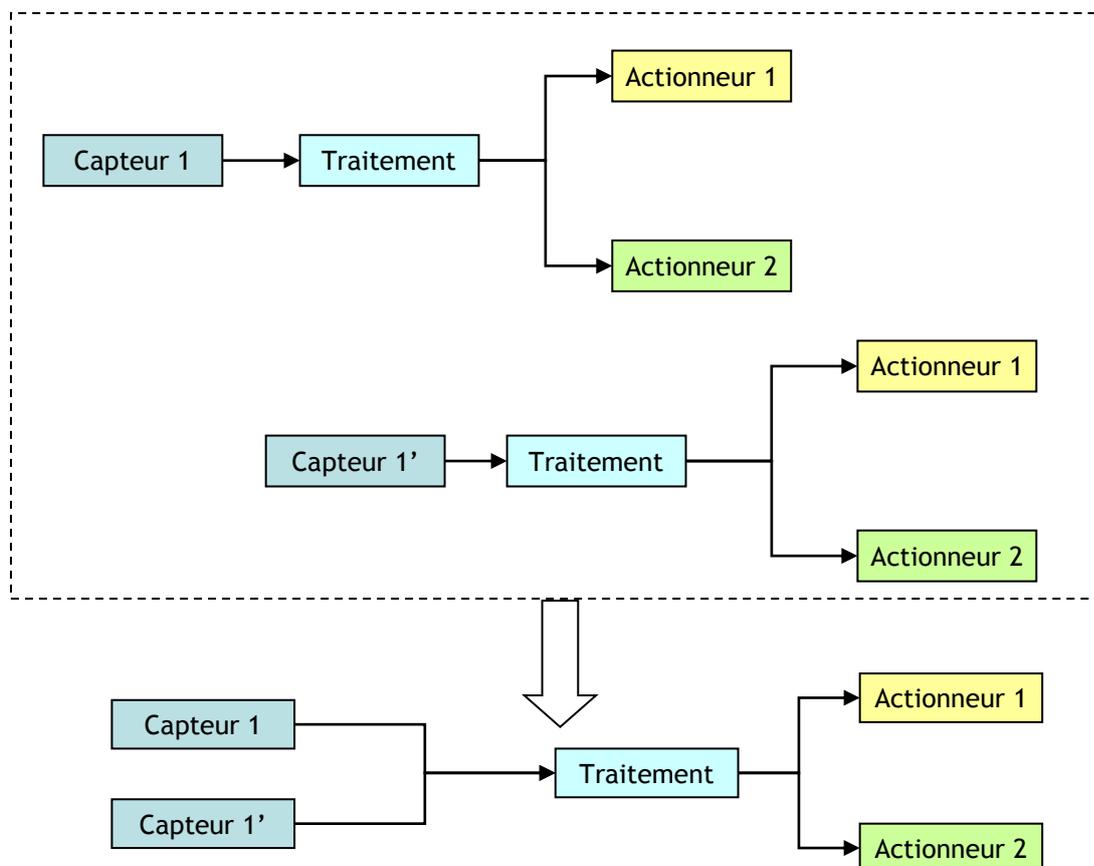


Figure 6 : Agrégation de deux BIS réalisant la même FIS

Remarque :

Il faut également prendre en considération les éventuelles logiques de vote programmées¹⁴ de nature à minorer le niveau de confiance de la BIS associée. D'une manière générale, lorsqu'il y a une logique de vote intégrant plusieurs capteurs, ceux-ci ne peuvent faire partie que d'une seule BIS en considérant que :

- 1oo1 : correspond au cas usuel (1 capteur) ;

¹⁴ La notation utilisée est la suivante : une architecture XooY (X out of Y, X < Y) est constituée de Y éléments redondants, chacun réalisant la fonction de sécurité souhaitée. Il suffit que X de ces éléments fonctionnent pour que la fonction de sécurité soit réalisée.

- 1002 : est équivalent à 2 capteurs considérés indépendants l'un de l'autre ;
- 2002 : on se rapporte au cas 1001, même si la situation est a priori moins sécuritaire (plus de capteurs potentiellement défaillants) ;
- 2003 : revient à considérer 2 capteurs uniquement (on retiendra les 2 moins performants si les NC des capteurs sont différents) ;
- 1003 : est équivalent à 3 capteurs considérés indépendants les uns des autres ;
- 2004 : revient à considérer 2 capteurs uniquement (on retiendra les 2 moins performants si les NC des capteurs sont différents).

5.2.2 ÉTAPE 2 : ÉVALUATION DU NC DE CHAQUE FIS

La deuxième étape consiste à évaluer le NC global de la FIS étudiée, résultant de l'agrégation des BIS (NC_{FIS}).

Dans les cas de deux BIS à NC non nul, ce NC_{FIS} après agrégation correspond au $NC_{max} + 1$, avec un maximum de NC3.

Dans le cas de trois BIS ou plus à NC non nul, le NC_{FIS} est égal à NC3.

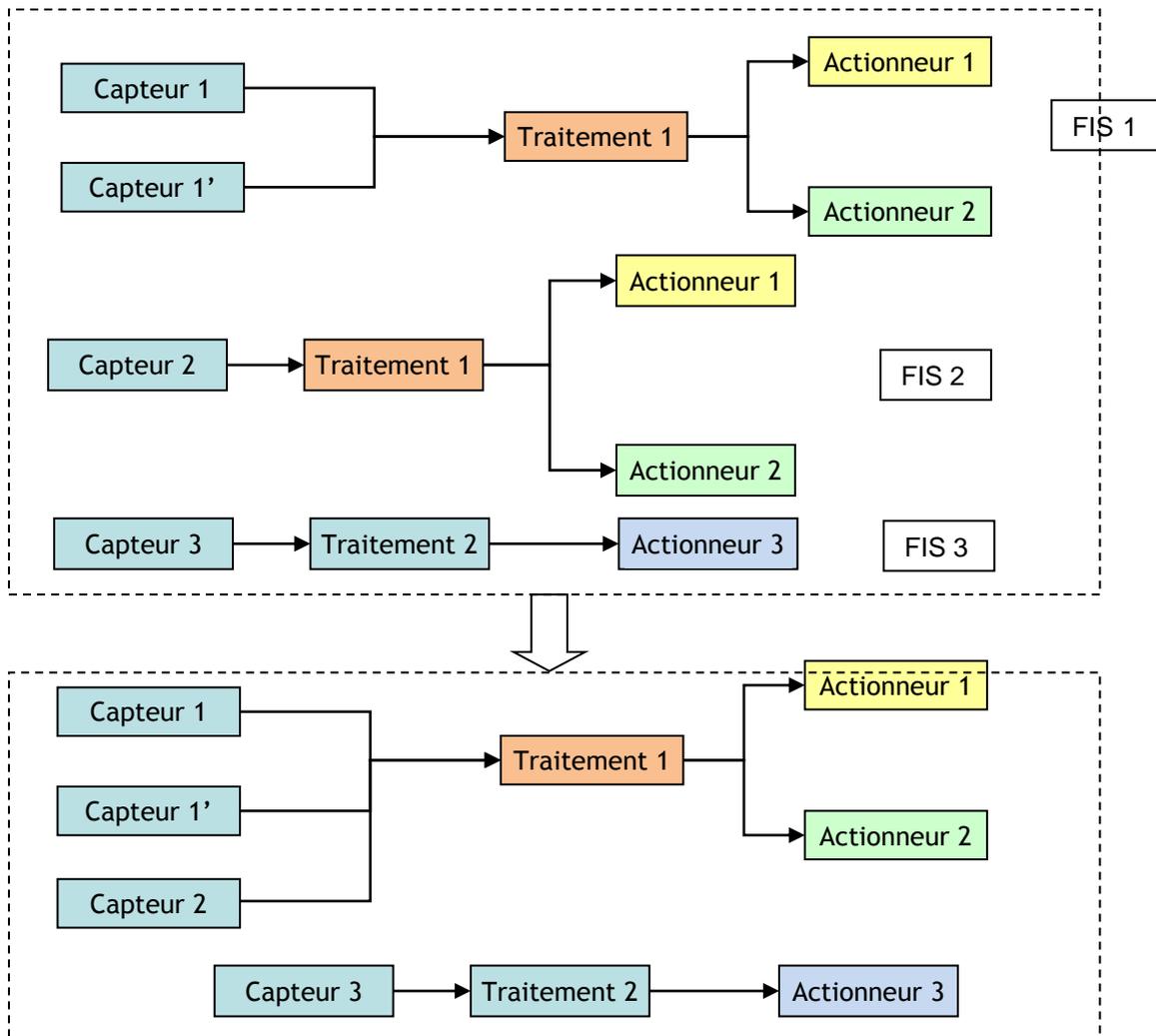
Remarque : Le NC de l'ensemble des BIS ne peut pas dépasser le NC des éléments communs.

L'agrégation de plusieurs BIS réalisant la même FIS se fera par utilisation des tableaux de détermination des NC d'une BIS, disponible dans l'Oméga 10, en considérant tous les éléments constituant une FIS.

5.2.3 ÉTAPE 3 : AGRÉGATION DES FIS

Plusieurs FIS peuvent être identifiées sur une même séquence accidentelle, chaque FIS étant réalisée par une ou plusieurs BIS. On évalue à cette étape le NC global de plusieurs FIS différentes. Il s'agit de FIS reposant sur des principes de détection différents (principalement pour la partie détection, l'unité de traitement ainsi que certains actionneurs peuvent faire partie de plusieurs FIS).

De la même façon que dans le paragraphe 5.2.1, il est nécessaire de déterminer les éléments communs aux différentes FIS (voir schéma page suivante), puis de déterminer le NC des capteurs, des unités de traitement et des actionneurs selon les règles présentées ci-après en prenant bien garde de prendre en compte les éventuels éléments communs ainsi que l'appartenance de plusieurs BIS à une même FIS (dans ce cas on se rapporte au paragraphe 5.2.2 avant de revenir dans ce paragraphe).



Les règles ci-dessous s'appliquent au calcul du niveau de réduction de risque global (NC_{GIS}) :

1. Le NC maximum d'une FIS est de 3 ;
2. Le NC global NC_{GIS} est au maximum égal à 6.

Le niveau de réduction de risque global obtenu en agrégeant les FIS est :

$$NC_{GIS} = \text{Min} \left(\sum NC_i, \text{Max}(NC_i) + K \right)$$

La conséquence de cette formule est que le nombre de FIS agrégées sur un même scénario se limite à 3.

K est un facteur, déterminé par l'INERIS, caractérisant la tolérance aux causes communes de défaillance. Il peut prendre les valeurs suivantes :

- K = 0 pour une tolérance nulle,
- K = 1 pour une tolérance faible,
- K = 2 pour une tolérance moyenne,
- K = 3 pour une tolérance élevée.

L'évaluation de ce facteur est faite par l'intermédiaire d'une grille d'évaluation présentée en Annexe 3.

Ainsi, pour l'agrégation de deux FIS le niveau de confiance global peut prendre les valeurs suivantes :

Tableau 3 : Tableau des NC_{GIS} en fonction des NC des FIS pour l'agrégation de deux FIS

	NC1	NC2	NC3
NC3	3 à 4	3 à 5	3 à 5
NC2	2 à 3	2 à 4	
NC1	1 à 2		

Pour l'agrégation de trois FIS le niveau de confiance global peut prendre les valeurs suivantes :

Tableau 4 : Tableau des NC_{GIS} en fonction des NC des FIS pour l'agrégation de 3 FIS

FIS1	NC1			NC2		NC3
FIS2	NC1	NC2	NC3	NC2	NC3	NC3
FIS3						
NC1	1 à 3	2 à 4	3 à 5	2 à 4	3 à 5	3 à 5
NC2	2 à 4	2 à 4	3 à 5	2 à 5	3 à 6	3 à 6
NC3	3 à 5	3 à 5	3 à 5	3 à 6	3 à 6	3 à 6

Le tableau ci-dessus tient compte du critère imposant la mise en œuvre de FIS au minimum de SIL 2 pour obtenir $K = 3$.

5.3 AGRÉGATION DE PLUSIEURS DISPOSITIFS ACTIFS

Le NC associé à plusieurs dispositifs actifs, du moment que les critères efficacité et temps de réponse sont adaptés, sur une même séquence accidentelle est déterminé :

- en utilisant le tableau ad-hoc de l'Oméga 10 s'il s'agit de dispositifs remplissant la même fonction de sécurité (ex : plusieurs soupapes) ;
- en réalisant la somme des NC de chaque dispositif s'il s'agit de dispositifs ne remplissant pas la même fonction de sécurité.

