

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE BATNA 2- MOSTEFA BEN BOULAD



INSTITUT D'HYGIENE ET SECURITE

Support de Cours Pédagogique :

EVALUATION DU RISQUE

Chap. I- Analyse Quantitative du Risque

Partie A : Mesurage du Risque

1. Notion de risque

Dans le contexte de l'engineering, parmi les définitions les plus typiques du concept « risque », on peut citer :

1. Le risque est une mesure de la probabilité et de la gravité des effets défavorables.
2. Le risque est la combinaison de la probabilité et le degré des conséquences.
3. Le risque est le triple (s_i, p_i, c_i) , où s_i est le $i^{\text{ème}}$ scénario, p_i est la probabilité de ce scénario, c_i est la conséquence de ce scénario, $i=1, \dots, n$. L'ensemble $R = \{(s_i, p_i, c_i)\}_{i=1}^n$ représente le risque associé au n événements s_i .

Le risque est lié aux événements futurs et leurs conséquences, on ne sait pas à l'heure actuelle si ces événements surviendront ou non, quelles seront les conséquences. Autrement dit, à ces événements et à leurs conséquences sont associées des incertitudes.

Par conséquent, l'occurrence d'un événement A et des éventuelles conséquences C peut être exprimée par des probabilités P sur la base d'un ensemble de connaissances dont on dispose, K.

Exemple : Incendie dans un tunnel

A : Un feu se déclenchant dans un véhicule pendant qu'il entre dans un tunnel, l'année prochaine

C : Atteintes sur les usagers du tunnel : Atteintes légères, Atteintes sévères, 1- 4 morts, 5- 20 morts, > 20 morts

U : Aujourd'hui, on ne sait pas s'il y aura un incendie dans le tunnel et les conséquences d'un tel incendie

P : On établit un modèle exprimant la relation entre l'incendie dans un tunnel les différents facteurs (volume de la circulation, le type de trafic, la vitesse limite, ..). Sur la base de ce modèle et des données du retour d'expérience (K), on affecte une probabilité p à l'occurrence d'un feu dans le tunnel, soit par exemple, 0.1%.

2. Indicateurs de Risque

La quantification du risque est usuellement effectuée dans le but de prendre une décision. Cette décision peut être, par exemple, une modification des équipements, des dépenses pour la réduction du risque, etc. Le problème qui se pose est comment mesurer le risque et l'évaluer par rapport à des critères d'acceptabilité ? Ceci revient à la nature des données dont on peut tirer à partir d'une analyse de risque et de la validation des résultats obtenus.

Un indicateur de risque est un paramètre qui donne une information sur le niveau du risque. Il y a deux principaux types d'indicateurs :

- Indicateur de Risque : il est utilisé pour prédire le risque d'une activité ou d'une opération future. Il est estimé à partir de modèles d'analyse de risque en utilisant des données génériques et autres données disponibles.
- Indicateur de Performance de Sécurité : C'est un paramètre estimé à partir d'un retour d'expérience relatif à une installation ou à une activité donnée. Il nous renseigne sur ce qui s'est passé.

Les indicateurs de risque sont utilisés donc pour quantifier le risque prévisionnel tandis que les indicateurs de performance sont utilisés pour contrôler le niveau de risque (i.e. la performance de sécurité) s'il est constant, croissant ou décroissant.

Exemple :

Une entreprise veut acquérir un nouvel équipement pour ses opérations sous mer. Soit θ la probabilité que l'opérateur trouve la mort pendant une opération spécifique en utilisant le nouvel équipement. La probabilité θ peut être estimée sur la base d'une analyse de risque de cet équipement et de l'opération à réaliser, associée à des données génériques sur des équipements et des opérations similaires. La valeur de θ estimée est un paramètre qui donne une indication sur le risque de fatalité que l'opérateur va courir.

Lorsque l'équipement a été utilisé pour une période de temps donnée, on peut estimer la valeur de θ à partir d'un retour d'expérience à l'aide de techniques statistiques appropriées. La valeur estimée est un indicateur de performance de sécurité et le note θ^* pour le distinguer de θ .

A noter qu'un indicateur de risque ne donne pas une image complète sur le risque d'une activité ou d'un système mais plutôt, c'est une indication sur une dimension du risque, à savoir par exemple le risque au personnel.

3. Risque au Personnes

Le risque aux personnes peut être classé dans deux catégories :

A) Le risque individuel qui est le risque auquel une personne est exposée durant une période de temps donnée (usuellement, un an). Cette personne (hypothétique ou statistique) ayant une relation plus ou moins étroite avec un danger donné.

L'analyste ayant à définir un nombre de personnes hypothétiques pour s'assurer que toute la population exposée au danger soit prise en considération. Mais, il est important de noter que le risque individuel ne dépend pas du nombre de personnes exposées au danger.

Définition : Le risque individuel peut être défini comme la fréquence avec laquelle un individu peut être affecté face à des dangers donnés.

B) Le risque au groupe de personnes. Lorsque ces personnes sont des citoyens dans une agglomération, Ce risque est souvent appelé « risque sociétal ».

Le risque sociétal est une combinaison de niveaux de risque individuel et du nombre de personnes au risque (population exposée)

Définition : Le risque sociétal peut être défini comme la relation entre la fréquence d'un événement dangereux et le nombre de personnes affectées par cet événement.

3.1 Quelques Mesures pour les risques individuel et sociétal

3.1.1 Risque Individuel par An

On considère un individu exposé à un ensemble de dangers, d , dus à une activité ou à une situation donnée. On définit le risque individuel par an (IRPA : Individual Risk per Annum) comme étant la probabilité que cet individu soit décédé suite à ces dangers durant une période d'exposition d'un an.

On écrit alors :

$$IRPA_d = Prob(\text{un individu meurt suite à des dangers } d \text{ durant une année d'exposition}) \quad (1.1)$$

Le $IRPA_d$ peut être estimé connaissant le nombre de fatalités et le groupe de personnes étant exposé aux mêmes dangers, soit :

$$IRPA_d^* = \frac{\text{Nombre de fatalités dues aux dangers } d}{\text{Nombre de personnes exposées par an}} \quad (1.2)$$

$IRPA_d^*$ est un indicateur de performance de sécurité.

Exemple :

Suite à des accidents divers durant l'année passée, on a recensé 2500 morts parmi un nombre de population total égal à 2500000. Pour une personne choisie au hasard parmi cette population, la probabilité qu'elle soit décédée suite à ces accidents est donnée par :

$$IRPA_d^* = \frac{2500}{2500000} = 10^{-3}/an$$

Autrement dit, durant l'année passée, sur un groupe de 1000 personnes choisies au hasard, en moyenne une personne est décédée suite à un accident.

3.1.2 Risque Individuel Localisé

Définition : Le risque individuel Localisé, noté LIRA (Localized Individual Risk per Annum) est la probabilité qu'une personne « moyenne » non protégé, présente de manière permanente à un endroit donné, soit décédé dans une période d'un an, suite à un accident ou à une installation dangereuse.

Il ressort de cette définition que LIRA est une fonction de coordonnées spatiales. A cause de ces propriétés de localisation géographique, il est souvent utilisé pour la planification d'usage de terre relative aux installations dangereuses.

Cas de plusieurs types d'accidents :

On considère une installation pouvant générer m scénarios d'accidents indépendants S_1, S_2, \dots, S_m . Soit λ_i La fréquence d'occurrence du scénario d'accident S_i ($i = 1, 2, \dots, m$). Supposons qu'une personne non protégée soit toujours présente à un endroit de coordonnée (x, y) d'un site géographique.

