



Institut pour la Maîtrise des Risques
Sûreté de Fonctionnement - Management - Cindyniques

Le risque acceptable : panorama des méthodes existantes pour le déterminer.

André Lannoy

07/02/2013

Après avoir recherché les différentes définitions du risque acceptable dans la documentation technique, cet article constate qu'il est d'usage de caractériser un risque acceptable par des critères quantitatifs d'acceptation, principalement la probabilité de défaillance ou l'indice de fiabilité en ce qui concerne la sécurité – sûreté des structures. Les valeurs cibles de ces deux grandeurs peuvent être déterminées à partir de l'observation du retour d'expérience des structures ou de la comparaison avec d'autres risques rencontrés dans la vie courante ou des pratiques préconisées dans les réglementations ou recommandations techniques ou de l'utilisation de méthodes de sûreté de fonctionnement ou de méthodes d'aide à la décision économique ou d'aspects sociologiques. Ces différentes méthodes sont brièvement décrites. Ces critères d'acceptation, qui sont un préalable à une analyse objective de risque et de sécurité – sûreté, peuvent alors être utilisés pour des structures nouvelles ou existantes.



Le risque acceptable : panorama des méthodes existantes pour le déterminer.

André Lannoy, IMdR, V1.3, 07 02 2013

Résumé

Après avoir recherché les différentes définitions du risque acceptable dans la documentation technique, cet article constate qu'il est d'usage de caractériser un risque acceptable par des critères quantitatifs d'acceptation, principalement la probabilité de défaillance ou l'indice de fiabilité en ce qui concerne la sécurité – sûreté des structures. Les valeurs cibles de ces deux grandeurs peuvent être déterminées à partir de l'observation du retour d'expérience des structures ou de la comparaison avec d'autres risques rencontrés dans la vie courante ou des pratiques préconisées dans les réglementations ou recommandations techniques ou de l'utilisation de méthodes de sûreté de fonctionnement ou de méthodes d'aide à la décision économique ou d'aspects sociologiques. Ces différentes méthodes sont brièvement décrites. Ces critères d'acceptation, qui sont un préalable à une analyse objective de risque et de sécurité – sûreté, peuvent alors être utilisés pour des structures nouvelles ou existantes.

Plan

1) Introduction

2) La définition du risque acceptable

2.1) Quelques définitions de la documentation technique

2.2) Risque acceptable ou risque tolérable

2.3) En conclusion ...

3) La démarche d'analyse de risque et l'acceptation

3.1) Risque et incertitude

3.2) L'analyse de risque

3.3) Analyse de risque et critère d'acceptation

4) L'approche statistique ou l'approche épidémiologique

5) L'analyse du retour d'expérience des défaillances de structures

6) Les courbes de Farmer

7) La comparaison avec les codes et règlements existants

7.1) Les critères d'acceptation préconisés dans différentes normes et recommandations

7.2) En résumé...

7.3) Le cas des structures existantes

8) Quelques méthodes de spécification d'une fiabilité cible

8.1) Les méthodes d'allocation

8.2) La maximisation de l'utilité

8.3) La méthode LQI

8.4) Les méthodes de calibrage

8.5) La méthode ALARP

9) Les aspects sociologiques

10) Conclusions

11) Références bibliographiques

1) Introduction

Le risque acceptable est un concept bien difficile à définir. Est-ce une notion technique ? Est-ce une notion fondée sur les enjeux économiques et financiers ? Relève-t-elle du seul point de vue sociétal exprimé par le public ou du seul point de vue d'un décideur ou d'un homme politique ? Est-ce une valeur quantifiée ou un jugement subjectif ? Utilise-t-on ce concept pour tous les risques, industriel, naturel, médical, de la vie courante ? Quand rencontre-t-on la confrontation entre risque estimé et risque acceptable ? Comment procéder pour le définir, l'estimer, le quantifier ?

L'objectif de ce texte tente de répondre à ces différentes questions en faisant un rapide tour d'horizon du sujet. On s'intéressera en particulier au problème de la **sécurité – sûreté d'une structure**. D'une façon générale, la définition d'une fiabilité cible pour le comportement d'une structure est absolument fondamental. Cependant de nombreux éléments de ce papier sont également valables pour d'autres équipements.