5.4 AGRÉGATION DE PLUSIEURS DISPOSITIFS PASSIFS

Le NC associé à plusieurs dispositifs passifs sur une même séquence accidentelle est déterminé en réalisant la somme des NC de chaque dispositif.

5.5 AGRÉGATION DE PLUSIEURS BARRIÈRES HUMAINES DE SÉCURITÉ

Cet aspect est abordé dans le référentiel Oméga 20 (Rapport [4]) et repris ici de façon synthétique.

5.5.1 BHS ASSURANT DES FONCTIONS DIFFÉRENTES

En l'absence de mode commun de défaillance entre les BHS qu'on souhaite agréger (ex : opérateurs différents, lieux différents, scénarios différents dans le nœud papillon, etc.), on pourra sommer les niveaux de confiance des barrières entre elles. Ceci équivaut à considérer la performance des barrières indépendamment les unes des autres.

Toutefois, il faudra s'assurer que le temps de réponse global est bien évalué en prenant en compte la mise en œuvre de l'ensemble des barrières de sécurité agissant sur le scénario et que ce dernier est en adéquation avec la cinétique du scénario.

Notamment dans le cas où deux barrières interviendraient au cours de la séquence accidentelle (c'est-à-dire après l'ERC), la seconde barrière sera sollicitée en cas d'échec de la première, les temps de réponse des deux barrières vont donc s'additionner ; la seconde barrière ne sera performante que si ce temps total est compatible avec la cinétique de l'accident.

5.5.2 BHS ASSURANT LA MÊME FONCTION DE SÉCURITÉ

Pour les barrières agissant en préalable à l'activité à risques, étant entendu qu'il n'existe pas de pression temporelle par rapport à la cinétique d'un scénario, il est possible de considérer une capacité de rattrapage par la mise en œuvre d'une étape de vérification supplémentaire.

Exemple : Le démarrage d'une réaction chimique est conditionné par le pH d'un milieu réactionnel ; ce pH est contrôlé une première fois par l'opérateur de production puis par le laboratoire de l'entreprise.

La mise en œuvre d'une opération de test ou de contrôle supplémentaire est considérée comme susceptible d'augmenter le niveau de confiance de l'activité d'un niveau au maximum. Pour une BHS le niveau de confiance maximal est de 2. Dans ce cas, et de façon prudente, la sommation des niveaux de confiance est limitée à 3 pour la fonction de sécurité de façon à prendre en compte la possibilité de défaillance de mode commun (par exemple : arrangements informels entre opérateurs découlant d'une confiance mutuelle).

5.5.3 CAS D'UN OPÉRATEUR ASSURANT PLUSIEURS FIS

Un opérateur peut être en charge à la fois :

- d'une barrière qui intervient en amont de la séquence accidentelle en préalable à l'activité à risque (cas de la barrière de vérification),
- et d'une barrière qui intervient en rattrapage d'une séquence accidentelle déjà initiée (cas de barrière de rattrapage).

Dans ce cas, les activités concernées par les deux barrières sont bien distinctes de par leur position dans la séquence accidentelle : l'addition des niveaux de confiance

des deux barrières est possible à la condition qu'il n'y ait pas d'autre mode commun de défaillance.

Le lecteur est invité à se reporter au *Rapport [4]* « Démarche d'évaluation des Barrières Humaines de Sécurité – Ω 20 » pour plus de renseignements sur le sujet.

5.6 AGRÉGATION DE BARRIÈRES DE TYPOLOGIES DIFFÉRENTES

5.6.1 CAS SEMI-QUANTITATIF SANS HISTORIQUE

A priori, le NC de l'ensemble constitué par plusieurs barrières de typologies différentes, venant à l'encontre d'une même séquence accidentelle, est égal à la somme des NC associés à chacune de ces barrières. Il est néanmoins nécessaire d'identifier les causes communes et/ou modes communs de défaillance associées à toute ou partie de ces barrières afin de s'assurer que ce niveau de confiance global n'est pas dégradé.

La généralisation du calcul avec n barrières de sécurité **indépendantes** et de typologies différentes s'appliquant à un EI ou un ERC de classe de fréquence Fx peut être faite ainsi :

$$Classe(E) = Classe(EI) + \sum_{k=1}^n NC_k = F \left(x + \sum_{k=1}^n NC_k \right)$$

5.6.2 CAS SEMI-QUANTITATIF AVEC HISTORIQUE

La formule précédente est très pénalisante dès que l'on cumule quelques barrières de sécurité, car elle prend implicitement comme valeur de PFD de la barrière de sécurité la borne supérieure de l'intervalle représenté par le niveau de confiance.

Dans le cas où une étude de fiabilité a été réalisée sur une ou plusieurs barrières, il est possible d'affiner la formule du cas sans historique.

Nous disposons dans ce cas d'une ou plusieurs valeurs de PFD inférieures à la borne supérieure de l'intervalle de confiance représenté par le NC des barrières en question. Il est alors proposé de remplacer dans la formule précédente le niveau de confiance par cette valeur plus fine, **tout en s'assurant qu'elle reste dans l'intervalle de confiance autorisé par le NC.**

La formule mathématique est la suivante :

$$Classe(E) = Classe(EI) \times \prod_{k=1}^n PFD_k$$

Où PFD_k est la probabilité de défaillance de la barrière k arrondie à une valeur du type $\alpha 10^{-NC-1}$ avec $1 \leq \alpha \leq 10$.

En effet, l'intervalle autorisé par le NC est $[10^{-NC-1} ; 10^{-NC}]$. L'arrondi devra être fait de manière majorante.

Exemples :

On considère un événement de classe F1, et deux barrières de sécurité de typologie différente, chacune de NC1.

La formule sans historique donne : $Classe(E) = F(1 + 1 + 1) = F3$

Si les PFD de ces barrières sont disponibles grâce à une étude de fiabilité, il faut dans un premier temps les arrondir à une valeur du type $n \cdot 10^{-2}$, avec $1 \leq n \leq 10$ (car l'intervalle autorisé par le NC est $[10^{-2} ; 10^{-1}]$).

Par exemple, si les PFD sont respectivement $2,12 \cdot 10^{-2}$ et $8,5 \cdot 10^{-2}$, on les arrondit à $3 \cdot 10^{-2}$ et $9 \cdot 10^{-2}$, et le calcul se fait ensuite de la façon suivante :

$$Classe(E) = F1 \times 3 \cdot 10^{-2} \times 9 \cdot 10^{-2} = 3 \times 9 F(1 + 2 + 2) = 27 F5 = 2,7 F4$$

Si les PFD étaient $3 \cdot 10^{-4}$ et $5,5 \cdot 10^{-2}$, on les aurait arrondies à 10^{-2} (plus petite valeur autorisée par le niveau de confiance) et $6 \cdot 10^{-2}$, et le calcul deviendrait :

$$Classe(E) = F1 \times 10^{-2} \times 6 \cdot 10^{-2} = 6 F5 = F4$$

Dans le cas où aucune étude de fiabilité n'a été réalisée, on considère que la vraie valeur (inconnue) de la PFD est en milieu de classe (comme pour les événements initiateurs). La classe de fréquence annuelle moyenne de l'événement de sortie E est alors donnée par :

$$\begin{aligned} \text{si } k \text{ pair, } Classe(E) &= nF \left[x + \sum NC_k + \frac{k}{2} \right] \\ \text{si } k \text{ impair, } Classe(E) &= 4n \times F \left[x + \sum NC_k + \frac{k + 1}{2} \right] \end{aligned}$$

Avec k : nombre de barrières de sécurité agrégées

Exemple : $Classe(EI) = 2 F2$. Si on ajoute 2 BS de NC1, $Classe(E) = 2 F5$. Si on ajoute 3 BS de NC1, $Classe(E) = 8 F7$.

6. CONCLUSION

Le présent document introduit les règles de calcul permettant d'agrèger les données de fréquence / probabilité le long de la séquence accidentelle selon une méthode semi-quantitative, et ce afin d'estimer la classe de probabilité d'occurrence annuelle des accidents majeurs.

Le traitement semi-quantitatif nécessite de disposer de données d'entrée sous forme de classes (intervalles de fréquences), alors qu'en pratique, celles-ci peuvent être directement présentées sous forme de valeurs. La conversion des valeurs en classes de fréquence provoque une perte d'information pouvant conduire à une sous-estimation du risque. De plus, le traitement semi-quantitatif du nœud papillon introduit des incertitudes qui ne doivent pas être négligées. Ce rapport montre que les probabilités de se tromper de classe en suivant cette approche sont élevées. Par exemple pour les portes OU :

- si l'on cumule 3 événements de même classe de fréquence, l'événement de sortie a environ une chance sur deux d'être dans la classe de fréquence plus élevée ;
- si l'on en cumule 4, il a environ 3 chances sur 4 de l'être.

Cette conclusion est liée au traitement semi-quantitatif sans historique, celui couramment utilisé dans les études de dangers. Le présent rapport présente une approche de traitement semi-quantitatif avec historique, prenant en compte la suite d'événements menant à la porte étudiée, qui est plus précis.

Les approches sans et avec historique sont détaillées dans ce rapport. Les formules sont synthétisées dans le tableau page suivante. Les domaines de validité de ces formules sont indiqués dans le corps du rapport.

Tableau 5 : Formules de calculs pour le traitement semi-quantitatif avec / sans historique

	Porte OU entre n EI	Porte ET entre 2 EI	n barrières de sécurité	Conversion au niveau des PhD
Traitement semi-quantitatif sans historique	<p>On note x_0 la classe de l'événement le plus fréquent.</p> <p>Si x_0 est atteint 3 fois ou moins, $Classe(E) = Fx_0$</p> <p>Si x_0 est atteint 4 fois ou plus, $Classe(E) = F(x_0 - 1)$</p> <p>Exemples :</p> <p>$3F2 + 2F4 = F2$</p> <p>$4F2 + F4 = F1$</p>	<p>Classe (E) = Classe (EI1) + Classe (EI2) + Tronque($-\log(d_{EI1} + d_{EI2})$)</p> <p>Avec d_{EIk} la durée moyenne de l'EIk</p> <p>Exemple :</p> <p>Classe (EI1) = Classe (EI2) = F1 $d(EI1) = 1h$ et $d(EI2) = 2h$</p> <p>Classe (E)</p> <p>$= 1 + 1 + Tronque\left(-\log\left(\frac{1+2}{8760}\right)\right)$</p> <p>$= 5$</p>	<p>En notant $Classe(EI) = Fx$, on a</p> <p>$Classe(E) = F(x + \sum NC_k)$</p> <p>Exemples :</p> <p>$F2$ et $MMR NC1 \rightarrow F(2 + 1) = F3$</p> <p>$F2$ et $2 MMR NC1 \rightarrow F(2 + 1 + 1) = F4$</p>	<p>Conversion classique (Arrêté PCIG)</p>
Traitement semi-quantitatif avec historique	<p>$Fx = 0,1F(x - 1)$</p> <p>On ne garde qu'un chiffre après la virgule.</p> <p>Exemples :</p> <p>$3F2 + 2F3 = 3,2F2$</p> <p>$4F2 + 3F4 = 4F2$</p>	<p>Exemple :</p> <p>Classe (EI1) = Classe (EI2) = F1 $d(EI1) = 1h$ et $d(EI2) = 2h$</p> <p>Classe (E)</p> <p>$= 1 + 1 + Tronque\left(-\log\left(\frac{1+2}{8760}\right)\right)$</p> <p>$= 5$</p>	<p>En notant PFD_k la probabilité de défaillance à la sollicitation de la barrière k,</p> <p>$Classe(E) = Classe(EI) \times \prod_{k=1}^m PFD_k$</p> <p>Exemple :</p> <p>$PFD_1 = 2,12 \cdot 10^{-2}$, arrondie à $3 \cdot 10^{-2}$</p> <p>$PFD_2 = 8,5 \cdot 10^{-2}$, arrondie à $9 \cdot 10^{-2}$</p> <p>$Classe(E) = F1 \times 3 \cdot 10^{-2} \times 9 \cdot 10^{-2}$</p> <p>$= 3 \times 9F(1 + 2 + 2)$</p> <p>$= 27F5 = 2,7F4$</p>	<p>Si $Classe(PhD) > 3,2Fx$, on l'assimile à la classe $F(x - 1)$ avant la conversion</p> <p>Exemples :</p> <p>$3F3 \rightarrow F3 \rightarrow C$</p> <p>$4F3 \rightarrow F2 \rightarrow B$</p>

7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] DEMEESTERE, M., PRATS, F. Probabilité dans les études de sécurité et études de dangers– Ω 24. DRA-17-170830-11388A. INERIS : 2017, 61 p..
- [2] LENOBLE, C. Panorama des sources de données utilisées dans le domaine des analyses quantitatives des risques. DRA-12-124789-07543A. INERIS : 2012, 97 p.
- [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] MICHE, E., PERINET, R. Démarche d'évaluation des Barrières Humaines de Sécurité - Ω 20. DRA-09-103041-06026B. INERIS : 2009, 49 p.
- [5] 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.
- [6] LENOBLE, C. Guide pratique pour la validation des probabilités des phénomènes dangereux des dépôts de gaz de pétrole liquéfié (GPL). 3^{ème} version. DRA-13-133211-08941B. INERIS : 2014, 65 p.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Guide Dépôts de Liquides Inflammables Version - Octobre 2008 – *Ressource professionnelle disponible sur internet*, 171 p.

8. ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
1	Lien mathématique entre fréquence et probabilité	2
2	Exemple concret d'application des règles probabilistes – Traitement semi-quantitatif	9
3	Détermination du facteur K	2
4	Exemple concret d'application des règles d'agrégation des barrières de sécurité	9
5	Vérification de la pertinence des formules d'agrégation semi-quantitative	6

Annexe 1
Lien mathématique entre fréquence et probabilité

Dans le domaine du risque accidentel, la fréquence annuelle d'occurrence d'un événement est généralement la seule information à disposition pour l'estimation de la probabilité. Dans ce cadre limité, on peut estimer la probabilité d'occurrence annuelle de l'événement à partir de sa fréquence f exprimée en an^{-1} .

Pour cela, on suppose que l'événement (noté par la suite E) a autant de chance de se produire aujourd'hui que demain (en l'absence de prise en compte du phénomène de vieillissement). Sa probabilité instantanée d'occurrence est constante au cours du temps ; on la note λ .

Par définition, la fréquence de E est son espérance mathématique divisée par la durée d'observation. La fréquence moyenne d'occurrence de E sur une période d'observation de durée T est donc : $f_T = \frac{1}{T} \int_0^T \lambda dt = \lambda$. La fréquence moyenne est donc indépendante de la durée d'observation ; on la note f .

On se donne maintenant un référentiel temporel, avec $t = 0$ date de début d'observation. On note $P(t)$ la probabilité qu'à l'instant t , l'événement ait eu lieu au moins une fois depuis la date $t = 0$. La probabilité d'occurrence annuelle, telle que définie précédemment, est avec cette notation $P(1 \text{ an})$.

On se place alors à l'instant t , et on envisage ce qu'il peut se produire en $t + dt$. On note A_t l'événement « E s'est produit au moins une fois entre 0 et t ». On a donc $P(A_t) = P(t)$. On note B_t l'événement « E se produit entre t et $t + dt$ ».

Note :

Il est important de souligner que la probabilité d'occurrence d'un événement dans la prochaine heure est la même, que la dernière occurrence de l'événement ait eu lieu il y a 1 heure ou il y a 100 ans. Les événements A_t et B_t sont donc indépendants.

On a naturellement : $A_{t+dt} = A_t \cup B_t$.

En passant aux probabilités, $P(t + dt) = P(t) + P(B_t) - P(A_t \cap B_t)$. Les événements A_t et B_t sont indépendants, donc $P(A_t \cap B_t) = P(A_t) \times P(B_t)$. Enfin, par définition de λ , $P(B_t) = \lambda dt$.

D'où :

$$P(t + dt) = P(t) + \lambda dt - \lambda dt \times P(t)$$

$$P(t + dt) = P(t) + \lambda dt \times [1 - P(t)]$$

Soit :

$$\frac{dP}{dt}(t) = \frac{P(t + dt) - P(t)}{dt} = \lambda [1 - P(t)]$$

Comme $P(0) = 0$, cette équation différentielle s'intègre en :

$$P(t) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-ft}$$

En particulier, on remarque que lorsque t tend vers l'infini, la probabilité tend vers 1 : si l'on attend suffisamment longtemps, l'événement se produira à coup sûr.

On peut ainsi calculer la POA à partir de la fréquence en utilisant la relation suivante :

$$POA = 1 - e^{-f \times 1}$$

NB : Le chiffre 1 dans l'exponentielle fait référence à la période d'observation qui est de 1 année.

Annexe 2
Exemple concret d'application des règles probabilistes –
Traitement semi-quantitatif

Les règles probabilistes énoncées dans le rapport Oméga Probabilités sont ici illustrées sur un exemple concret.

Le nœud papillon étudié modélise la ruine d'un réacteur suite à une montée en pression interne. Les deux phénomènes dangereux identifiés sont l'explosion et la libération d'un nuage toxique.

Trois événements peuvent mener à la montée en pression interne du réacteur :

- Un feu déclaré sous le réacteur ("Feu sous capacité")
- Un défaut de la régulation de température ("Défaut régl. T")
- Un emballement de réaction ("Emball réaction") qui peut être causé par quatre événements initiateurs indépendants : une quantité trop importante de réactif de type A ("Trop réactif A"), la perte de la fonction de refroidissement (Perte refroidisst"), une erreur de réactif B (Erreur réactif B") ou un excès de catalyseur ("Trop catalyseur").

Dans ce cas précis, l'excès de catalyseur est très fréquent. Cette erreur est supposée se produire tous les 200 batchs.Or, 100 batchs sont produits par an. La fréquence annuelle d'excès de catalyseur est donc de 0,5 an⁻¹.

L'ensemble des barrières de sécurité est mentionné sur le nœud papillon. Ces barrières sont synthétisées dans le tableau ci-dessous :

Libellé	Explication
TSH sur eau => arrêt introd. réactifs	Détection : sonde de température seuil haut Action : arrêt de l'introduction de réactifs
Chef de quart contrôle la quantité + analyse labo	Détection : contrôle par le chef de quart de la qualité et analyse en laboratoire
Détection incendie => sprinkler	Détection : détection incendie Action : fonctionnement sprinkler
Suivi P et T => injection inhibiteur	Détection : Suivi de température et de pression Action : Injection d'inhibiteur
Soupapes évacuant à l'atm en hauteur	Soupape évacuant à l'atmosphère en hauteur
PSH => Mise en sécurité réacteur	Détection : Capteur de pression seuil haut Action : Mise en sécurité du réacteur

Les données d'entrée nécessaires à l'évaluation probabiliste sont indiquées sur le nœud papillon : classes de fréquences annuelles des EI (Fx où x est la classe de fréquence retenue), niveaux de confiance des barrières (NC), probabilité d'inflammation (p).

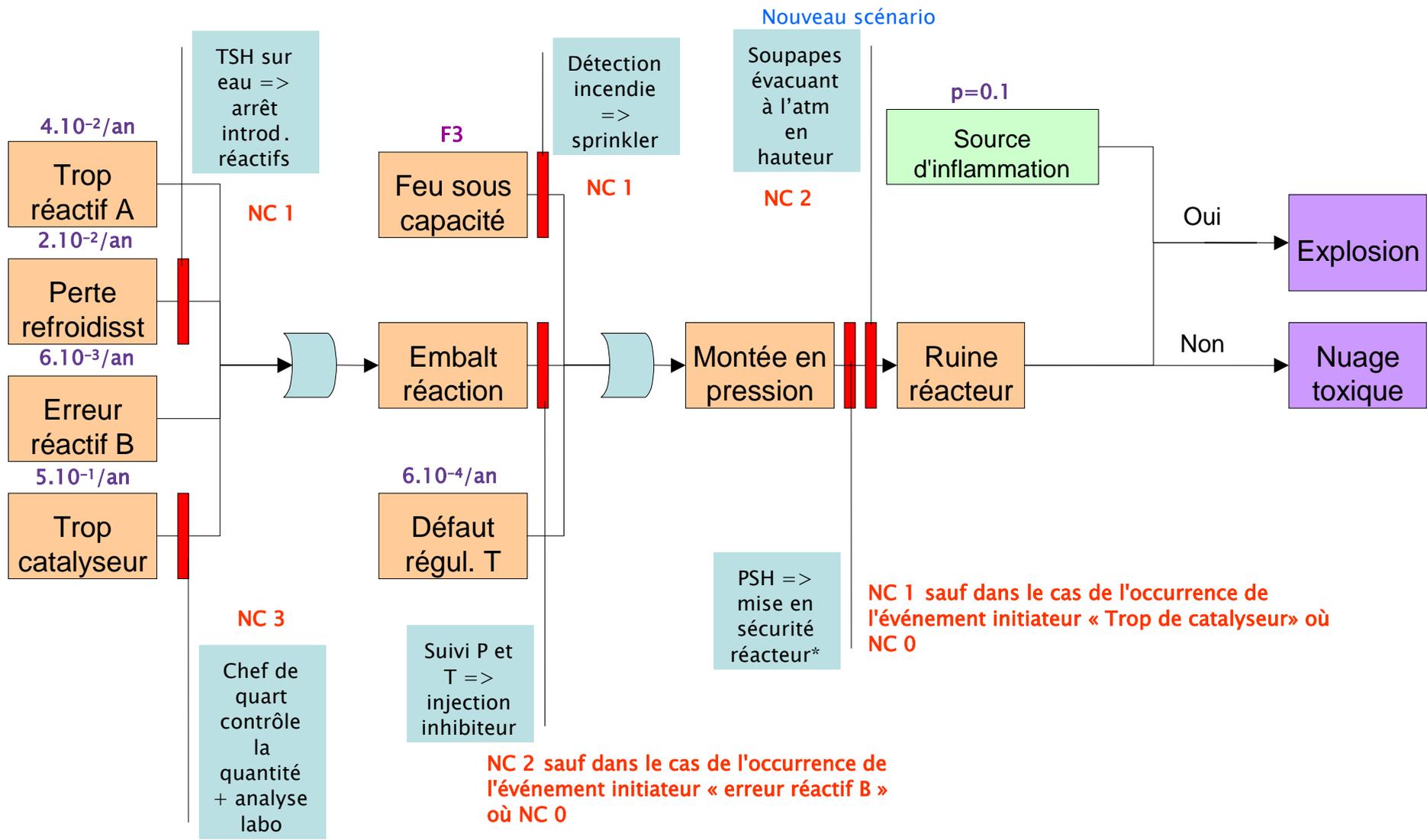
Le nœud papillon est supposé correctement construit : positionnement correct des barrières de sécurité, identification de l'ensemble des scénarios engendré par le

fonctionnement des barrières, prise en compte du dimensionnement des barrières pour tous les chemins du noeud papillon etc.

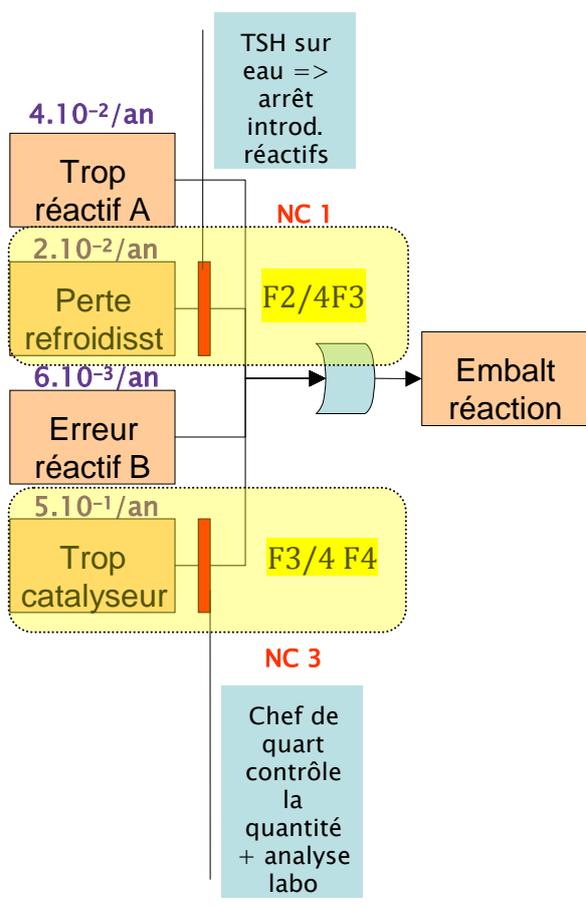
L'objectif est d'estimer la probabilité d'occurrence annuelle des phénomènes dangereux identifiés sur le nœud papillon à savoir :

- L'explosion du réacteur
- La formation d'un nuage toxique.

Les étapes de l'évaluation probabiliste sont détaillées ci-après.