LIRA à l'endroit (x, y) , suite à un scénario d'accident S_i est donné par :

$$LIRA_i(x, y) = \lambda_i \cdot Prob(\text{Fatalité à } (x, y) / S_i), i = 1, 2, \dots, m \quad (1.3)$$

LIRA global à l'endroit (x, y) pour toute l'installation est :

$$LIRA(x, y) = \sum_{i=1}^m LIRA_i(x, y) = \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot Prob(Fatalité \text{ à } (x, y) / S_i) \quad (1.4)$$

A noter qu'on peut tenir compte de la proportion de temps pendant laquelle la personne est présente à l'endroit (x, y) . Si l'on note cette proportion a et en considérant l'équation (2.3), LIRA peut s'écrire :

$$LIRA_a(x, y) = a \cdot LIRA(x, y) \quad (1.5)$$

A noter aussi qu'on peut tenir compte de la vulnérabilité de la personne vis-à-vis des effets de l'accident, en multipliant l'équation (1.5) par un facteur de vulnérabilité V .

3.1.3 Contours de risque relatifs à LIRA

La propriété géographique de *LIRA* peut être utilisée pour visualiser le niveau de risque autour d'une installation dangereuse moyennant des tracés de contours de risque individuel.

Un contour de risque relie tous les endroits géographiques (x, y) autour de l'installation dangereuse à un risque individuel égal, i.e. tous les endroits ayant la même probabilité de fatalité. Afin d'établir un contour de risque, il est nécessaire de calculer les contributions respectives des différents scénarios d'accidents, dont chacun a sa propre probabilité de létalité. Le risque global résultant est la somme des risques correspondants à chacun des scénarios d'accidents. La figure (1.1) donne un exemple de contours de *LIRA*.

3.1.4 Perte de vie potentielle (PLL : Potential Loss of Life)

Définition : La perte de vie potentielle (PLL : Potential Loss of Life) est le nombre de fatalités espérées parmi une population donnée (ou à l'intérieur d'une zone donnée) par an.

Le PLL est l'un des indicateurs les plus utilisés pour le risque sociétal. Cependant, il ne distingue pas entre un accident faisant 100 morts à la fois et 100 accidents chacun causant un seul mort, durant la même période de temps. Par conséquent, il ne reflète pas la grande sensibilité des gens aux accidents majeurs, bien que rares mais aux conséquences catastrophiques (plusieurs cas de fatalités).

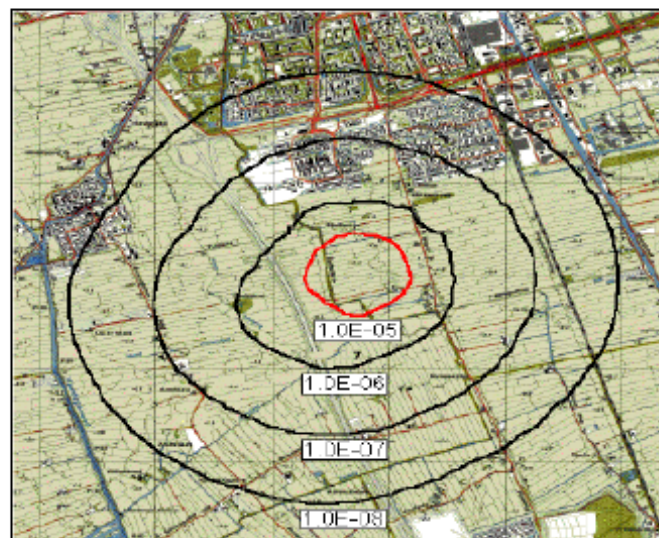


Figure 1.1. Exemple de contours de risque individuel (TNO, 1999)

PLL à l'intérieur d'une zone donnée :

Si l'on suppose que plusieurs personnes soient exposées au risque inhérent à une installation dangereuse (Fig. 2.2). Soit $IRPA(x, y)$ le risque individuel par an pour une personne à l'endroit (x, y) sur la carte géographique, et soit $m(x, y)$ la densité de population comme fonction de coordonnées (x, y) . Le nombre de fatalités espéré par an, i.e. PLL , à l'intérieur d'une zone A donnée, peut être calculé par :

$$PLL_A = \iint_A IRPA(x, y) \cdot m(x, y) dx dy \quad (1.6)$$

PLL pour une population donnée :

Supposons que tous les sujets d'une population aient le même $IRPA$ ($IRPA$ moyen). Si cette population compte n sujets, alors le PLL peut être déterminé par :

$$PLL_{pop} = n \cdot IRPA \quad (1.7)$$

Cas de plusieurs scénarios d'accidents :

Supposant que pour une installation dangereuse, on a pu identifier m scénarios d'accidents distincts (i.e. indépendants). Soit λ_i La fréquence de réalisation du scénario d'accident S_i ($i = 1, 2, \dots, m$) et soit n_i le nombre de personnes pouvant être affectées par le scénarios S_i . Si p_i est la probabilité de fatalité d'une personne suite à l'occurrence du scénario S_i , alors le PLL relative à ce scénario peut s'écrire :

$$PLL_i = n_i \cdot \lambda_i \cdot p_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1.8)$$

A noter que le terme $(n_i \cdot p_i)$ exprime le nombre de morts (fatalités) probable, utilisé comme variable dans les courbes FN qui représentent le risque sociétal (Section 3.2).

Le PLL global pour tous les scénarios est :

$$LIRA(x, y) = \sum_{i=1}^m PLL_i \quad (1.9)$$

Remarque

Le PLL peut être utilisé comme un indicateur de performance de sécurité pour contrôler la variation du niveau de risque au cours des années. On le note PLL^* .

3.1.5 Taux d'accidents fatals (FAR : Fatal Accident Rate)

Définition : Le FAR est le nombre de fatalités espéré parmi une population pour 100 millions d'heures d'exposition au risque. Soit,

$$FAR = \frac{\text{Nombre de fatalités espéré}}{\text{Nombre d'heures d'exposition au risque}} \cdot 10^8 \quad (1.10)$$

Autrement dit, si 1000 personnes travaillent 2000 heures par an durant 50 ans, le temps d'exposition cumulé sera 10^8 heures. Le FAR est donc le nombre de ces 1000 personnes qui décèderont suite à un accident fatal durant leur vie active.

Le temps d'exposition est le nombre d'heures de travail (présence sur site). Si on considère un an, c'est 8760 heures multipliées par le nombre de personnes exposées au risque à tout moment.

Compte tenu de l'expression (1.10), le FAR peut être exprimée en fonction du PLL :

$$FAR = \frac{PLL}{\text{Nombre d'heures d'exposition au risque}} \cdot 10^8 \quad (1.11)$$

L'indicateur de performance de sécurité correspondant au FAR peut être défini comme :

$$FAR^* = \frac{\text{Nombre de fatalités observé}}{\text{Nombre d'heures d'exposition au risque}} \cdot 10^8 \quad (1.12)$$

Un exemple de valeurs de FAR* en UK est donné dans le tableau suivant (Tableau 1.1).

Tableau 1.1. Exemple de valeur de FAR* en UK (Rausand, 2011)

Activité/ Industrie	FAR* (Fatalités par 10 ⁸ h d'exposition)
Industrie de fabrication	1
Construction	5
Industrie d'extraction de gaz et de pétrole	15
Voyage par voiture	30
Voyage par avion	40

Remarques :

1. FAR* est une estimation non biaisée mais non robuste de la valeur du FAR, car elle dépend fortement des accidents majeurs durant la période d'observation. Ce sont ces accidents aux conséquences catastrophiques (plusieurs morts) qui font croître le FAR*.
2. Le FAR et le FAR* sont des indicateurs de risque très utiles. Cependant, ils peuvent représenter une mesure très grossière, car ils s'appliquent à tous les membres d'un groupe donné sans tenir compte des différences des niveaux de risque auxquels sont exposés les uns et les autres.
3. Dans le domaine du transport, on utilise souvent les mesures d'exposition au risque suivantes :
 - Pour l'aviation : Nombre d'heures de vol, Nombre d'heures de vol par personne, Nombre de départs d'avions. Compte tenu de la première mesure, le FAR_a est donné par :

$$FAR_a = \frac{\text{Nombre de fatalités lié à l'accident de vol}}{\text{Nombre d'heures de vol}} \cdot 10^{-5} \quad (1.13)$$

c-à-d, le nombre de fatalités par 100 000 heures de vol.