Cet article a été rédigé dans le cadre d'une collaboration entre l'AFPS (Association Française du génie ParaSismique, groupe gestion du risque sismique) et l'IMdR (groupe sécurité et sûreté des structures). On s'intéresse donc en particulier aux **structures impactées par un séisme**.

Dans un premier temps, on définit le risque acceptable en s'appuyant sur quelques écrits de la documentation technique.

Puis on compare les différents risques rencontrés dans la vie par une étude épidémiologique en s'intéressant aux décès causés par ceux-ci.

On utilise aussi les analyses du retour d'expérience historique. On liste les réglementations liées à la définition d'un risque acceptable, dans différents secteurs industriels.

On propose ensuite différentes méthodes pouvant être utilisées pour définir un risque acceptable, comme les courbes de Farmer, l'utilisation des recommandations et règlements existants, les méthodes d'allocation, les EPS, les méthodes de calibrage, la maximisation de l'utilité, la méthode LQI, la méthode ALARP.

L'aspect probabiliste apparait essentiel car lui seul peut garantir le caractère objectif d'une analyse de risque (paragraphe 3.3). Il est néanmoins important de se pencher sur des aspects sociétaux, en particulier sur la perception et l'acceptation du public et sa sensibilisation au risque.

Dans le domaine des structures, on se réfère le plus souvent à leur fiabilité, ce qui traduit bien l'idée de confiance attribuée à la tenue, au comportement, à la gestion de cette structure.

**Tableau 1– Glossaire de quelques termes fréquemment utilisés
dans l'analyse des risques liés aux structures**

Terme	Définition
Probabilité de défaillance	$P_f = 1 - \text{fiabilité}$; c'est la probabilité que la fonction de défaillance Z devienne négative ou nulle pendant une période de référence choisie pour l'estimation
Fonction de défaillance ou équation de défaillance ou fonction d'état limite	Elle est exprimée en fonction des variables de base et probabilisée. Il y a défaillance si $Z \leq 0.$
Point β ou point de calcul	Ou point de conception ; c'est le point le plus proche de l'origine dans l'espace transformé normal réduit. Il est situé sur la surface de défaillance. La densité conjointe des variables de base en ce point est la plus élevée.
β	Indice de fiabilité , indice de Hasofer - Lind. β (valeur approchée de l'indice de fiabilité donnée par la méthode FORM(1)) est tel que : $\beta = \varphi^{-1}(1 - P_f) = -\varphi^{-1}(P_f)$ où φ^{-1} est la fonction inverse de la loi normale centrée réduite. Le tableau 2 donne la correspondance entre P_f et β . Cet indice β est aussi appelé : distance au point de conception ou indice de conception.
Fiabilité cible pour un système – structure – composant (SSC)	C'est une fiabilité considérée acceptable au regard du retour d'expérience passé, du jugement d'expert, de codes – normes – recommandations – réglementations, de réactions sociétales, d'analyses coûts – bénéfiques. Dans la réalité, on s'intéresse plutôt à la défiabilité qui

	est la probabilité de défaillance P_f .
--	---

(1) First Order Reliability Method.

Tableau 2 - Correspondance $P_f - \beta$

(probabilité de défaillance – indice de fiabilité)

P_f	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
β	1.28	2.33	3.09	3.72	4.26	4.75	5.20	5.61	6.00

L'état limite de la structure peut être un état de ruine correspondant à une défaillance physique (état limite ultime) ou un état correspondant à un fonctionnement dégradé mais encore acceptable (état limite de service).

Le tableau 2 montre que, plus l'indice β est élevé, plus la probabilité de défaillance est faible et plus la structure est fiable. L'indice est pratique par exemple pour comparer les structures entre elles.

2) La définition du risque acceptable

2.1) Quelques définitions de la documentation technique

De multiples définitions existent dans la documentation technique. Nous nous limitons aux définitions qui nous ont paru les plus représentatives.