Étape 1 : Cas où une barrière s'applique à un EI



Chemin 1 :

On note C1 l'événement « emballement de réaction suite à la perte de la fonction refroidissement **et** au dysfonctionnement de la barrière TSH à la **sollicitation** ».

semi-quantitatif sans historique : F2 (F1 et NC1)

semi-quantitatif avec historique : 4 F3

Cette fréquence est mentionnée sur le nœud papillon en jaune.

Chemin 2 :

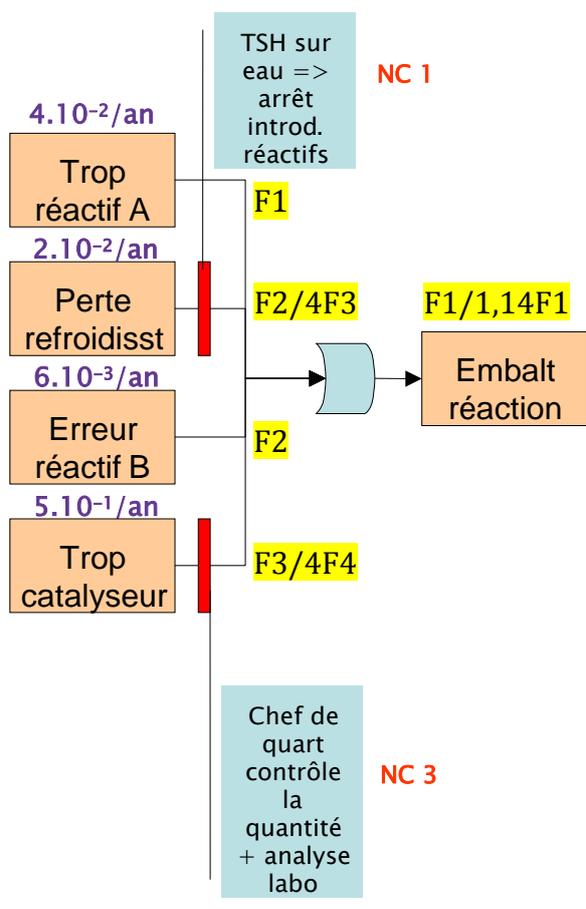
On note C2 l'événement « emballement de réaction suite à un excès de catalyseur **et** au dysfonctionnement de la barrière associée à la **sollicitation** ».

semi-quantitatif sans historique : F3 (F0 et NC3)

semi-quantitatif avec historique : 4 F4

Cette fréquence est mentionnée sur le nœud papillon en jaune.

Étape 2 : Traitement d'une porte OU entre événements



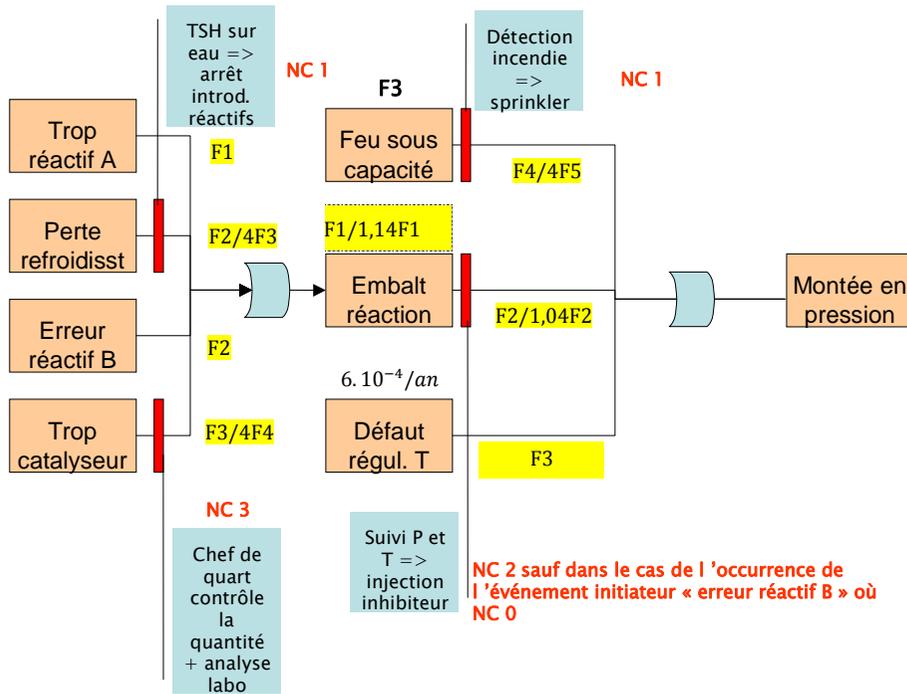
L'évènement de sortie « emballement de réaction » (noté E) se réalise si l'un au moins des événements en amont de la porte OU se réalise.

semi-quantitatif sans historique : $F1 + F2 + F2 + F3 = F1$

semi-quantitatif avec historique : $F1 + 4F3 + F2 + 4F4 = 1,144 F1$, arrondi à $1,14 F1$

Cette fréquence est mentionnée sur le nœud papillon en jaune.

Étape 3 : Cas où une barrière s'applique à un événement



Chemin 1 :

On note C1 l'évènement de sortie « Montée en pression suite à la présence d'un feu sous la capacité **et** à un dysfonctionnement du sprinkler à la **sollicitation** ».

semi-quantitatif sans historique : F4

semi-quantitatif avec historique : 4 F5

Chemin 2 :

On note C2 l'évènement de sortie « Montée en pression suite à un emballement de réaction **et** au dysfonctionnement à la **sollicitation** du système de suivi de P et T avec injection de catalyseur.

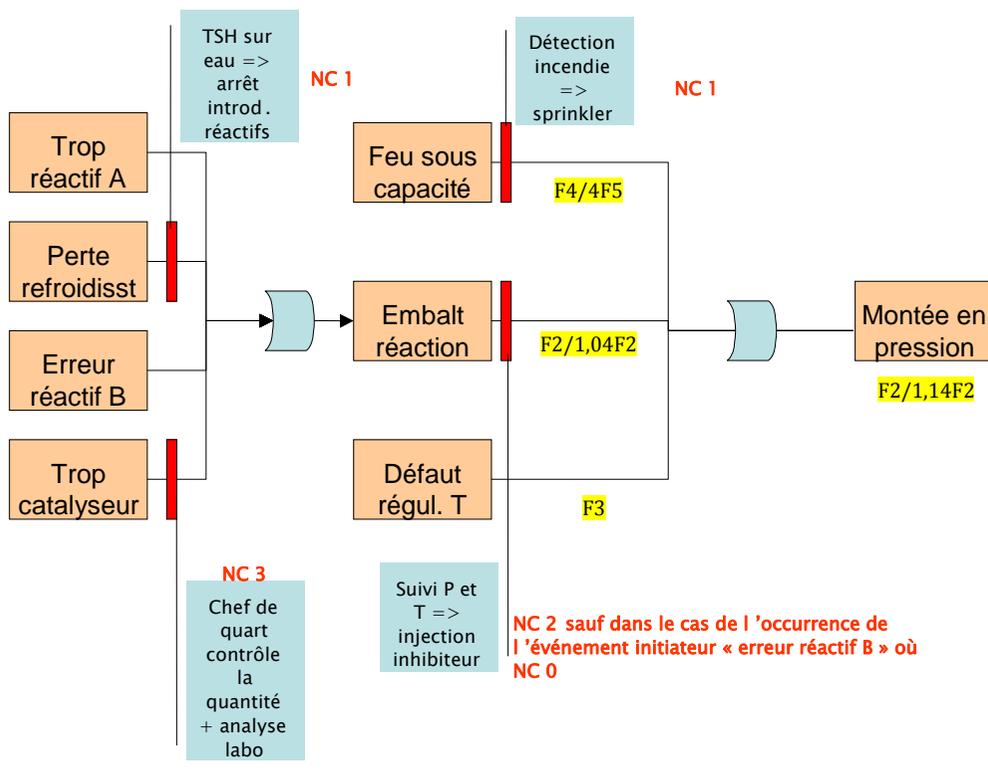
Le niveau de confiance de la barrière diffère en fonction des chemins du nœud papillon : le NC de la barrière est de 2 pour tous les événements initiateurs sauf l'erreur de réactif B. Cette barrière n'est en effet pas dimensionnée pour cet événement. Il faut donc prendre en compte cette particularité.

semi-quantitatif sans historique : $(F1 + F2 + F3) \times NC2 + F2 = F1 \times NC2 + F2 = F3 + F2 = F2$

semi-quantitatif avec historique : $(F1 + 4 F3 + 4 F4) \times NC2 + F2 = F2 + 4 \times 1,04 F4 = 1,0416 F2$, arrondi à 1,04 F2.

Le chemin « erreur réactif B » est un des plus pénalisants.

Étape 4 : Traitement d'une porte OU entre événements

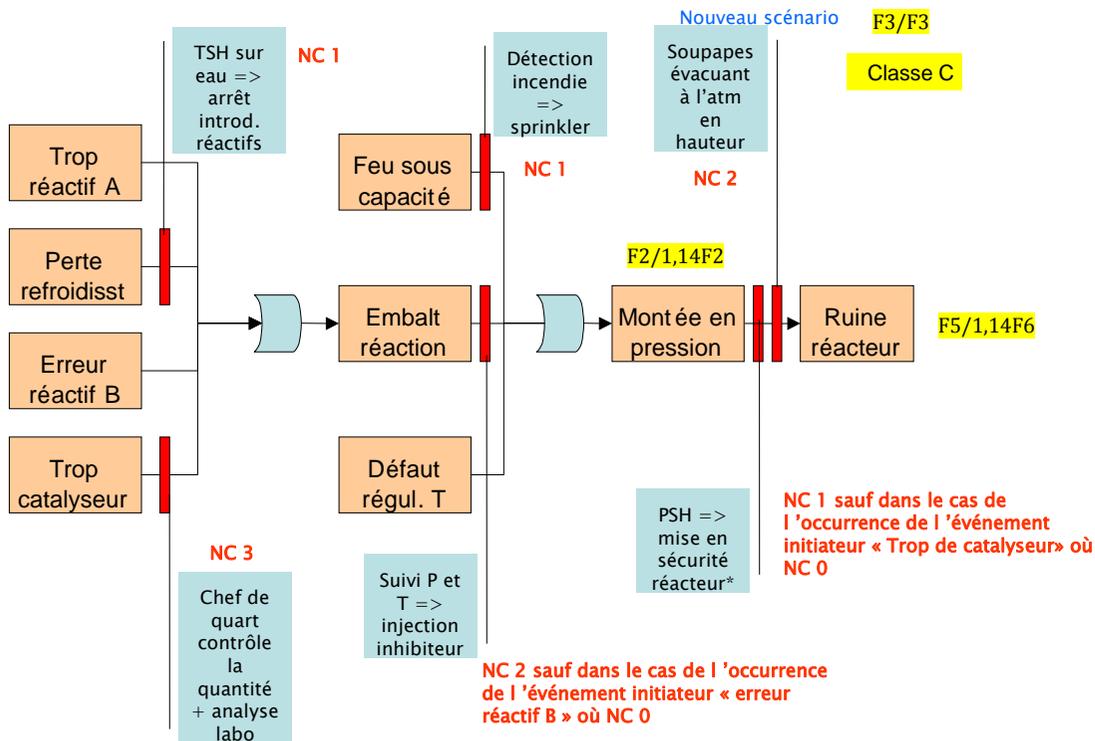


L'événement de sortie « Montée en pression » (noté E) se réalise si l'un des événements en amont de la porte OU se réalise.

semi-quantitatif sans historique : $F4 + F2 + F3 = F2$

semi-quantitatif avec historique : $4F5 + 1,04 F2 + F3 = 1,144 F2$, arrondi à $1,14 F2$.

Étape 5 : Cas où une barrière s'applique à un événement



Chemin 1 :

On note C1 l'évènement de sortie « Ruine du réacteur en cas de montée en pression dans le réacteur et de non fonctionnement de deux MMR à la sollicitation ».

L'évènement « trop de catalyseur » a un impact négligeable sur la montée en pression du réacteur, comme les calculs précédents l'ont montré. Il n'est donc pas nécessaire de couper le calcul en deux.

semi-quantitatif sans historique : F2 et deux MMR de NC 1 et 2 donc classe F5

semi-quantitatif avec historique : 1,14 F2 + 1 + 2 + 1 (car 2 MMR cumulées) donc classe 1,14 F6.

Chemin 2 :

On note C2 l'évènement de sortie « Libération de produit par les soupapes en cas de montée en pression dans le réacteur, du dysfonctionnement du PSH et du fonctionnement de la soupape de sécurité ».