- Pour le transport ferroviaire et routier : Nombre de kilomètres parcourus, Nombre de kilomètres par personne, Nombre d'heures de voyage par personne.

3.2. Courbes FN

3.2.1. Principe et Définitions :

Dans de nombreux cas, les conséquences possibles d'un accident peuvent être très variées. Pour ce, les analystes s'intéressent souvent à analyser les accidents dont les conséquences C sont supérieures ou égales à une certaine valeur C_i. Le concept de « probabilité ou fréquence de dépassement » (exceedance

frequency/probability) est utilisé pour décrire cette analyse. Un exemple d'une courbe aléatoire de dépassement est donné par la figure 1.2.

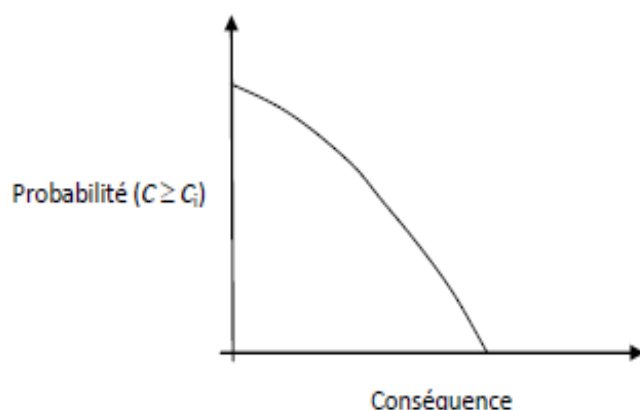


Figure 1.2. Exemple d'une courbe de dépassement

Ce type de courbes était introduit initialement par Farmer (1967) lorsqu'il étudiait le risque lié au relâchement des éléments radioactifs, précisément l'iode I-131 et I-132, de réacteurs nucléaires. Ces courbes s'appellent les courbes de Farmer.

Comment peut-on obtenir la courbe de probabilité de dépassement ?

Soit (p_i, C_i) le couple de probabilité et de conséquence relatif au scénario d'accident S_i . On suppose qu'on ait N scénarios d'accidents dont les conséquences sont ordonnées selon la gravité croissante, soit par exemple : $C_1 \leq C_2 \leq \dots \leq C_{N-1} \leq C_N$. Si P_i est la probabilité d'avoir une conséquence C au moins égale à C_i (i.e., C_i ou pire que C_i), alors on peut écrire :

$$P_i = Prob(C \geq C_i) = \sum_{k=i}^N p_k \quad (1.14)$$

La méthode de calcul de P_i est illustrée par le tableau 1.2.

Tableau 1.2. Méthode de calcul de la probabilité de dépassement P_i

Scénario	Probabilité	Conséquence	$P_i = Prob(C \geq C_i)$
S_N	p_N	C_N	$P_N = p_N$
S_{N-1}	p_{N-1}	C_{N-1}	$P_{N-1} = p_N + p_{N-1} = P_N + p_{N-1}$
.	.	.	.
S_3	p_3	C_3	$P_3 = p_N + p_{N-1} + \dots + p_4 + p_3 = P_4 + p_3$
S_2	p_2	C_2	$P_2 = p_N + p_{N-1} + \dots + p_3 + p_2 = P_3 + p_2$
S_1	p_1	C_1	$P_1 = p_N + p_{N-1} + \dots + p_2 + p_1 = P_2 + p_1$

En considérant le nombre de fatalités comme conséquence potentielle (i.e. représentative) des accidents, on peut représenter le risque sociétal par une courbe dite FN décrivant la fréquence cumulé annuelle de n fatalités ou plus, sur une double échelle logarithmique. La courbe FN permet de concrétiser la probabilité de dépassement comme étant une fonction de nombre de fatalités.

Soit N la variable aléatoire décrivant le nombre de fatalités suite à des accidents fatals (causant au moins un cas de fatalité). Si l'on peut établir une distribution de probabilité continue de N (distribution par ajustement statistique,

par exemple), caractérisée par une fonction de densité de probabilité du nombre de fatalités par an, $f_N(u)$, alors on peut écrire :

$$1 - F_N(u) = 1 - \text{Prob}(N \leq u) = \text{Prob}(N > u) = \int_u^{\infty} f_N(u) \quad (1.15)$$

Où $F_N(u)$ est la distribution de probabilité cumulée (ou fonction de répartition) de la variable aléatoire N ; u étant les valeurs que peut prendre N . A noter que la probabilité de dépassement $\text{Prob}(N > u)$ n'est que la distribution cumulée complémentaire de $F_N(u)$ (voir figure 1.3).

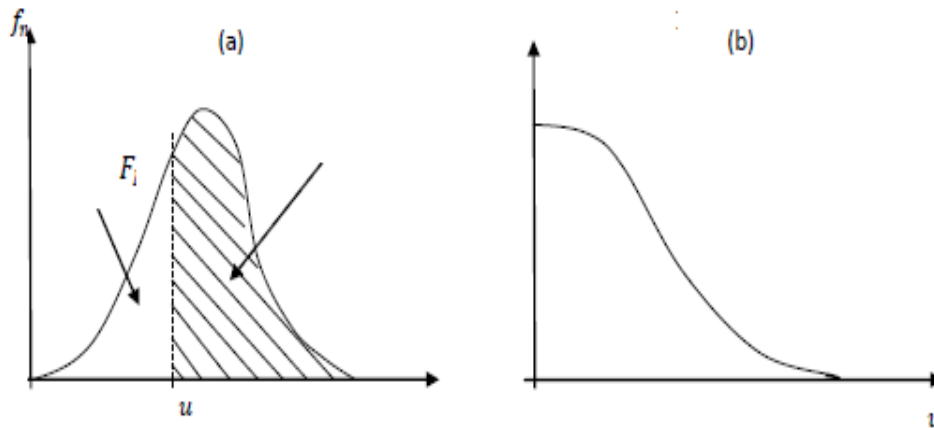


Figure 1.3. (a) Exemple de densité de probabilité de N , (b) Probabilité de dépassement

A partir de l'équation (1.15), on peut calculer le nombre moyen de fatalités par an, i.e. PLL (voir section 3.1.4), comme étant l'espérance mathématique (moyenne) de la variable aléatoire N , soit :

$$E(N) = \int_0^{\infty} u \cdot f_N(u) du \quad (1.16)$$

L'exécutive britannique HSE a défini une intégrale de risque, RI (Risk Integral), comme mesure pour le risque sociétal. Soit :

$$RI = \int_0^{\infty} u(1 - F_N(u)) du \quad (1.17)$$

Il a défini aussi un RI pondéré, appelé RI_{COMAH} (COMAH : Control of Major Accident Hazards) :

$$RI_{COMAH} = \int_0^{\infty} u^{\alpha} \cdot f_N(u) du \quad (1.18)$$

Où α représente le coefficient d'aversion (réaction) aux accidents ; $\alpha \geq 1$. Si $\alpha = 2$, l'expression (1.18) donne le moment d'ordre 2 de la densité de probabilité $f(n)$, soit :

$$E(N^2) = \int_0^{\infty} u^2 \cdot f_N(u) du \quad (1.19)$$

3.2.2. Cas d'occurrence d'accidents selon un Processus de Poisson Homogène (PPH)

Considérons le cas où l'occurrence d'accidents fatals suit un PPH avec une fréquence annuelle λ . Soit N le nombre de fatalités d'un accident fatal futur. La fréquence des accidents fatals causant n fatalités ou plus est donnée par :

$$F(n) = \lambda_{N \geq n} = \lambda \cdot \text{Prob}(N \geq n) \quad (1.20)$$

Où $Prob(N \geq n)$ est la probabilité qu'on ait n fatalités ou plus, i.e. probabilité de dépassement. A noter que $Prob(N \geq 1) = 1$ puisque les accidents considérés sont fatals.