Le mot acceptable vient du latin *acceptare*, recevoir, accueillir mais aussi supporter. Le dictionnaire Robert ne donne pas de définition de risque acceptable, mais il donne l'exemple : accepter un risque, ayant le sens de supporter ce risque.

Villemeur (1988) donne une définition du mot acceptable : **qualifie un évènement jugé acceptable au regard d'objectifs de sûreté de fonctionnement.**

L'encyclopédie Wikipedia spécifie, en se référant à la norme ISO/ CEI 73 : l'acceptabilité du risque désigne le fait qu'un risque puisse être accepté, ce qui renvoie aux critères évaluant la faculté à accepter le risque.

Sur un blog, le risque acceptable est défini comme un risque dont les caractéristiques (fréquence ou intensité du danger, gravité, niveau de perte, conséquences sociales, économiques, politiques, culturelles, techniques et

environnementales) sont considérées comme acceptables (et donc prêtes à être assumées) par l'individu, la communauté ou la société qui pourraient le subir.

Un risque acceptable est considéré du point de vue de la probabilité comme de la gravité des conséquences comme acceptable au regard d'autres risques notamment ceux de l'atteinte des objectifs poursuivis. Le consensus nécessaire à la reconnaissance du risque acceptable est fragile, et un fait dommageable qui affectera cet objet entraînera une perte de confiance immédiate dans la société de l'hyper médiatisation (selon (Michel, 2012)).

Le dictionnaire de l'environnement définit le risque acceptable comme un risque qui a été réduit à un niveau tolérable pour un organisme au regard des obligations légales et de sa propre politique.

Les documents du Ministère de la Santé français précisent qu'il n'y a pas de définition universelle. *Est acceptable ce qui est finalement accepté par les intervenants concernés.* Le caractère acceptable d'un risque est lié aux sites pollués au regard de différents critères, par exemple :

- au regard des risques liés à d'autres pollutions subies par les populations (air en ville, ...),
- au regard des risques sur lesquels sont fondés des seuils réglementaires pour l'eau potable, l'air, les aliments, ...

L'IAEA (2007) ne parle pas de risque acceptable mais de limite acceptable (*acceptable limit*), comme étant la valeur d'une quantité utilisée dans certaines activités spécifiées ou dans certaines circonstances qui ne doit pas être excédée. L'*acceptable limit* est une valeur acceptable limite pour les autorités réglementaires.

La norme IEC 61508 (2000), très discutée à l'heure actuelle, parle de risque tolérable (*tolerable risk*) comme étant un risque qui est acceptable dans un certain contexte et qui est basée sur les valeurs de la société. Cette définition nous dit que, finalement, le risque acceptable ne peut pas être défini par les méthodes de la maîtrise des risques, il proviendrait de considérations sociales et sociétales. Cette définition n'est pas logique : l'étude du risque contient une notion probabiliste, le risque ne peut donc être estimé qu'à partir des méthodes de la maîtrise des risques, même si les aspects socio économiques doivent être aussi pris en considération.

Les industriels de l'aéronautique (Lavédrine, 2009) ne semblent pas en accord avec cette norme IEC. Les méthodes de sûreté de fonctionnement permettent de définir des objectifs et donc de disposer d'un référentiel, de pouvoir comparer, d'éviter la subjectivité et d'accepter de fait les résultats obtenus, de juger les hypothèses pénalisantes sur des problématiques complexes, ... Implicitement, *définir des objectifs, c'est définir des critères d'acceptabilité du risque*. Ces critères ne sont pas nécessairement probabilistes et peuvent s'exprimer sous la forme de règles (critères de conception, tolérance aux erreurs et aux fautes,..). Ils doivent être définis au niveau de responsabilité adapté :

- de l'entreprise / du projet (objectifs de performance « internes »),
- d'une autorité externe (sécurité des tiers ou de l'environnement).

Le niveau décisionnel d'approbation des études de sûreté de fonctionnement doit correspondre au niveau décisionnel de définition du risque acceptable.