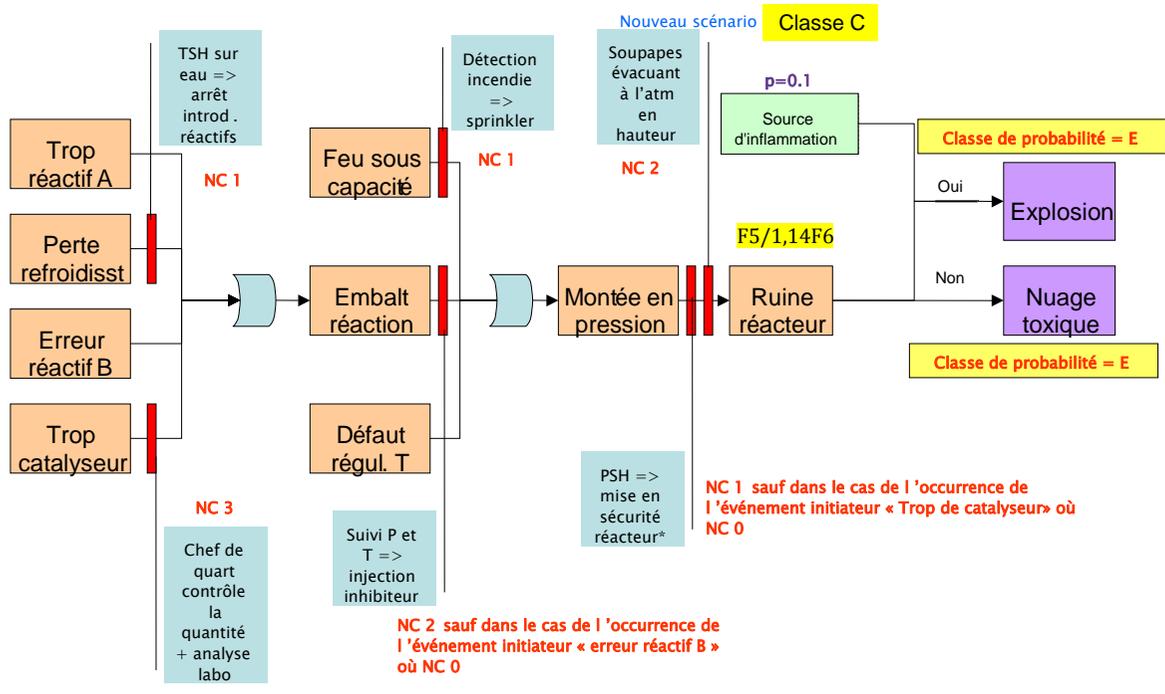
semi-quantitatif sans historique : F2 et NC1 donc F3

semi-quantitatif avec historique : 1,14 F2 et NC1 donc 4,56 F4 = F3 d'après la règle de conversion au niveau des phénomènes dangereux.

Comme il s'agit d'un nouveau phénomène dangereux à placer sur la grille MMR, on peut alors le convertir en une POA puis en une classe de POA :

Classe C1 = C

Étape 6 : Traitement d'une porte « ET » entre un événement secondaire et un événement redouté central (prise en compte de la probabilité d'inflammation)



L'événement de sortie « Explosion » (noté E1) se réalise en cas de ruine du réacteur et de présence de source d'inflammation sachant cette ruine

semi-quantitatif sans historique : Classe E (F7)
 semi-quantitatif avec historique : Classe E (1,14F8)

L'événement de sortie « Nuage toxique » (E2) se réalise en cas de ruine du réacteur et de la non-présence d'une source d'inflammation.

semi-quantitatif sans historique : Classe E (F6)
 semi-quantitatif avec historique : Classe E (1,14F7)

Annexe 3
Agrégation des barrières de sécurité
Détermination du facteur K

Le facteur K caractérise la capacité de fonctions indépendantes à éviter les modes communs. Ce facteur s'applique à l'agrégation de fonctions et non de barrières. Il est évalué à partir de 4 paramètres : la ségrégation S, la diversité D, l'environnement E et l'organisation O.

Le tableau ci-dessous donne les critères permettant d'évaluer le niveau (de 0 à 3) atteint pour les différents paramètres.

Pour une architecture donnée, le facteur K vaut n si les deux paramètres S et D satisfont aux critères du niveau n et au moins l'un des deux paramètres E ou O y satisfait également. C'est-à-dire :

$$K = \text{Min} (\text{Min} (S,D) , \text{Max}(E,O))$$

Cette pondération donne un poids plus important aux choix de conception et de technologie.

Ex: S =2, D=3, E=3, O=0 => S=2

Critère Niveau	Séparation / ségrégation S	Diversité D	Contrôle de l'environnement E	Organisation de l'exploitation et de la maintenance O
0	Alimentations identiques, et fonctionnement à émission OU Séparation physique insuffisante en regard des conditions environnementales et opératoires <i>Exple : capteurs situés sur un même piquage (avec risque de bouchage)</i>	Équipements identiques utilisés dans les mêmes conditions <i>Exple : mesure de niveau Haut et très haut identiques</i> [Normalement considéré comme une seule fonction de sécurité]	Pas de mesure spécifique pour vérifier l'adéquation avec l'environnement	Pas de test de vérification (maintenance curative essentiellement)
1	Alimentations surveillées ou secourues ou indépendantes ET Séparation physique minimale en regard des conditions environnementales et opératoires <i>Exple : armoires différentes pour les automates, prises de mesures dans des piquages différents</i>	Liste de matériels qualifiés pour les capteurs et actionneurs OU Équipements différents pour les capteurs et actionneurs similaires (exple : capteurs mesurant des paramètres physiques identiques) ET Si les fonctions sont réalisées par des automates standards (non sécurité), utilisation d'au moins deux automates différents ou d'un automate et un relayage	Équipement standard (non protégé) adapté à son environnement d'exploitation ET Identification des sollicitations possibles de l'environnement (chocs, vibrations, IP, CEM, Température, pression, foudre, etc.) ET Critères de qualification du matériel et liste de matériel qualifié pour les conditions d'utilisation.	Opérations de maintenance planifiées et enregistrées ET Mêmes équipes de maintenance ET Gestion des bypass

Critère Niveau	Séparation / ségrégation S	Diversité D	Contrôle de l'environnement E	Organisation de l'exploitation et de la maintenance O
2	<p>Alimentations surveillées ou secourues, ou indépendantes (2 parmi 3) ou fonctionnement à manque</p> <p>ET</p> <p>Local protégé (incendie, foudre, inondation ou risque spécifique)</p> <p>Cheminement de câbles différents</p> <p>ET</p> <p>Bus d'information différents</p>	<p>Technologies de mesure différentes</p> <p>ET</p> <p>Actionneurs de technologies différentes (avec commandes indépendantes)</p> <p>ET</p> <p>Utilisation d'au moins un automate de sécurité ou de relayage de sécurité (pas uniquement un automate de conduite – SNCC ou BPCS) Dans le cas de l'utilisation d'un seul automate, cartes d'entrées et de sorties différentes pour les différentes fonctions</p>	<p>Matériel qualifié pour des sollicitations supérieures à l'environnement d'utilisation</p>	<p>Équipes de maintenance qualifiées pour les exigences de sécurité fonctionnelle</p>
3	<p>Agrégation au minimum de 3 FIS</p> <p>ET</p> <p>Chaque FIS est au minimum de SIL 2</p> <p>ET</p> <p>Locaux différents pour automates indépendants</p>	<p>Paramètres physiques mesurés différents (capteurs)</p> <p>ET</p> <p>Principe de mise en sécurité différents (pour un actionneur)</p> <p>ET</p> <p>Utilisation d'au moins deux automates de sécurité et d'au moins un élément de traitement non programmable par l'utilisateur (mais éventuellement paramétrable)</p>	<p>Études d'impact d'agressions externes ou accidentelles sur les FIS (séismes, inondations, incendie etc.)</p> <p>ET</p> <p>Environnement peu sévère</p> <p>ET</p> <p>Automates dans des locaux dont on maîtrise l'environnement</p> <p>ET</p> <p>Contrôle de l'environnement des capteurs et actionneurs</p>	<p>Équipes de maintenance différentes OU</p> <p>Opérations de maintenance non simultanées</p>

Grille d'évaluation du facteur de tolérance aux défaillances

NB : Les exigences sont à considérer de façon cumulative, c'est-à-dire que pour comptabiliser les exigences d'un niveau, celles des niveaux inférieurs doivent être satisfaites, sauf exigences contradictoires.

Annexe 4
**Exemple concret d'application des règles d'agrégation des
barrières de sécurité**

L'exemple concerne un scénario de perte de confinement d'un réacteur du fait d'un emballement de réaction engendré par une perte de l'agitation.

Il s'agit d'une réaction qui a lieu en batch. Différents régulations (non présentées sur le schéma suivant) définissent :

- les débits d'alimentation et ou quantités du réacteur en solvant, réactif 1, réactif 2 et catalyseur ;
- le débit d'eau de refroidissement (ER), ou de chauffe dans la double enveloppe.

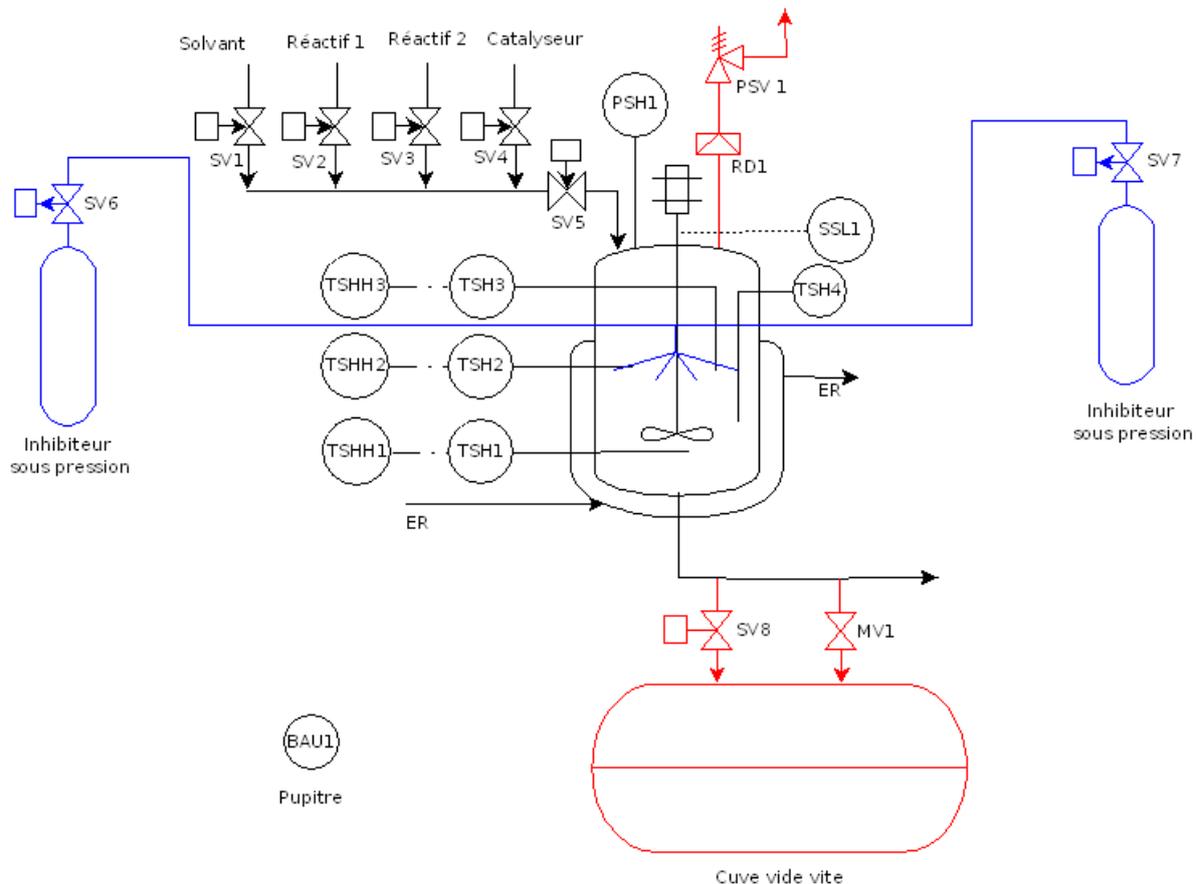


Figure 1: Schéma du réacteur et des sécurités associées

Relativement au scénario considéré, les asservissements et sécurité mises en place sont les suivantes :