La courbe FN est obtenue en traçant $F(n)$ en fonction de n ($n = 1, 2, \dots$), comme le montre l'exemple de la figure 1.3.

La fréquence d'accidents avec exactement n est alors :

$$f(n) = F(n) - F(n + 1) \quad (1.21)$$

Puisque $f(n) \geq 0$, la fonction $F(n)$, i.e. la courbe FN, est décroissante : plus le nombre de fatalités augmente, plus la fréquence diminue.

Le nombre moyen de fatalités suite à un accident futur est :

$$E(N) = \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot Prob(N = n) = \sum_{n=1}^{\infty} Prob(N \geq n) \quad (1.22)$$

A noter que l'expression (1.22) n'est en fait que l'expression (1.16), mais appliquée au cas discret (PPH). De plus, $E(N)$ étant aussi le $PLL_{accident}$.

Le nombre total moyen de fatalités par an, suite à tous les accidents fatals futurs (pouvant survenir au cours de l'année prochaine, par exemple), est donné par :

$$E(N_{Total}) = PLL_{Total} = \lambda \cdot E(N) \quad (1.23)$$

En considérant (1.22), l'équation (1.23) devient :

$$E(N_{Total}) = \sum_{n=1}^{\infty} \lambda \cdot Prob(N \geq n) \quad (1.24)$$

Soit, compte tenu de (1.20) :

$$E(N_{Total}) = \sum_{n=1}^{\infty} F(n) \quad (1.25)$$

3.2.3. Exemple de traçage de la Courbe FN

Supposons que suite à une analyse par HAZOP, on a pu identifier trois scénarios d'accident potentiels (représentatifs) : Incendie, Explosion et Dégagement de gaz toxique. L'analyse de fréquence et de conséquence a donné les résultats du tableau 1.3. Bien entendu, les valeurs ne sont pas réelles et sont données juste à titre d'exemple.

Tableau 1.3. Exemple de données d'une analyse de risque

Scénario d'accident	Nombre de fatalités estimé, N	Fréquence, f (Nombre d'événement par an)
Incendie	1	0.04
Explosion	5	0.02
Dégagement de gaz toxique	10	0.01

Dans un premier temps, déterminons les couples fN pour les différentes valeurs de N . On aura :

$$N = 0, f = 0 ; \quad N = 6, f = 0$$

$$N = 1, f = 0.04; \quad N = 7, f = 0$$

$$N = 2, f = 0; \quad N = 8, f = 0$$

$$N = 3, f = 0; \quad N = 9, f = 0$$

$$N = 4, f = 0; \quad N = 10, f = 0.01$$

$$N = 5, f = 0.02;$$

Notons qu'on peut utiliser la notation fonctionnelle : $f(0) = 0, f(1) = 0.04, \dots$

Nous pouvons tracer l'histogramme fN , mais il n'est très informative car dépendant fortement des valeurs de N ou des classes établies à partir de ces valeurs. Donc, on préfère représenter graphiquement les fréquences annuelles de dépassement, i.e. la courbe FN. En suivant la méthode de calcul du tableau 1.2, on obtient :

$$F(10) = f(10) = 0.01$$

$$F(9) = F(10) + f(9) = 0.01 + 0 = 0.01$$

...

$$F(6) = F(7) + f(6) = 0.01 + 0 = 0.01$$

$$F(5) = F(6) + f(5) = 0.01 + 0.02 = 0.03$$

...

$$F(2) = F(3) + f(2) = 0.03 + 0 = 0.03$$

$$F(1) = F(2) + f(1) = 0.03 + 0.04 = 0.07$$

La courbe FN correspondante est donnée par la figure 1.4. On remarque que c'est une courbe en escalier décroissante comme le montre la droite de tendance (en bleu). A noter aussi que pour les courbes FN, on utilise la lettre N à la place de n pour exprimer la valeur du nombre de fatalités.

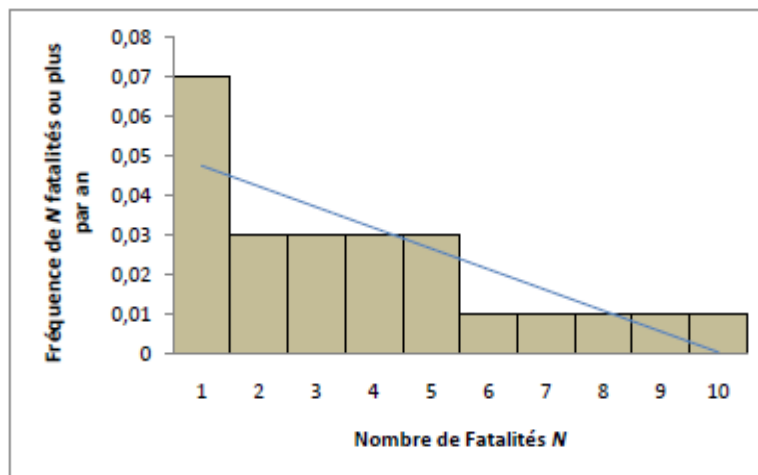


Figure 1.4. Courbe FN

Par application de l'expression (1.21) et en tenant compte de (1.8), on peut calculer le nombre global moyen de fatalités par an (i.e. *PLL*) causé par les trois scénarios, soit :

$$E(N) = \sum_{n=1}^{10} n \cdot f(N = n) \quad (1.26)$$

$$E(N) = 1 \times 0.04 + 5 \times 0.02 + 10 \times 0.01 = 0.24 \text{ fatalités /an}$$

Ce qui peut être interprétée comme 24 fatalités parmi 100 personnes exposées par an. D'où l'attention à prêter pour les événements fatals multiples.

3.2.4. Exemples de Courbes FN

La figure 1.5 montre des courbes FN pour des risques relatifs à différents activités.