Le dictionnaire d'analyse et de gestion des risques (Desroches et al, 2006) est plus prolix. Il définit :

- le risque acceptable : risque conforme aux objectifs du référentiel d'acceptabilité, accepté en l'état ou suite à la mise en œuvre de mesures appropriées ; le risque acceptable est la caractéristique d'un risque résultant d'une décision explicite établie de façon objective par comparaison avec des risques connus et admis, naturels ou technologiques dans certaines branches d'activités ;
- le risque admissible : dans certains secteurs d'activité, il est précisé que le risque admissible n'est acceptable que temporairement du fait de la limitation des moyens disponibles pour le réduire ; à ce titre la notion de risque admissible peut être couverte par celle de risque tolérable sous contrôle ;
- le référentiel d'acceptabilité des risques : ensemble des règles définissant les limites d'acceptabilité des risques relatifs à une activité.

Quatre approches du risque acceptable sont présentées par (Lecomte, Suety, 2000) :

-i) *risque contre lequel je ne puis rien (notamment les risques naturels)* ; mais si l'on ne peut rien sur l'aléa naturel, on peut agir sur les mesures de réduction des effets (cas du renforcement de structures dans le cas d'un séisme) ;

- ii) *risque qui n'est pas prohibé par la loi et les règlements* ; mais la réglementation bien souvent n'existe pas pour les produits innovants ;
- iii) *risque que l'opinion publique tolère ou tolérera* ; mais l'opinion publique est versatile, influençable, incohérente, imprévisible ; on ne peut donc pas définir un risque acceptable ;
- iv) *risque dont on a pu établir avec confiance qu'il a une probabilité de se matérialiser inférieure à une certaine valeur* ; il faut que cette valeur fasse l'objet d'un consensus national ou mieux européen ; c'est la seule définition qui permet l'action et qui est donc utilisée dans la plupart des secteurs industriels.

2.2) Risque acceptable ou risque tolérable

Un risque est acceptable si, pour tous les besoins de la vie et du travail, la société est prête à le prendre en compte, sans efforts, sans contrôle, sans suivi et sans mesures de prévention – protection. **Un risque acceptable est un risque d'emblée accepté.**

Selon Chateaufort (2013), il est plus clair de définir le risque inacceptable (et par complément le risque acceptable). Le risque inacceptable est le risque pour lequel la société ou le décideur sont prêts à mettre les moyens pour réussir.

Dans la réalité, le risque n'est que rarement acceptable et des efforts techniques, financiers, de communication sont nécessaires, même indispensables pour que le risque devienne accepté. On est alors en présence du **risque tolérable**, qui est un **risque accepté dans un contexte donné fondé sur les valeurs courantes de la société** (HSE, 1992 ; IEC 61508,2000). Le risque est tolérable si :

- la société est prête à vivre avec ce risque, sachant qu'elle en retirera des bénéfices,
- la société considère que le risque n'est pas négligeable et qu'il ne faut donc pas l'ignorer,
- la société pense que le risque est géré de façon rigoureuse ; elle a confiance dans la gestion du risque,
- tous les efforts ont été faits pour réduire le risque à un niveau « raisonnable », accepté par les porteurs d'enjeux, donc acceptable.

HSE définit le risque tolérable ainsi: *“as indicating a willingness to live with a risk so as to secure certain benefits in the confidence that the risk is one that is worth taking and that it is being properly controlled”* (HSE, 1999).

Desroches et al (2006) insistent aussi sur ce point : le risque tolérable est un risque acceptable sous certaines conditions de contrôle et de sécurité.

Dans le langage courant, on confond souvent (toujours) risque acceptable et risque tolérable. Le plus souvent, lorsqu'on parle de risque acceptable, on pense au risque tolérable, car effectivement le risque estimé lors de la phase 2 de l'analyse de risque (paragraphe 3.2) est analysé et réduit par des mesures de prévention – protection, de telle sorte qu'il respecte les critères probabilistes ou déterministes d'acceptation. Le risque devient alors tolérable. Il est accepté donc acceptable.

2.3) En conclusion...