- B1 (SSL1) : Mesure de la vitesse de rotation de l'axe et sur vitesse basse, fermeture (via du relayage) des vannes d'isolement sur chacune des 4 arrivées de matières premières (vannes SV1 à SV4) ;
- B2 : Alarmes et actions diverses du SNCC (sur régulations de débit notamment), non représentées dans le détail ici ;
- B3 (TSH1, 2 et 3) : Sécurité de température haute en vote 2oo3 associées aux capteurs de température 1, 2 et 3. Cette sécurité déclenche par l'APS (Automate Programmable de Sécurité) les mêmes actions que la barrière B1 ;

- B4 (TSHH1, 2 et 3) : Sécurité de température très haute en vote 2oo3 associées aux mêmes capteurs que la B3 et qui déclenche en plus (toujours via l'APS) des actions associées à la B3, la fermeture de la vanne d'isolement général de la ligne d'arrivées des matières premières (SV5) ;
- B5 (TSH4) : Sécurité de température haute associée à un quatrième capteur de température qui en plus des actions de sécurité associées à la B4, déclenche, via l'APS, l'injection d'inhibiteur via l'ouverture des vannes SV6 et SV 7 (redondance des systèmes SV6 et SV7 : 1 seule vanne ouverte suffit pour stopper la séquence accidentelle) ;
- B6 (PSH1) : Sécurité de pression haute qui déclenche, toujours via l'APS, les mêmes actions que la B5 ;
- B7 (BAU1) : Action de l'opérateur qui, par le suivi des conditions opératoires et fonction des diverses alarmes, décide d'appuyer sur le bouton d'arrêt d'urgence (BAU1). Ceci engendre les mêmes actions, toujours via l'APS, que les B5 et B6 et déclenche en plus, via du relayage, l'ouverture de la vanne SV8 vers la cuve vide vite ;
- B8 : Action de l'opérateur qui, de par identification d'un mauvais fonctionnement de la B7, va ouvrir la vanne manuelle VM1, permettant d'envoyer le contenu du réacteur dans la cuve vide vite ;
- B9 (RD1+PSV1) : Évacuation de la surpression par ouverture de la soupape PSV1, soupape protégée en amont contre d'éventuels bouchages par un disque de rupture.

Il est à noter que toutes les mesures présentées ci-dessus, ainsi que leurs seuils et actions associés sont considérés pour l'exemple comme efficaces vis-à-vis du scénario considéré et de leur positionnement dans le timing de la séquence accidentelle.

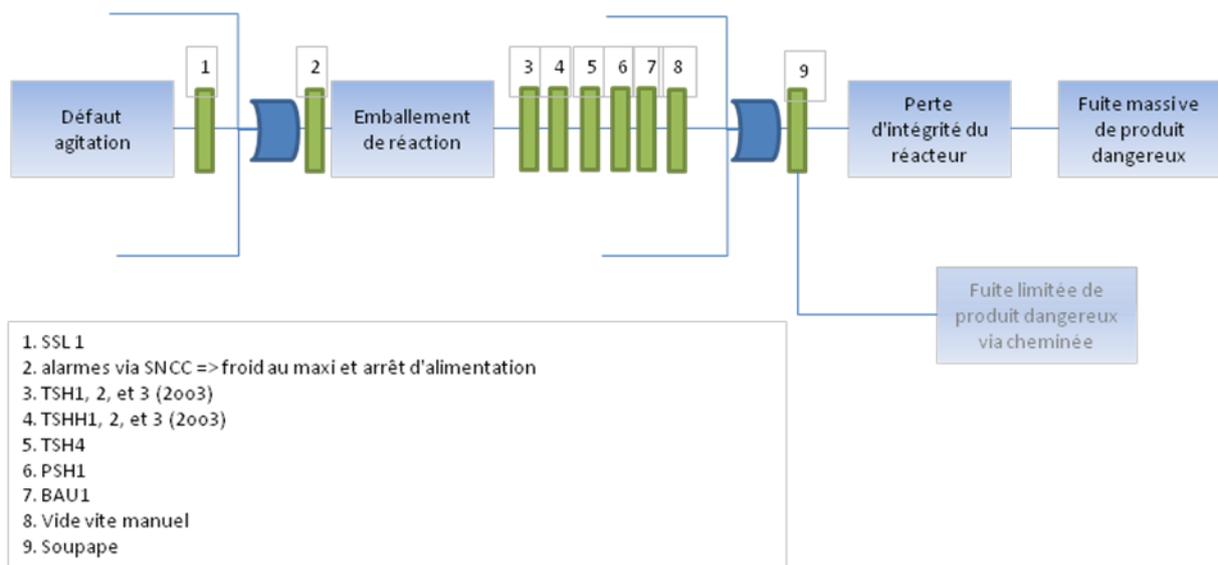


Figure 2: Nœud papillon associé au scénario d'emballement de réaction suite à perte d'agitation

Capteurs	Seuil	Actionneurs										
		SV1	SV2	SV3	SV4	SV5	SV6	SV7	SV8	VM1	RD1	PSV1
Position de repli	\	F	F	F	F	F	O	O	RP	\	\	\
SSL 1	50 tr/min	F	F	F	F							
TSH1, 2, et 3 (2oo3)	150°C	F	F	F	F							
TSHH1, 2, et 3 (2oo3)	180°C	F	F	F	F	F						
TSH4	200°C	F	F	F	F	F	O	O				
PSH 1	18 bars	F	F	F	F	F	O	O				
BAU 1	\	F	F	F	F	F	O	O	O			
RD 1	21 bars										O	
PSV 1	20 bars											O
Vide vite manuel	Opérateur									O		

F : Fermé
O : Ouvert
RP : Reste en Position

Figure 3: Sécurités, seuils et actions

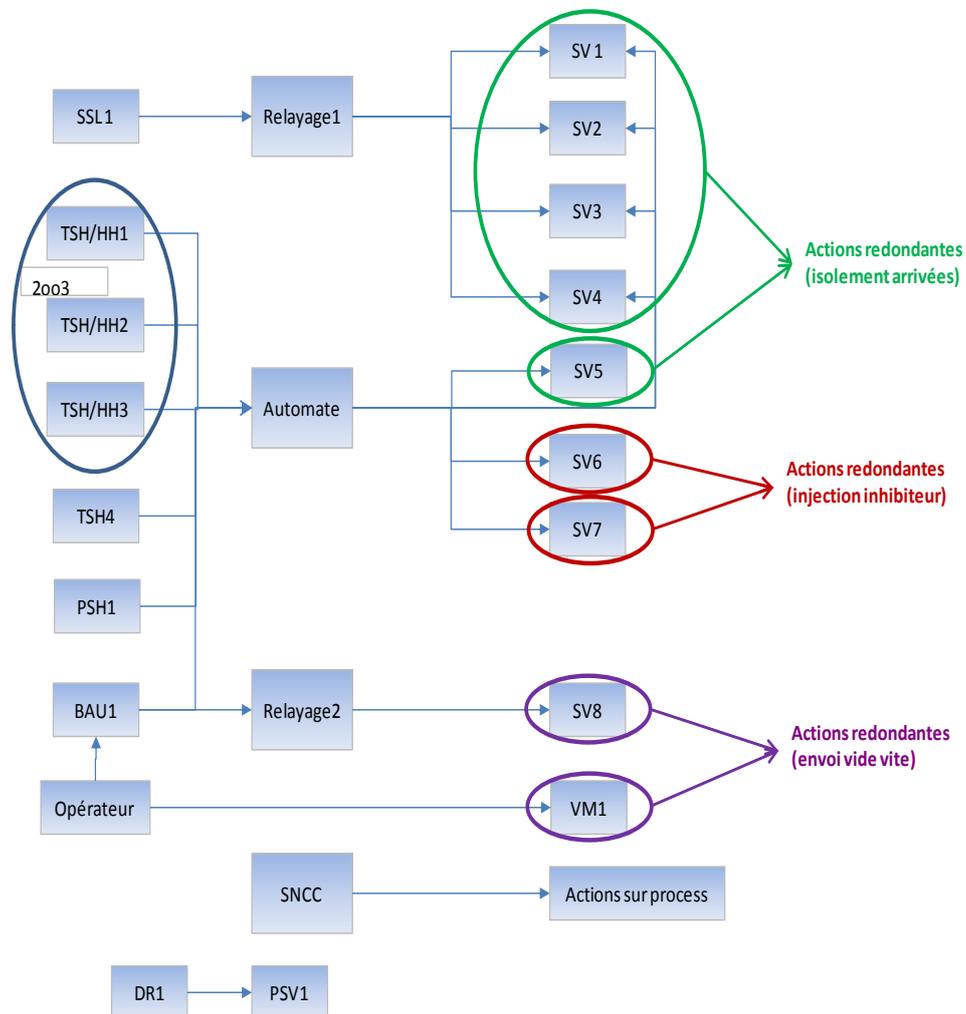


Figure 4: Décomposition des barrières de sécurité en éléments unitaires

1. Évaluation des NC des différents éléments constituant ces barrières (Omégas 10 et 20)

Les NC des éléments unitaires constituant les BIS ont été évalués, selon l'Oméga 10, à un NC1, sauf le Bouton d'Arrêt d'Urgence, évalué à NC2 et APS, qui est doté d'un SIL 3.

Le NC relatif à la détection par l'homme d'une dérive devant entraîner la décision de mise en œuvre du vide vite est évalué par application de l'Omega 20 à un NC2. L'appui sur le BAU est évalué à un NC2 et l'ouverture de la vanne manuelle VM1 à un NC 1.

Le NC du disque de rupture RD1 a été évalué à NC3.

Le NC de la soupape PSV1 a été évalué à NC1.

2. Évaluation des NC des barrières prises individuellement (Omégas 10 et 20)

B1 : BIS composé d'un capteur NC1, de relayage (NC1) et de 4 vannes (NC1 chacune) qu'il est nécessaire de toutes fermer pour isoler complètement l'arrivée => NC1 sur l'ensemble des 4 vannes. => NC1 sur l'ensemble de la barrière

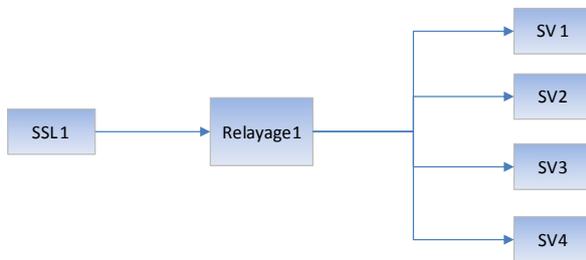


Schéma B1

B2 : alarme et actions diverses via SNCC. Possibilité de prendre en compte une réduction de risque d'un facteur 10 associée aux actions du SNCC. Pourrait être considéré comme MMR suivant doctrine à venir et critères spécifiques.



Schéma B2

B3 / B4 : Les sécurités de température haute et très hautes étant sur les mêmes capteurs avec actions TSH contenues dans actions TSHH, l'évaluation est uniquement faite sur TSHH car le NC est limité par le matériel. Cette BIS est composée de 3 capteurs NC1 en vote 2oo3 => NC2 pour l'ensemble de capteurs, d'un APS SIL 3 et de 5 vannes automatiques ayant chacune un NC1. Les vannes SV 1 et 4 doivent être fermées toutes les 4 pour que la fonction de sécurité soit assurée (NC1 sur cet ensemble de vanne) et la vanne SV5 est redondant avec le système de vannes constituées par les vannes SV1 à 4. Sur ces 2 ensembles de vannes, un NC 2 peut être retenu (sauf modes communs de défaillances importants qui pourraient limiter le NC à 1). Ainsi un NC2 est retenu sur cette barrière.

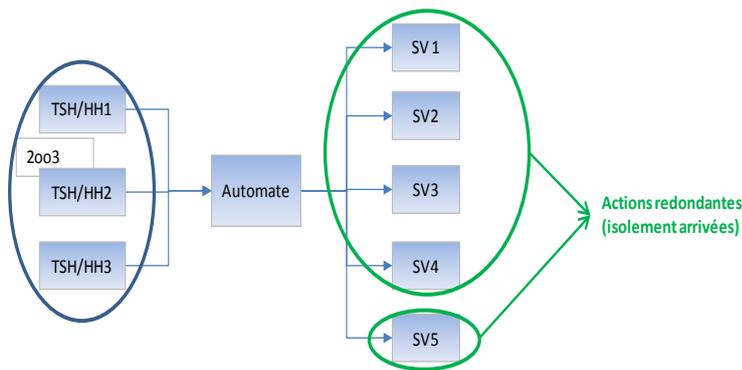


Schéma B3 / B4

B5 : Cette BIS est composée d'un capteur de température avec un NC1, d'un APS SIL 3 et de 7 vannes automatiques ayant chacune un NC1. Les vannes SV 1 et 4 doivent être fermées toutes les 4 pour que la fonction de sécurité soit assurée (NC1 sur cet ensemble de vanne) et la vanne SV5 est redondant avec le système de vannes constituées par les vannes SV1 à 4. Les vannes SV6 et SV7, font parties de 2 systèmes redondants qui permettent d'arrêter la séquence accidentelle d'une autre manière. Sur ces 3 ensembles de vannes, un NC 3 pourrait être retenu sauf modes communs de défaillances importants (même types de vannes, ...) qui pourrait limiter le NC à 2. L'action correspondant à l'ouverture des vannes SV6 et SV7, redondantes entre elles (NC 2 sur l'ensemble de ces 2 vannes), une technologie différente avec les vannes SV 1 à 5 => Un NC3 (NC max pour une BIS) peut être retenu sans problème sur les actionneurs. On retient de toute façon un NC 1 sur la barrière, NC limité par le capteur.