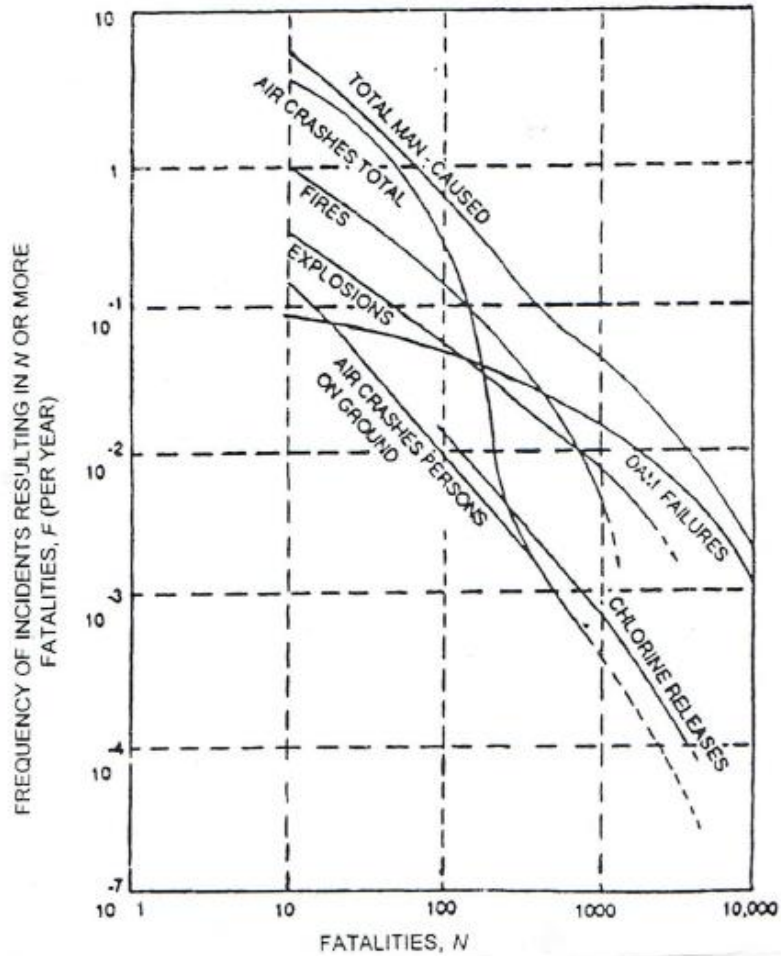


Figure 1.5. Exemple de courbe FN pour différentes activités (CCPS, 2000)

3.2.5. Critères d'Acceptabilité de Risque

Les mesures de risque issues d'une Analyse Quantitative des Risques (QRA : Quantitative Risk Analysis) peuvent être comparées à des valeurs de références dites critères d'acceptabilité de risque (Risk Acceptance Criteria). Pour les courbes FN, ces critères se présentent sous forme de droites décroissantes.

Une droite-critère FN est définie par deux paramètres :

- Un point de repère qu'est un couple fixe de fréquence et de conséquence, $(N, F(N))$
- Un facteur d'aversion de risque α déterminant la pente de la droite.

Sachant ces deux paramètres, la droite-critère FN est établie à partir de l'équation :

$$F \cdot N^\alpha = k \quad (1.27)$$

Où k est une constante. En passant au logarithme, l'équation (1.27) devient :

$$\log F + \alpha \cdot \log N = k' \quad (1.28)$$

Avec $k' = \log k$. En posant $y = \log F$ et $x = \log N$, l'équation (1.28) s'écrit aussi :

$$y = -\alpha \cdot x + k' \quad (1.29)$$

qui est une droite de pente $-\alpha$. Un exemple de ce type de droites est donné par la figure 1.6.

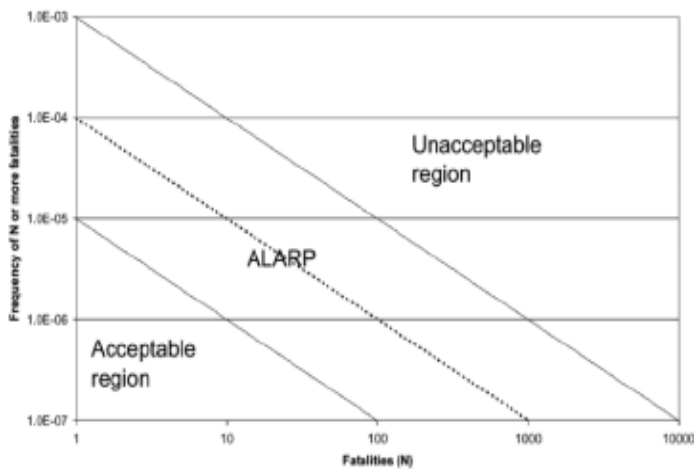


Figure 1.6. Exemple de droites-critères FN (Lannoy, 2013)

Comme on peut le constater, les deux droites en ligne pleine séparent trois zones de risque : le risque acceptable caractérisé par l'amélioration continue, le risque tolérable caractérisé par le principe ALARP (As Low as reasonably Practicable) qui est régi généralement par une Analyse Coût-Bénéfice (ACB) (En anglais, CBA : Cost-Benefit Analysis) et le risque inacceptable où des mesures de sécurité immédiates doivent être prise. Ces parties seront développées dans les chapitres suivants.

Les points de repères et les pentes des deux droites sont déduits à partir des critères d'acceptabilité de risque qui sont le résultat d'un consensus entre les différentes parties prenantes (Chefs d'entreprises, Autorités compétentes, Public et Experts). Dans l'exemple de la figure 1.6, la fréquence maximale tolérable pour des accidents fatals (un

moins un cas de fatalité) est $10^{-3}/an$, au-delà, c'est la zone inacceptable. De la même manière, la fréquence maximale acceptable pour des accidents fatals est $10^{-5}/an$. Entre ces deux valeurs limites, c'est la zone risque tolérable ou la zone ALARP.

Partie B : Méthodologie d'une Analyse Quantitative du Risque

4. Etapes d'une analyse quantitative du risque

La démarche d'analyse quantitative des risques (QRA) est généralement réalisée à travers une série d'étape d'activités qui sont schématisées dans la figure (1.7).

4.1 Collecte des informations pertinentes

Cette première étape consiste à recueillir toutes les informations pertinentes : Informations géographiques (l'emplacement de la zone étudiée : situation géographique) ; données climatiques (humidité, rayonnement solaire, rose des vents, stabilité atmosphérique) ; les propriétés physico-chimiques des substances impliquées et enfin, informations sur le processus ou le système analysé.

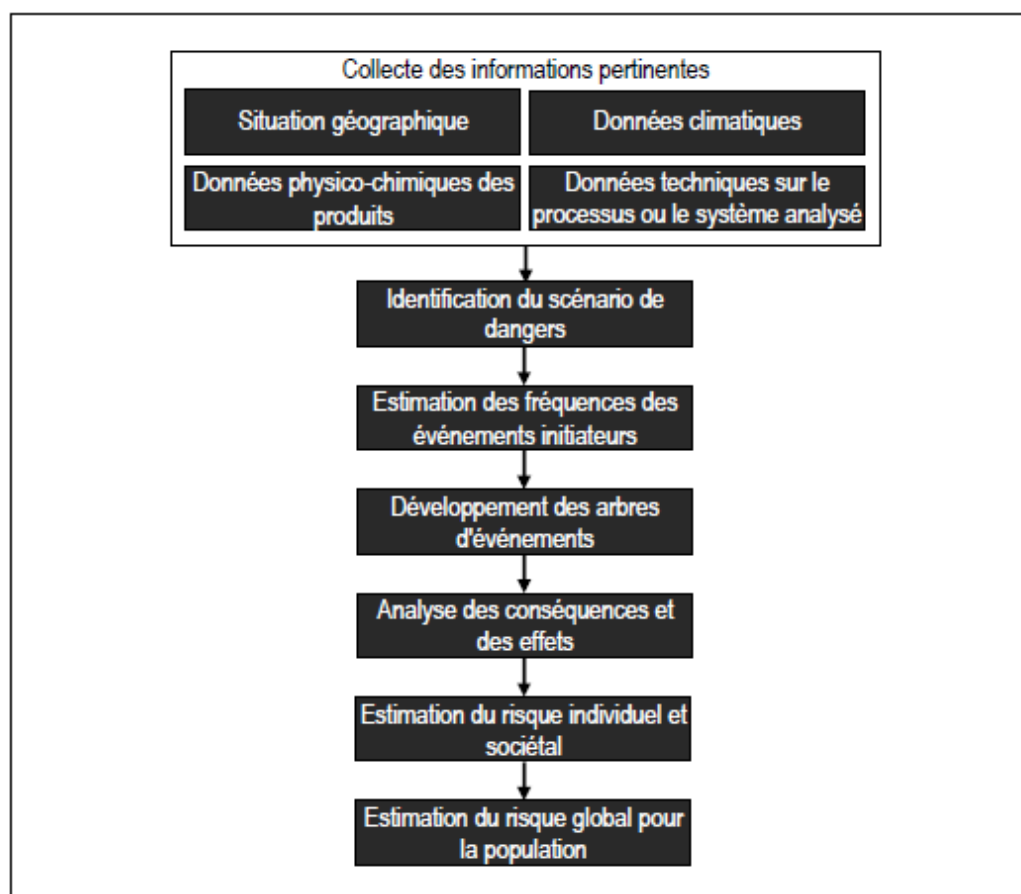


Figure 1.7. Principales étapes d'une QRA

4.2 Identification des scénarios d'accidents

On identifie les différents scénarios d'accidents potentiels (ou représentatifs). Par exemple : rupture d'une conduite de gaz, explosion d'un séparateur sous pression, ...etc.