En conclusion de ce court survol, on peut dire que le risque acceptable nécessite la définition et la connaissance de critères justifiés d'acceptabilité qui seront le plus souvent des critères probabilistes liés à la vie courante ou liés à des objectifs de sûreté de fonctionnement ou liés à des critères probabilistes issus de la réglementation. Mais il est clair aussi que ces critères seront le fruit d'un compromis entre tous les porteurs d'enjeux (politiques de l'état ou de la région, autorités réglementaires, ingénieurs, chercheurs, économistes, experts de la maîtrise des risques, public, associations..). La notion de risque acceptable et la définition d'un critère d'acceptabilité sont de notre point de vue le préalable indispensable à une approche objective de la sécurité- sûreté dans l'analyse de risque.

La préoccupation du risque acceptable n'est pas nouvelle. Elle commence, il y a 4000 ans environ, avec le code du roi Hammurabi, de Babylone, qui prend en considération la sûreté des structures : le constructeur est clairement désigné responsable, et il est mis à mort en cas de ruine de la construction. Cette réglementation, plutôt abrupte, a néanmoins permis une certaine fiabilité des structures de génie civil. A la même époque, les habitants des Cyclades testent une forme et une géométrie d'habitat permettant la survie lors d'un séisme ou d'une éruption volcanique (musée archéologique de Milos). Au Moyen-Âge, la tenue des structures est assurée par comparaison aux structures existantes et en testant les innovations. Au XVIIIème siècle Buffon effectue les premiers essais de tenue et de fiabilité sur des poutres en bois (Buffon, 1776). Au XIXème siècle est introduite la notion de coefficient de sécurité à la suite du développement de l'utilisation de structures métalliques. Sir Alfred Grenville Pugsley (1903-1998), ingénieur, dans ses travaux publiés juste avant la seconde

guerre mondiale par l'*Aeronautical Research Council* de Londres, demande que le taux d'accident d'un avion « en considérant toutes les causes de pannes susceptibles d'entraîner un accident » ne puisse dépasser 10^{-5} par heure, dont 10^{-7} par heure pour les causes liées à la structure de l'avion. Il s'agit d'un des premiers objectifs quantifiés de risque. C'est après la seconde guerre mondiale que l'on trouve les premiers travaux dans le domaine de la mécanique des structures et de l'incertain, avec A.M. Freudenthal. Les approches probabilistes du risque commencent avec la première évaluation probabiliste de sûreté (EPS ou PRA, *Probabilistic Risk Assessment*), le rapport Wash 1400, publié en 1975, et continue avec la publication de l'étude du site de Canvey Island en 1978. Une large documentation technique existe maintenant sur ce sujet.

3) La démarche d'analyse de risque et l'acceptation

3.1) Risque et incertitude

Des définitions normatives du risque ont été précisées dans les années très récentes (Lannoy, 2012) :

- celle de l'ISO IEC guide 73 (première édition en 2002, révision en 2009) : **combinaison de la probabilité d'un évènement et de ses conséquences** ; cette définition est directement issue de la définition de Daniel Bernoulli en 1738 ;
- celle toute récente de l'ISO 31000 (2009) : **effet de l'incertitude sur l'atteinte des objectifs.**

La seconde définition montre qu'il convient de définir des objectifs précis et partagés, le risque peut alors être une menace comme une opportunité. Les deux définitions normatives sont cohérentes.

L'incertitude disparaît lorsque nous sommes certains. L'effet de l'incertitude sur les objectifs peut être un écart (positif ou négatif) par rapport à la valeur attendue.

L'incertitude est liée au futur: on cherche à la mesurer; elle est souvent difficile à évaluer faute de données passées fiables et représentatives, permettant de définir la probabilité d'occurrence d'un évènement redouté futur. Elle est également difficile à évaluer parce que les conditions d'environnement – exploitation – maintenance sont aussi difficile à prévoir.

La probabilité d'occurrence va mesurer la chance de l'occurrence d'un évènement redouté:

- soit une fréquence relative fondée sur l'observation et l'interprétation du retour d'expérience historique,

- soit une probabilité fondée sur les connaissances (dont le retour d'expérience) et l'expertise (*judgement/ knowledge based probability*).