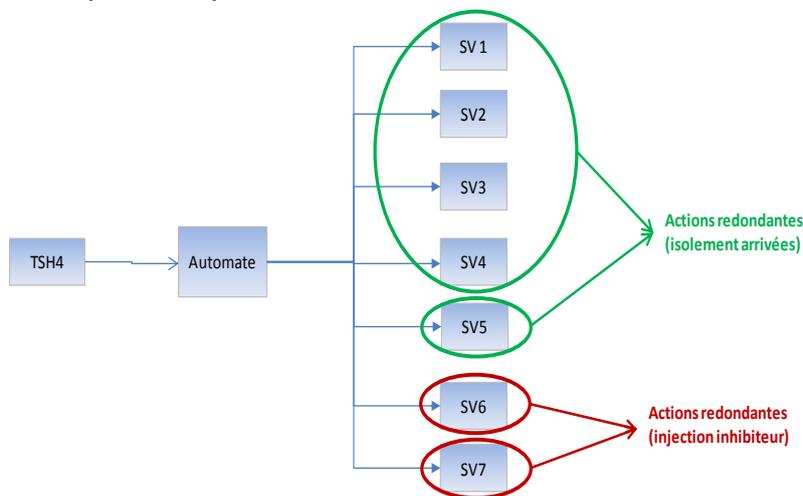


Schéma B5

B6 : idem B5 (Même raisonnement, en remplaçant le capteur TSH4 par le capteur PSH1)

B7 : BAMS. Sur la partie BIS, même réflexion que B5 avec en plus une action de sécurité supplémentaire qui permet à elle seule de remplir la fonction de sécurité et un passage via du relayage sur cette dernière. Actions et traitement de toute façon limités par un NCmax de 3. Le BAU ayant un NC2, le BIS est limité à un NC 2. La partie BHS ayant un NC2, on retient de faite un NC 2 sur la barrière B7.

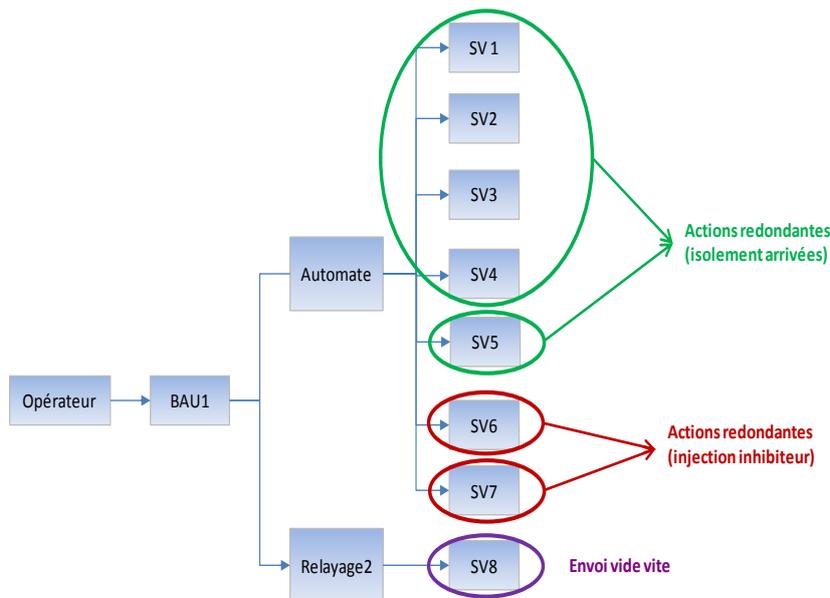


Schéma B7

B8 : BHS évaluée à NC 1 car limité par la partie intervention dans l'atelier.



Schéma B8

B9 : Barrière passive (disque de rupture) + active (soupape) => NC 1 (soupape), le disque « ne servant » qu'à protéger la soupape d'un éventuel bouchage.



Schéma B9

3. Évaluation simplifiée (usuelle) du gain de l'ensemble des barrières

Le facteur de réduction de risque de l'ensemble est composé :

- D'une réduction d'un facteur 10 associée au SNCC (B2) ;
- D'une réduction d'un facteur 10 (NC1) associée à la barrière humaine (B8) ;
- D'une réduction d'un facteur 10 (NC1) associée au dispositif actif (B9) ;
- D'une réduction d'un facteur 1000 (NC3) associée à l'ensemble BIS / BAMS.

Pour ce dernier point, l'ensemble capteurs comme les ensembles traitement et actionneurs est limité par le NCmax admissible (NC3) par les BIS si on les considère au sein d'une même FIS (méthode simplifiée), la somme des NC pris individuellement des groupes d'éléments « redondants » étant supérieur à 3 :

- Pour les capteurs : SSL1 (NC1), TSHH1,2 et 3 (NC2), TSH4(NC1), PSH1 (NC1), BAU1 (NC2)]. Le NC du BAU1 n'est pas dégradé par la détection et l'action de l'homme sur la barrière B7 [évalué à NC2]. Les capteurs de vitesse de rotation, de pression, de température et le BAU (associé à l'action humaine) sont de technologies différentes car mesurent des paramètres différents. De ce fait un NC3 peut être retenu ;

- Pour le traitement : APS (SIL 3), relaying 1 (NC1), relaying 2 (NC1). Un NC3 peut être retenu, correspondant à l'APS seul ;
- Pour les actionneurs : SV1 à SV4 (NC1), SV5 (NC1), SV6 et SV7 (NC2), SV8 (NC1). On renvoi à la démonstration faite pour la B5 dans le § précédent => NC3

À noter, qu'il est considéré qu'il n'y a pas de modes communs suffisamment forts qui pourraient venir dégrader cette valeur de NC_{global} de 3.

L'ensemble des BIS étant évalué à NC3 et, la prise en compte de l'homme au sein de la barrière B7 n'étant pas nécessaire pour atteindre cette valeur, il n'y a pas de problème de prise en compte de l'élément commun qu'est l'homme entre la B8 et l'ensemble BAMS/BIS.

On arrive donc ici à une réduction du risque d'un facteur 10⁶.

Il se pourrait que la valeur déterminée de ce facteur de réduction ne soit pas suffisant pour atteindre l'objectif fixé en termes de maîtrise des risques. Il apparaît qu'a priori, la démarche de détermination du NC associé aux BIS/BAMS est certainement pénalisante ($NC_{max} = 3$), vu le nombre et la redondance des éléments qui les composent. Ainsi, nous passons à la mise en œuvre de l'évaluation plus fine via les FIS.

4. Évaluation via les FIS du gain de l'ensemble des BIS

La première étape consiste à évaluer le NC de chaque FIS. Dans notre cas de figure, il y a 4 FIS :

- Celle associée à la détection de rotation de l'axe de l'agitateur, appelée SSL1
- Celle associée à la mesure de température, appelée TSH et regroupant les TSH et TSHH 1, 2 et 3 ainsi que la TSH4
- Celle associée à la mesure de pression, appelée PSH1
- Celle associée au bouton d'arrêt d'urgence, appelé BAU1.

Pour, chacune des 3 FIS B1 (SSL1), B6 (PSH1) et B7 (BAU1), le NC associé correspond au NC de l'unique BIS qui la compose, ie NC 1 pour les FIS B1 (SSL1) et B6 (PSH1) et NC2 pour la FIS B7 (BAU1).

Pour la FIS B4 (TSH), et en prenant les mêmes hypothèses que précédemment, on obtient un NC 3, NC maxi pour une FIS [Capteurs : 4 sondes de température avec un vote 2oo3 sur les 3 premières et la dernière de technologie différente ; APS SIL 3, actionneurs = voir § précédent].

Par application de la note, $NC_{GIS} = \text{Min} [(3+2+1)^1, 3+K]$

Évaluation de K :

¹ Seules 3 FIS peuvent être considérées => prise en compte des FIS de NC le plus fort => 1 NC3, 1 NC2 et 1 parmi 2 avec un NC1

- S = 2 [en prenant en compte les FIS B1(SSL1) et B7 (BAU1) car relayages différents et 3ème FIS en APS]: fonctionnement à manque et cheminement différents des câbles
- D = 2 car les capteurs sont de technologies différentes (chaque FIS mesure des paramètres différents) et les actionneurs² sont considérés de technologies différentes (SV5 de technologies différentes aux vannes SV1 à 4 ; SV6 à 8 considérées de technologies différentes aux vannes SV1 à 5 car ces dernières se ferment sur sollicitation alors que les premières s'ouvrent + chaque vanne dispose de sa vanne 3 voies de mise à l'air qui elles aussi ne sont pas toutes de même technologie)
- E = 2 Études d'impact d'agressions externes ou accidentelles sur FIS réalisée et environnement peu sévère et automates dans locaux à environnement maîtrisés
- = 2 : équipe de maintenance qualifiée pour les exigences de sécurité fonctionnelle, procédures existantes en termes de maintenance, de remise en service et de gestion de shunts

Min (S,D) = 2

Max (E,O) = 2

K = Min [Min (S,D), Max (E,O)] = 2

⇒ **NC_{GIS} = 5**

À noter que sur l'ensemble BAMS/BIS, l'évaluation de la performance de l'homme dans le cadre de la B7 ne vient pas dégrader cette valeur.

5. Évaluation finale (avec méthode via FIS pour les BIS/BAMS) du gain de l'ensemble des barrières

Suite à l'évaluation de l'ensemble BAMS/BIS faite précédemment, le facteur de réduction de risque de l'ensemble est composé :

- D'une réduction d'un facteur 10 associée au SNCC (B2) ;
- D'une réduction d'un facteur 10 (NC1) associée à la barrière humaine (B8) ;
- D'une réduction d'un facteur 10 (NC1) associée au dispositif actif (B9) ;
- D'une réduction d'un facteur 100000 (NC_{GIS}5) associée à l'ensemble BAMS/BIS.

On pourrait ainsi considérer une réduction d'un facteur 10⁸; contre 10⁶ via la méthode simplifiée. Il reste cependant, dans notre cas particulier, à s'assurer que l'homme, élément commun entre le système BAMS/BIS et la BHS B8, ne vienne pas dégrader ce facteur global de réduction de risque.

² Certaines BIS ayant plusieurs actions différentes qui permettent toutes individuellement d'arrêter la séquence accidentelle. C'est, par rapport à cette problématique de technologie différente, à l'évaluateur d'affecter artificiellement telle(s) ou telle(s) actions aux FIS considérés selon la réalité des actions engendrés et le NC associé à la FIS.

Le NC relatif à la détection par l'homme d'une dérive devant entraîner la décision de mise en œuvre du vide vite est évalué par application de l'Oméga 20 à un NC2. Le NC de la FIS assurée par le BAU1 ayant été évalué à 2 (et pris comme tel dans le calcul du NC_{GIS}, il semble peu prudent de prendre en compte la réduction du risque associée à la BHS B8.

On arrive donc ici à une réduction finale du risque d'un facteur 10⁷.

Annexe 5

Incertitudes liées à l'agrégation semi-quantitative

1. INTRODUCTION

À chaque traitement probabiliste présenté dans le rapport Oméga (Chapitre 4), il existe des incertitudes liées au modèle utilisé. En effet, par nature, le traitement semi-quantitatif n'est pas exact ; il permet, à l'aide d'approximations, de donner des formules simples pour les différentes portes rencontrées dans le nœud papillon.

Cette Annexe vise à fournir des éléments permettant d'appréhender les incertitudes introduites par le traitement semi-quantitatif. L'objectif est de vérifier si les approximations fournies dans le Chapitre 4 du rapport Oméga sont correctes, et ce en calculant les probabilités que les formules du traitement semi-quantitatif soient pertinentes³.