Les scénarios d'accidents sont développés sur la base d'une analyse qualitative des dangers en utilisant des outils d'analyse tels que HAZOP, AMDEC, etc. L'application de ces méthodes permet d'identifier les causes et les conséquences et aussi les différentes barrières de prévention et de protection.

4.3 Estimation des fréquences des événements initiateurs

Pour les scénarios d'accidents identifiés, il est nécessaire d'estimer les fréquences des événements initiateurs. Pour ce, on fait appel aux différentes méthodes d'estimation à savoir, le retour d'expérience, le jugement d'experts et les données génériques issues des banques de données. Le tableau (1.4) montre une sélection de valeurs dans l'industrie pétrolière.

Tableau 1.4. Fréquences des événements de perte de confinement (TNO, 1999)

System		Instantaneous release of the complete inventory	Release of the complete inventory in 10 min	Continuous release from a hole with $d_s = 10$ mm
Stationary vessels	Pressure vessel	$5 \cdot 10^{-7}$ year ⁻¹	$5 \cdot 10^{-7}$ year ⁻¹	$1 \cdot 10^{-5}$ year ⁻¹
	Process vessel	$5 \cdot 10^{-6}$ year ⁻¹	$5 \cdot 10^{-6}$ year ⁻¹	$1 \cdot 10^{-4}$ year ⁻¹
	Reactor vessel	$5 \cdot 10^{-6}$ year ⁻¹	$5 \cdot 10^{-6}$ year ⁻¹	$1 \cdot 10^{-4}$ year ⁻¹
Atmospheric tanks	Single containment tank	$5 \cdot 10^{-6}$ year ⁻¹	$5 \cdot 10^{-6}$ year ⁻¹	$1 \cdot 10^{-4}$ year ⁻¹
	Mounded tank	$1 \cdot 10^{-8}$ year ⁻¹		
Heat exchangers	Dangerous substance outside pipes	$5 \cdot 10^{-5}$ year ⁻¹	$5 \cdot 10^{-5}$ year ⁻¹	$1 \cdot 10^{-3}$ year ⁻¹
	Dangerous substance inside pipes	$1 \cdot 10^{-5}$ year ⁻¹	$1 \cdot 10^{-3}$ year ⁻¹	$1 \cdot 10^{-2}$ year ⁻¹
Pipes		Full bore rupture	Leak ($d = 0.1 \cdot d_s$, max 50 mm)	
$d < 75$ mm		$1 \cdot 10^{-6}$ m ⁻¹ year ⁻¹	$5 \cdot 10^{-6}$ m ⁻¹ year ⁻¹	
$75 \text{ mm} \leq d \leq 150$ mm		$3 \cdot 10^{-7}$ m ⁻¹ year ⁻¹	$2 \cdot 10^{-6}$ m ⁻¹ year ⁻¹	
$d > 150$ mm		$1 \cdot 10^{-7}$ m ⁻¹ year ⁻¹	$5 \cdot 10^{-7}$ m ⁻¹ year ⁻¹	

4.4 Développement des Arbres d'Evénements (AdE)

Chaque événement initiateur conduit à des séquences spécifiques d'événements débouchant sur des conséquences qui peuvent être indésirables (voir figure 1.8). Chaque séquence doit être quantifiée pour permettre d'estimer les fréquences des scénarios d'accidents. Cette quantification sert à évaluer d'une manière chiffrée les scénarios d'accidents en termes de leurs fréquences d'occurrence et de leurs conséquences.

4.5 Analyse des conséquences et des effets

Une fois que les arbres d'événements sont établis, les conséquences doivent être déterminées en estimant leurs effets sur les individus, les installations et l'environnement.

Les conséquences d'un scénario d'accident se définissent à l'aide de deux paramètres : (1) les caractéristiques de l'accident et (2) son impact. Le premier paramètre est déterminé à partir de la modélisation de l'accident, le second est établi en modélisant l'effet des caractéristiques de l'accident sur

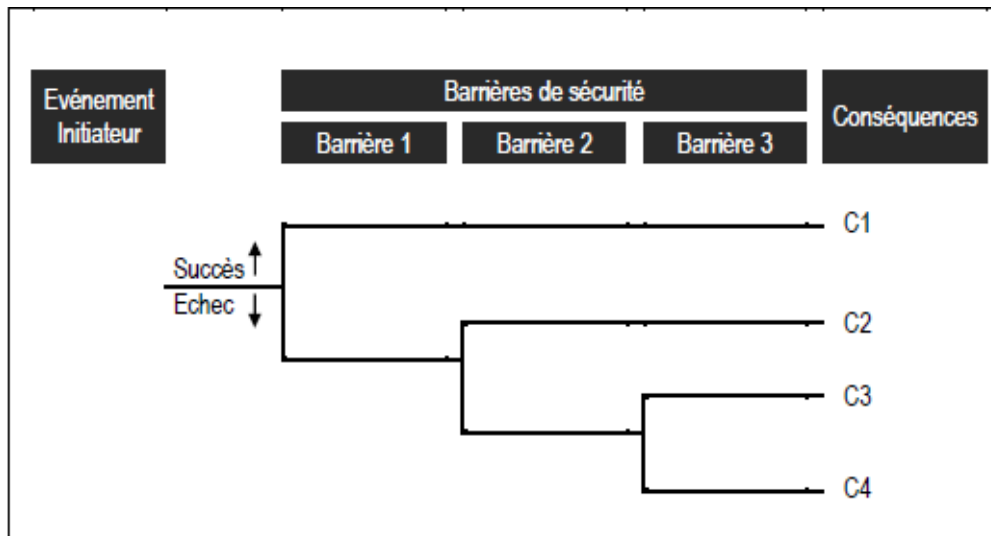


Figure 1.8. Exemple d'un AdE

les éléments du milieu environnant. Par exemple, lors d'un incendie (événement accidentel), la radiation thermique (caractéristique) entraîne des brûlures (impact) aux individus exposés.

Les conséquences peuvent être calculées à l'aide de tables et abaques, ou à l'aide de modèles physiques et des modèles de vulnérabilité (voir section 4.6.3).

Des logiciels permettant une automatisation de certaines approches de calcul sont disponibles sur internet, notamment le logiciel de l'EPA "ALOHA", s'ajoutent les logiciels commerciaux tels que "PHAST" et "SAFETI".

4.6 Estimation du risque individuel et sociétal

Comme on a vu dans la partie A (Section 3), la quantification du risque prend souvent en compte les scénarios d'accidents fatals, car les statistiques de mortalité sont simples à acquérir et les critères d'acceptabilité des risques portent principalement sur le risque de décès (fatalité).

Dans une QRA, après avoir évalué les probabilités d'occurrence des événements redoutés et leurs conséquences, on mesure souvent le risque à l'aide des deux métriques de représentation que sont le risque individuel et le risque sociétal.