L'incertitude a quatre composantes :

- la variabilité, ou l'incertitude aléatoire :

.dans le temps (variabilité d'une température...),

.dans l'espace (variabilité d'une résistance à la rupture, ...),

.due à la mesure (performances des moyens de mesure, ...);

- le manque de connaissances, ou l'incertitude de l'épistémè :

.statistique (taille d'échantillon ...),

.sur la nature de la distribution (choix subjectif),

.sur la nature du modèle (compréhension physique insuffisante, propagation des incertitudes, ...);

(ces deux composantes étant les plus communes, la première étant souvent prise en compte dans de nombreux domaines)

- l'ambiguïté (elle peut être supprimée par une information précise, adaptée),

- l'indétermination,

(ces deux dernières composantes étant bien souvent « oubliées » dans l'analyse).

Cette définition par la norme ISO 31000 présente deux inconvénients :

- parler d'incertitude est une source de peur, peur de ne plus comprendre, peur de perdre la maîtrise,

- le mot incertitude entretient une confusion entre anticipation – prévision et spéculation.

Dans son glossaire, l'IAEA (2007) donne la définition suivante du risque: « *a multi attribute quantity expressing hazard, danger or chance of harmful or injurious consequences associated with actual or potential exposures ; it relates to quantities such as the probability that specific deleterious consequences may arise and the magnitude and character of such consequences* ».

3.2) L'analyse de risque

Une analyse de risque tente de répondre aux questions suivantes (Bedford, Cooke, 2001 ; Lannoy, 2012):

- que peut-il arriver?
- quelle est la probabilité d'occurrence?
- si cela se produit, quelles sont les conséquences?

La norme ISO 31000 (2009) porte sur les axes d'amélioration de la gestion des risques à travers la stratégie, la gouvernance d'entreprise et la culture de l'entreprise.

Avant toute analyse de risque, il convient au préalable d'établir le contexte (ISO 31000, article 5, 5.3) à savoir : l'inventaire des objets, des activités, des produits et de leurs dangers intrinsèques, les objectifs, leur utilité et les valeurs qu'il convient de protéger (l'environnement, la santé du public, la sécurité – sûreté, ...). Une étape de communication et de concertation est nécessaire pour toutes les étapes du processus (5.2).

Précisons qu'un risque naturel est associé à un événement redouté naturel dont l'apparition est indépendante de la volonté de l'homme. Les conséquences du risque naturel sont fortement liées à la vulnérabilité (voir ci-dessous) et à l'activité humaine (concentration de la population, nature des constructions, résistance, ...).

Quatre phases constituent l'analyse de risque.

- **Phase 1- Identification du risque** (ISO 31000, 5.4.2)

Cette phase comprend la description du contexte, la compréhension physique, l'attention portée sur les facteurs de risque (les causes) et sur les cibles (la vulnérabilité).

La vulnérabilité peut être définie comme un degré de fragilité d'une société face au risque. La vulnérabilité dépend donc de la capacité de résistance et de résilience à l'aléa. Le risque n'existe que s'il y a exposition de personnes, de biens et de l'environnement vulnérables à cet aléa. La vulnérabilité est donc la susceptibilité à des pertes potentielles, elle traduit la résistance ou la **résilience** aux aléas. Les facteurs clés de la vulnérabilité sont (en vrac): la densité de population et la croissance démographique, les infrastructures et les réseaux, l'accès aux ressources (médicales, eau, financières, ...), le niveau d'éducation,

d'information et de connaissances, les conditions socio-économiques, le niveau de perception du risque, ... De la vulnérabilité dépend le niveau de criticité du risque.

– **Phase 2 - Analyse du risque (5.4.3), évaluation du risque (5.4.4)**

Cette phase cherche à estimer et à hiérarchiser les risques. Cette phase est très importante car elle examine l'effet de l'incertitude sur l'homme, l'environnement et le site industriel. La démarche est d'abord qualitative puis quantitative (caractérisation probabiliste et déterministe; modélisation physico- probabiliste). Il s'agit de quantifier les impacts de l'incertitude dans ses quatre composantes.