Note :

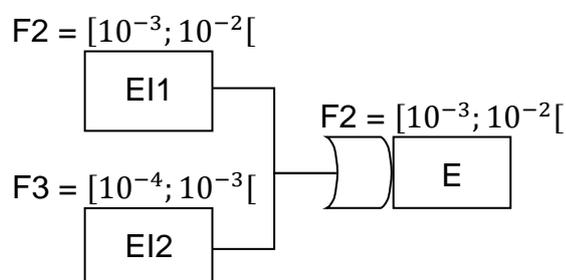
Pour l'ensemble des calculs, l'hypothèse suivante est formulée : les logarithmes des fréquences d'occurrence suivent des lois uniformes sur l'intervalle de classe. Aucune information n'étant a priori disponible sur les fréquences d'occurrence, il s'agit du choix logique pour l'échelle de fréquences logarithmique.

De plus, il est supposé que tous les événements situés en amont des portes étudiées soient indépendants, c'est-à-dire que l'occurrence de l'un ne donne aucune information sur les autres.

2. INCERTITUDES AU PASSAGE DE PORTES OU

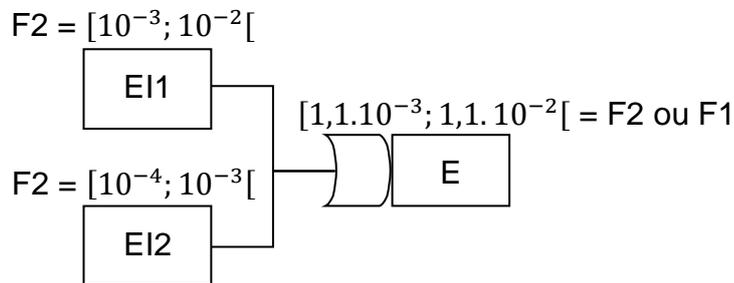
2.1 PORTE OU ENTRE DEUX ÉVÉNEMENTS DE CLASSES DIFFÉRENTES

Nous étudions pour commencer une porte OU entre deux événements de classes F_n et F_m avec $n < m$. Ces événements ont donc des fréquences appartenant respectivement aux intervalles $[10^{-n-1}; 10^{-n}[$ et $[10^{-m-1}; 10^{-m}[$. Les formules du traitement semi-quantitatif approximent l'événement de sortie en classe F_n , soit une fréquence appartenant à l'intervalle $[10^{-n-1}; 10^{-n}[$. Par exemple, pour $n = 2$ et $m = 3$, cela donne :



³ Pour des raisons de clarification, ces probabilités sont appelées « indices de confiance » de la formule étudiée (par exemple indice de confiance de la porte OU pour le traitement semi-quantitatif sans historique).

Cependant, la fréquence en sortie de la porte OU est en réalité dans l'intervalle $[10^{-n-1} + 10^{-m-1}; 10^{-n} + 10^{-m}[$, et peut donc être hors de l'intervalle théorique donné par la formule (en dépassant la borne supérieure).



Nous allons chercher à calculer la probabilité de ce dépassement : il va s'agir de la probabilité que la formule ne soit pas représentative de la réalité. Sur l'exemple ci-dessus, la formule semi-quantitative donne F2. La probabilité recherchée est donc celle que la fréquence de l'événement E appartienne à l'intervalle $[1.10^{-2}; 1,1.10^{-2}[$ et donc à la classe F1.

Soient X une variable aléatoire uniforme sur $[-n - 1, -n[$ et Y sur $[-m - 1, -m[$. La fréquence de sortie est la variable aléatoire $10^X + 10^Y$. On cherche la probabilité de l'événement :

$$10^X + 10^Y > 10^{-n}$$

Soit la probabilité que $10^X > 10^{-n} - 10^Y$.

X suivant une loi uniforme sur $[-n - 1, -n[$ et Y une loi uniforme sur $[-m - 1, -m[$, cette probabilité est donc :

$$\int_{-m-1}^{-m} [-n - \log(10^{-n} - 10^y)] dy$$

Malheureusement, cette intégrale ne peut pas s'exprimer à l'aide de fonctions usuelles (la primitive contient un dilogarithme). Il est en revanche possible de l'approcher numériquement pour plusieurs valeurs de n et m. De plus, cette intégrale ne dépend que de $m - n$.

Les simulations numériques donnent :

Tableau 1 : Probabilités de dépassement de l'intervalle de fréquence théorique pour une porte OU entre deux événements de classe F_n et F_m

m-n	probabilité de dépassement de l'intervalle
1	1,7%
2	0,2%
≥3	0,0%

Ce tableau montre que si les deux événements sont de classe différente (par exemple F2 et F3), alors l'indice de confiance de la formule du traitement semi-quantitatif est supérieur à 98%.

Les formules du traitement semi-quantitatif pour la porte OU entre 2 événements de classes différentes sont bien adaptées.

2.2 PORTE OU ENTRE DEUX ÉVÉNEMENTS DE MÊME CLASSE

Nous étudions ici une porte OU entre deux événements de classe F_n , c'est-à-dire ayant des fréquences appartenant à l'intervalle $[10^{-n-1}; 10^{-n}[$. Les formules du traitement semi-quantitatif approximent l'événement de sortie en classe F_n , soit une fréquence appartenant à l'intervalle $[10^{-n-1}; 10^{-n}[$. Cependant, la fréquence en sortie de la porte OU est en réalité dans l'intervalle $[2.10^{-n-1}; 2.10^{-n}[$ et peut comme précédemment dépasser la borne supérieure de l'intervalle théorique. Nous allons en calculer la probabilité.

Soient X et Y deux variables aléatoires uniformes sur $[-n-1, -n[$. La fréquence de sortie est la variable aléatoire $10^X + 10^Y$. On cherche la probabilité de l'événement :

$$10^X + 10^Y > 10^{-n}$$

Ce cas est plus complexe que le précédent car certains tirages de Y assurent déjà l'inégalité précédente. La probabilité recherchée est donc :

$$-n - \log(10^{-n} - 10^{-n-1}) + \int_{-n-1}^{\log(10^{-n} - 10^{-n-1})} [-n - \log(10^{-n} - 10^y)] dy$$

De la même façon que précédemment, l'intégrale n'admet pas de primitive s'exprimant à l'aide de fonction usuelle. L'expression précédente est en revanche indépendante de n. Une estimation numérique permet d'obtenir la valeur de cette probabilité, 27,2%.

La généralisation à plus de 2 événements est envisageable par simulations de Monte-Carlo, mais n'a pas été ici réalisée. Cependant, des approximations très grossières donnent des probabilités de l'ordre de 50% pour 3 événements, et 75% pour 4 événements.

Si l'on cumule 3 événements de même classe de fréquence, l'événement de sortie a donc environ une chance sur deux d'être dans la classe suivante. Si l'on en cumule 4, il a environ 3 chances sur 4 de l'être. L'utilisation des formules semi-quantitatives introduisent donc de grandes incertitudes sur la fréquence de l'événement en sortie de la porte OU.

Ces résultats tendent à justifier les formules semi-quantitatives présentées dans le rapport Oméga : si l'on cumule au moins 4 événements de même classe n dans une porte OU, il y a une plus grande probabilité d'être dans la classe n-1, qui est la classe retenue par les formules.

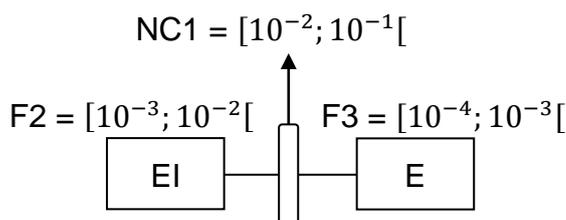
3. INCERTITUDES AU PASSAGE DE BARRIÈRES DE SÉCURITÉ

3.1 CAS D'UNE BARRIÈRE DE SÉCURITÉ

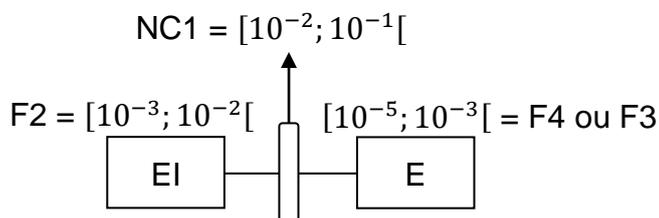
De la même manière qu'au paragraphe précédent, l'objectif est de calculer les probabilités que les formules du traitement semi-quantitatif soient adaptées. Nous supposons ici encore que les logarithmes des fréquences d'occurrence et des probabilités de défaillance à la sollicitation des barrières de sécurité suivent des lois uniformes sur l'intervalle de classe.

Nous étudions pour commencer un événement initiateur de classe F_n et une barrière de sécurité de NC_m . La fréquence de l'événement initiateur est dans l'intervalle $[10^{-n-1}; 10^{-n}[$, la probabilité de défaillance à la sollicitation de la barrière de sécurité dans l'intervalle $[10^{-m-1}; 10^{-m}[$.

Le traitement semi-quantitatif approxime l'événement de sortie par la classe F_{n+m} , soit une fréquence appartenant à l'intervalle $[10^{-n-m-1}; 10^{-n-m}[$. Par exemple, pour un événement de classe F2 et une barrière de sécurité de NC1, l'application de la formule donne :



Cependant, la fréquence en sortie de la barrière de sécurité est en réalité dans l'intervalle $[10^{-n-m-2}; 10^{-n-m}[$ et peut donc être en-dessous de la borne inférieure de l'intervalle théorique :



Nous allons calculer la probabilité que la fréquence de l'événement de sortie ne soit pas dans la classe donnée par la formule. Sur l'exemple ci-dessus, il s'agit de la probabilité que E soit de classe F4.

Soient X et Y deux variables aléatoires uniformes indépendantes sur $[0,1[$. La fréquence de sortie est la variable aléatoire $10^{-n-m-2+X+Y}$. La probabilité que cette fréquence appartienne à l'intervalle théorique est donc la probabilité que $X + Y > 1$. Or la densité de $X + Y$ est $1 - |z - 1|$. Cette densité est le résultat du produit de convolution de deux densités uniformes. C'est la fonction chapeau sur l'intervalle $[0,2]$, qui est symétrique par rapport à 1. La probabilité recherchée est donc 50%.

Cela signifie qu'avec simplement une barrière de sécurité, l'indice de confiance de la formule du traitement semi-quantitatif présentée n'est que de 50%. Cette formule est néanmoins acceptable, car elle retient la plus pénalisante des deux classes possibles (la moitié supérieure de l'intervalle).

3.2 CAS DE DEUX BARRIÈRES DE SÉCURITÉ ET PLUS

Pour 2 barrières de sécurité, il s'agit comme dans le cas précédent de trouver la densité de $X + Y + Z$, où X , Y et Z suivent des lois uniformes indépendantes sur $[0,1[$. Il s'agit ici encore du résultat du produit de convolution entre les 3 densités. Ce produit est plus difficile à exprimer que dans le cas précédent. Son support est $[0,3[$.

La densité somme est :

$$\begin{aligned} \text{pour } x < 0 \text{ ou } x > 3, f(x) &= 0 \\ \text{pour } 0 < x < 1, f(x) &= \frac{x^2}{2} \\ \text{pour } 1 < x < 2, f(x) &= -x^2 + 3x - \frac{3}{2} \\ \text{pour } 2 < x < 3, f(x) &= \frac{(3-x)^2}{2} \end{aligned}$$

La probabilité d'être dans l'intervalle de la formule semi-quantitative sans historique est l'intégrale de la 3^{ème} contribution, soit $\frac{1}{6}$. La probabilité d'être dans l'intervalle de la formule semi-quantitative avec historique est l'intégrale de la deuxième contribution, soit $\frac{2}{3}$.

La formule semi-quantitative avec historique donne donc la classe la plus probable pour l'événement de sortie. La formule semi-quantitative sans historique donne une classe majorante moins probable (une chance sur 6).

Si l'on rajoute des barrières de sécurité, les densités se complexifient mais restent des produits de convolution. En particulier, on peut affirmer que pour un nombre impair de barrières de sécurité, on obtiendra deux classes équiprobables (les classes au centre), et que la formule semi-quantitative avec historique retient la plus pénalisante des deux. Pour un nombre pair de barrières de sécurité, le produit de convolution aboutit à une unique classe centrale, la plus probable, et qui est celle retenue par la formule semi-quantitative avec historique.

Les résultats de ce paragraphe montrent que les incertitudes introduites par les formules semi-quantitatives pour les barrières de sécurité peuvent être très importantes : la fréquence de sortie après 2 barrières de sécurité peut appartenir à 3 classes différentes, c'est-à-dire prendre des valeurs pouvant varier d'un facteur de presque 1000. La méthode semi-quantitative avec historique permet d'obtenir la classe la plus probable, mais ne réduit pas ces incertitudes.



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>