4.6.1 Risque individuel

En considérant les scénarios d'accidents potentiels S_i ($i = 1, \dots, m$), on peut calculer le risque individuel relatif à S_i et le risque individuel global, à un endroit (x, y) donné, en utilisant respectivement les expressions (1.3) et (1.4).

La valeur de la la probabilité de fatalité $Prob(Fatalité \text{ à } (x, y)/S_i)$ est obtenue en appliquant les modèles de vulnérabilité (voir section ...). La fréquence λ_i (ou f_{ci}) du scénario S_i est calculée à partir de la quantification du chemin conduisant à la conséquence C_i correspondante. Elle est donnée donc par :

$$f_{ci} = f_{EI} \times Prob_{séquence\ i} \quad (1.30)$$

Où f_{EI} est la fréquence de l'événement initiateur (ou incident) et $Prob_{séquence\ i}$ est la probabilité de la séquence des événements menant à C_i (i.e. scénario S_i).

6. Références bibliographiques

1. M. Rausand, *Risk Assessment : Theory, Methods, and Applications*, John Wiley & Sons, Inc., USA, 2011.
2. M. Rausand & A. Hoyland, *System Reliability Theory, Models, Statistical Methods, and Application*, Second Ed., John Wiley & Sons, Inc., USA, 2004.
3. T. Aven, *Quantitative Risk Assessment*, The Scientific Platform, Cambridge University Press, UK, 2011.
4. T. Aven, *Foundations of Risk Analysis, A Knowledge and Decision-Oriented Perspective*, John Wiley & Sons, Ltd, UK, 2003.
5. CCPS, *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, Second Ed., American Institute of Chemical Engineers, USA, 2000.
6. I. Sellami & R. Nait-Said, *Analyse Quantitative des Risques Industriels : Apport des Techniques Floues et Possibilistes*, Verlag/Editions Universitaires Européennes, Allemagne, 2017.
7. A. Lannoy, *Le Risque Acceptable : Panoram des méthodes existante pour le déterminer*, Institut pour la Maitrise des Risques (IMdR), France, 2013, <https://www.researchgate.net/publication/280609820>
8. TNO, Committee for the Prevention of Disasters. *Guidelines for Quantitative Risk Analysis (Purple Book)*, CPR 18E, The Hague, 1999.
9. J. Casal, *Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants*, Industrial Safety Series, Vol. 8, Elsevier Science, 2008.
10. J.E. Vinnem, *Offshore Risk Assessment, Priciples, Modelling and Applications of QRA Studies*, Vol. 1, Third Ed., Springer-Verlag, London, 2014.
11. T. Bedford & R. Cooke, *Probabilistic Risk Analysis: Foundations and Methods*, Cambridge University Press, UK, 2001.
12. S.N. Jonkman, P.H.A.J.M. van Gelder & J.K. Vrijling, *An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage*, *Journal of Hazardous Materials*, A99, pp. 1-30, 2003.
13. M. Stamatelatos & H. Dezfuli (NASA Project Managers), *Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners*, NASA/SP-2011-3421, Second Ed., December 2011.

Chap. II- Matrices de Risque

1. Introduction :

L'analyse des risques vise dans un premier temps à identifier les sources de dangers et les situations dangereuses pouvant porter préjudice aux personnes et conduire à des endommagements d'équipements et d'environnement. Puis il s'agit d'estimer les risques identifiés en vue de les hiérarchiser par référence à un niveau jugé acceptable.

L'estimation du risque peut être effectuée à partir d'un certain nombre de facteurs tels que :

- La probabilité (ou la fréquence) d'occurrence de l'événement non souhaité,
- La gravité des effets,
- La détection des anomalies liées au processus,
- La fréquence et la durée d'exposition au danger,
- La possibilité d'évitement de l'événement non souhaité.

L'acceptation du risque estimé est fonction de la définition préalable de critères d'acceptabilité du risque. Cette définition est une étape-clé dans le processus de gestion du risque dans la mesure où elle va juger de l'efficacité des barrières de sécurité existantes et conditionner les éventuelles mesures à prendre pour réduire le risque. C'est une étape cruciale est bien souvent la plus délicate. Le guide ISO/CEI 51 évoque implicitement la difficulté de retenir des critères objectifs et forfaitaires pour l'acceptation du risque : « *Risque accepté dans un certain contexte et fondé sur les valeurs admises par la société* ». Ainsi, l'acceptation du risque peut dépendre de facteurs éthiques, moraux, économiques ou politiques.

L'analyse de criticité des risques industriels est une partie complémentaire de certaines méthodes d'analyse de la sécurité des systèmes telles que l'AMDE et HAZOP. Elle a pour but d'évaluer, pour chaque mode de défaillance ou déviation, le couple probabilité-gravité. Pour juger de la gravité des effets des modes de défaillance ou des déviations, on établit une échelle de gravité avec un certain nombre de catégories ayant chacune une définition plus ou moins précise. Il en est de même pour la grandeur « probabilité » qui reste plus facile à traiter vu le caractère numérique qui la sous-tend. En effet, on peut s'aider de définitions quantitatives pour caractériser les différentes catégories.

2. Méthodes d'analyse des risques

Les méthodes d'analyse des risques sont classées dans trois principales catégories : méthodes qualitatives, méthodes semi-quantitatives et méthodes quantitatives (voir figure 1). Les Matrices de Risque sont les plus utilisées en pratique car ne considérant que deux grandeurs : probabilité et gravité avec un nombre réduit de niveaux de criticité du risque.

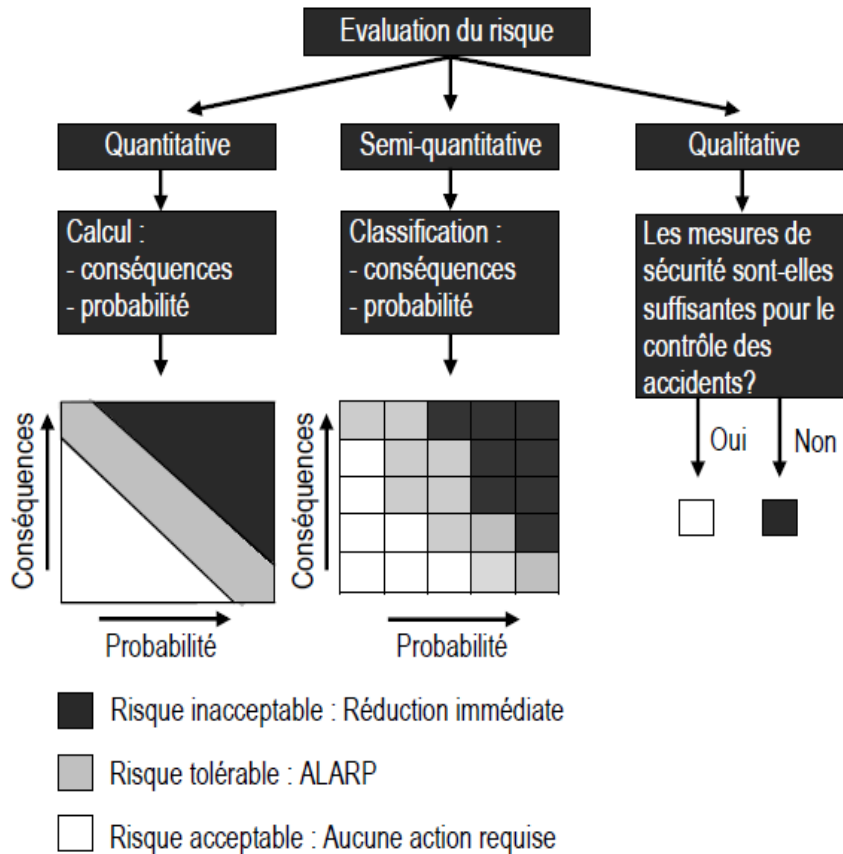


Figure 1. Classification des méthodes d'analyse des risques [Dziubiński et al., 2006]

3. Matrice de Risque (MdR)

La MdR permet d'hierarchiser les événements en termes de risque tolérable, critique et non tolérable. En effet, une fois le risque (Probabilité-Gravité) associé à un événement donné est estimé, on le situe dans la grille de criticité pour juger de son acceptation. Le niveau du risque dans la matrice croit dans le sens de la diagonale, conformément à la propriété de comparaison suivante :

$$(P_1, G_1) > (P_2, G_2) \Leftrightarrow P_1 > P_2 \text{ et } G_1 > G_2 \quad (1.1)$$

Cependant, les frontières séparant les zones acceptable, critique et non acceptable dépendent des *critères d'acceptabilité du risque* lesquels seront le plus souvent le résultat d'un *consensus entre le groupe de gestion de l'entreprise et les autorités compétentes*.