Ayant quantifié les risques, il est possible de les hiérarchiser et de juger de leur criticité. L'évaluation se fait par rapport à un critère d'acceptation du risque.

Le grand intérêt de cette phase réside dans la prise en compte probabiliste des phénomènes, ce qui permet d'estimer des effets plus proches de la réalité industrielle que la seule prise en compte d'un résultat déterministe.

Pour certains, l'approche probabiliste semble vouée à l'échec dès lors que l'on s'intéresse à des événements extrêmes de fréquence faible et de gravité importante, parce que l'estimation de la probabilité se fait plutôt de façon subjective. Le refus de calculer cette probabilité cependant peut mener à des comportements irrationnels.

L'évaluation des performances et de la sécurité – sûreté lors de cette phase passe par l'utilisation des démarches, méthodes et outils de la sûreté de fonctionnement. Ces performances sont dites prévues lorsqu'on est en phase de conception ou de prolongation d'exploitation, elles sont dites mesurées lorsqu'on se situe en phase d'exploitation.

– **Phase 3 - Traitement du risque (les parades) (5.5)**

L'un des objectifs est la réduction des risques, si le risque est négatif.

Dans un premier temps, on imagine les mesures ou les options de maîtrise des risques (sur l'occurrence des causes (*prévention*) ou la gravité des conséquences (*protection*)). Ces options, ces barrières sont évaluées au sens de l'efficacité et de l'efficacité (évaluation prévisionnelle). Une analyse coûts – bénéfices ou l'optimisation d'un critère spécifique, par exemple économique) est réalisée. Des critères d'acceptation ont été préalablement définis. Ces critères sont une notion rarement réglementée, bien souvent subjective, dépendant du contexte socio-

économique, des attitudes propres à la personne ou à l'organisation.

Dans un second temps, le décideur effectue une revue du processus d'analyse (en examinant notamment la pertinence de l'information et des hypothèses, la rigueur de la démarche, la robustesse du modèle, l'évaluation des incertitudes, l'analyse de sensibilité). Cette analyse managériale implique des jugements de valeur et conduit à une prise de décision dite *risk informed*, décision qui devra faire l'objet d'une information et d'une communication tant interne à l'entreprise qu'externe (ISO 31000, 5.2). Bien souvent les mesures décidées seront un compromis entre les coûts et les options de prévention / protection.

Le risque résiduel sera couvert par l'assurance ou l'auto-assurance.

Ces phases 2 et 3 correspondent à l'appréciation du risque de la norme ISO 31000 (5.4).

Lorsqu'on veut éviter ou réduire ou transférer un risque, des dispositions de type préventif sont définies lors de cette phase 3:

- en phase de conception: plus les mesures seront considérées en amont, rapides et efficaces, plus la mise en œuvre et la conception seront optimales au sens technico – économique, les impacts sont principalement liés à l'architecture des systèmes, au choix des technologies, à la fiabilité des systèmes, structures et composants,
- en exploitation : la maintenance préventive joue un rôle fondamental ; le retour d'expérience, la conformité aux référentiels et la gestion de crise sont aussi des éléments essentiels.

– **Phase 4 - Surveillance et revue (5.6)**

C'est une phase managériale correspondant au suivi des actions, à la revue et au contrôle des actions, au recueil, à l'analyse et à l'interprétation du retour d'expérience. Il s'agit notamment de suivre les faits techniques et les incidents, de juger des mesures préventives et correctives adoptées lors de la phase 3 (leur efficacité et leur efficacité opérationnelles), de mémoriser les bonnes pratiques pour les conception et exploitation futures).

A noter que cette phase 4 est trop souvent ignorée : non suivi des actions décidées, absence d'un retour d'expérience, aucune évaluation de l'efficacité des options de prévention ou de protection.