Il n'y a pas de MdR universelle et toute matrice doit être adaptée à l'installation étudiée. Il suffit de changer l'environnement d'une installation donnée (environnement naturel, population avoisinante) pour voir que le niveau toléré par la première population et/ou l'impact sur le premier environnement naturel ne seront pas forcément les mêmes que ceux relatifs au second environnement ; il se peut que la seconde population ne tolère pas la pollution provoquée par l'installation, par effet médiatique ou par souci de préservation de la santé de ses membres.

4. Exemples de MdR

4.1. MdR utilisée par l'INERIS dans le cadre de l'étude de dangers.

La grille est donnée sur la figure 3.

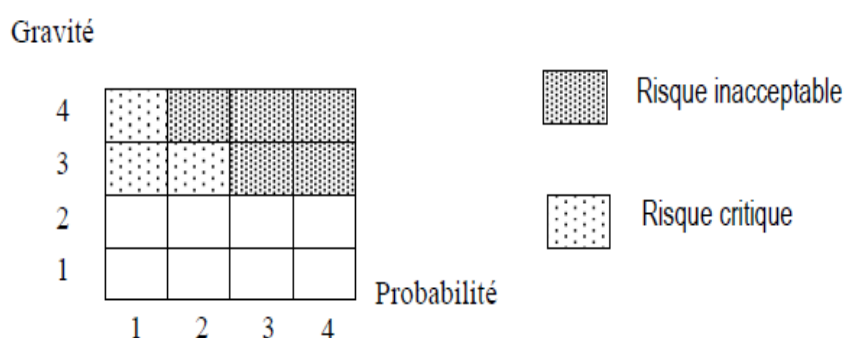


Fig. 3 : MdR de l'INERIS.

Les échelles de probabilité et de gravité sont respectivement données dans les tableaux 4 et 5.

Tableau 4 : Echelle de Probabilité.

Niveau	Interprétation Probabiliste	Traduction en barrière de sécurité
4	Événement très probable : s'est déjà produit sur le site ou de nombreuses fois sur d'autres sites	Nom respect d'une procédure de sécurité entraînant un accident, ou barrière de sécurités mal dimensionnées (performance limite des BS)
3	Événement probable : Ne s'est jamais produit sur le site mais a été observé de façon répétée sur d'autres sites	L'accident suppose le non respect d'une procédure de sécurité et la défaillance d'un contrôle permanent, (performance moyenne de BS).
2	Événement peu probable : Ne s'est jamais produit sur le site mais quelque fois sur d'autres sites.	L'accident suppose le non-respect d'une procédure de sécurité, la défaillance d'un contrôle et la défaillance d'une barrière de sécurité indépendante (BS fortes).
1	Événement improbable : Ne s'est jamais produit sur le site mais quelques fois sur d'autres sites	L'accident suppose le non-respect d'une procédure de sécurité, la défaillance d'un contrôle et la défaillance de plusieurs barrières de sécurité indépendantes (BS très fortes)

Tableau 5 : Echelle de Gravité.

Niveau	Effets sur l'homme	Effets sur l'équipement	Effets sur l'environnement
4	Au moins une victime à l'extérieur du site ou au moins 2 victimes sur le site	Atteinte d'un bien, équipement dangereux ou de sécurité à l'extérieur du site, ou sur le site avec possibilité d'aggravation des conséquences.	Atteinte critique à des zones vulnérables avec répercussions locales.
3	Une victime à un pote de travail occupé en permanence	Atteinte d'un équipement dangereux ou de sécurité sur le site sans aggravation générale des conséquences.	Atteinte sérieuse nécessitant une grande dépollution
2	Effet critique pour une personne se trouvant de façons fortuite à proximité de siège de l'accident	Atteinte d'un équipement dangereux du site sans synergie d'accidents ou des équipements de sécurité non critique.	Atteinte limitée au site avec une dépollution minime
1	Aucun effet ou accident corporel	Pas d'effets significatifs sur les équipements du site	Pas d'atteintes significatives à l'environnement.

4.2. Grille utilisée en Aéronautique

La figure 4 montre un exemple de grille utilisée en aéronautique. Elle se base sur les critères suivants :

- a) Toute défaillance dont les conséquences sont catastrophiques doit être extrêmement improbables.
- b) Toute défaillance dont les conséquences sont critiques doit être improbables ou extrêmement improbable.
- c) Toute défaillance dont les conséquences sont significatives ne doit être ni fréquente ni peu fréquente.

Les niveaux de gravité sont donnés dans le tableau 6.

Prob. Gravité		10^{-5}	10^{-7}	10^{-9}
	Fréquent ou Peu Fréquent	Rare	Extrêmement Rare	Extrêmement Improbable
Mineure				
Significative				
Critique		Inacceptable		
Catastrophique				

Fig. 4 : Exemple de grille utilisée en aéronautique.

Tableau 6 : Définition des classes de gravité.

Classe	Description
Mineure	Ni dégradation sensibles des performances du système, ni interruption e la mission, ni blessure, ni endommagement notable du système
Significative	Dégradation sensible des performances du système, pouvant entraîner l'interruption de la mission, mais il n'y a ni blessure de personnes, ni endommagement notable du système.
Critique	Il peut y avoir blessure de personnes et/ou endommagement notable du système.
Catastrophique	Il y a destruction du système et/ou plusieurs blessés graves et/ou mort de personnes.

6. Références bibliographiques

1. M. Rausand, Risk Assessment : Theory, Methods, and Applications, John Wiley & Sons, Inc., USA, 2011.
2. T. Aven, Risk Analysis : Assessing uncertainties Beyond Expected Values and Probabilities, John Wiley & Sons, Ltd, UK, 2008.
3. J.M. Flaux, Analyse des risques des systèmes de production industriels et de services, Aspects technologiques et humains, Lavoisier, Paris, 2013.
4. C. Livens, Sécurité des systèmes, Ed. Cepadues, Toulouse, 1976.
5. P. Dubiez & D. Benaceur, La gestion des risques industriels - Etat de l'art, Document EDF, 93NBOO164, Clamart, 1993.
6. C.A. Kontovas, Formal Safety Assessment, Critical review and future role, Diploma thesis, National Technical University of Athens, July 2005.
7. Agarwala A.S., « Shortcoming in MIL-STD-1629 Guidelins for criticality Analysis», *Proceeding of Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 1990, pp. 494-496.
8. Bowels J. B., «An assessment of RPN Prioritization in a Failure Modes Effects and Criticality Analysis», *Proceeding of Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 2003, pp. 380-386.
9. Farquharson J. & al., «FMEA of marine systems: Moving from perspective to risk-based design and classification», *Proceeding of Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 2002, pp. 165-172.