En conclusion, l'analyse de risque se doit de recenser tous les dangers, de

présenter des résultats compréhensibles et robustes, de s'assurer de la qualité des données, des démarches et des modèles et de l'analyse des incertitudes existantes. Cependant, le plus souvent, une installation, un produit, ... sont dits sûrs, s'ils sont perçus comme étant sûrs.

Dans de nombreux pays, notamment dans les pays anglo - saxons, les démarches de gestion des risques industriels sont fondées sur des approches probabilistes.

En France, l'approche déterministe où les systèmes socio- techniques sont conçus et exploités par rapport à des accidents de référence, l'approche de la gestion des risques est plutôt déterministe, fondée sur l'analyse des conséquences. Toutefois, les pppt (plans de prévention des risques technologiques) recommandent l'utilisation d'une matrice de criticité, semi-quantitative, outil de décision « *risk based* » à la fois pour de nouvelles installations ou pour des modifications d'installations existantes par des mesures de réduction des risques. On considère donc l'approche probabiliste comme un complément fondamental pour la sécurité – sûreté. Le récent arrêté du 07 février 2012, relatif aux installations nucléaires de base, est un bon exemple de recommandation administrative pour une démarche déterministe et probabiliste d'analyse de risque et pour le management de la sûreté.

3.3 Analyse de risque et critère d'acceptation

L'analyse de risque est un outil essentiel pour estimer l'amplitude du risque, à savoir sa probabilité d'occurrence et le niveau des conséquences.

Etape 1

A cet instant, l'analyste va comparer la probabilité estimée à la probabilité limite acceptable (dans le cas d'une structure, il compare la probabilité de défaillance de la structure à l'objectif cible de fiabilité de cette structure (paragraphe 3.2 et tableau 1).

Soit cette probabilité de défaillance est bien inférieure à l'objectif, auquel cas l'analyste passe à l'étape 2.

Sinon l'analyste doit imaginer toutes les options de prévention et de protection possibles (par exemple le renforcement d'une structure, la construction d'un merlon, ...) pouvant ramener le couple (probabilité, conséquences) à l'objectif cible, puis il doit estimer chacune de ces options jusqu'à mettre en évidence le meilleur compromis respectant l'objectif cible de fiabilité. On se situe donc en

recherche du risque tolérable.

Etape 2

L'analyse n'est cependant pas terminée.

L'analyste fournit son analyse de risque (qui est un outil d'aide à la décision indispensable) au décideur. L'analyste doit spécifier la confiance qu'il a dans les résultats de son analyse (notamment vis-à-vis des hypothèses, des données d'entrée et du modèle utilisé).

Le risque n'est pas qu'une estimation prévisionnelle conduisant à une décision automatique. L'incertitude étant la principale composante du risque, l'analyste s'attachera donc à présenter et à évaluer toutes les incertitudes de son estimation. Les facteurs les plus influents ont été mis en évidence par l'étude.

Le décideur doit compléter cette analyse de risque :

- par une étude technico-économique des options possibles respectant l'objectif cible de fiabilité, en premier lieu, par exemple, par une maximisation de l'utilité espérée et des performances,
- par une phase de concertation et de communication avec les porteurs d'enjeux,
- par une revue des résultats précédents et une décision managériale.

Disposer d'un critère probabiliste d'acceptation du risque est fondamental, mais ne suffit pas.

4) L'approche statistique ou l'approche épidémiologique

Une approche peut être menée à partir de statistiques globales qui permettent d'exprimer des niveaux de risques relatifs à divers types d'activités. L'idée est de comparer tous les risques liés à la vie, les activités et les accidents de la vie courante, le risque naturel, le risque technologique. Cette démarche a déjà été adoptée par (Dechy, Bouissou, 2006). Les sociétés d'assurances utilisent de telles données pour leur activité. A partir des tableaux statistiques publiés par de grands organismes (INSEE, INSERM, INRS, ...), il est possible de calculer un risque de décès lié à une activité quelconque, quelle que soit cette activité. Ces statistiques établies à l'échelle de la population (ici française) peuvent donner une indication moyenne des risques encourus dans la pratique de cette activité. Le tableau 3 regroupe les résultats obtenus. Sous l'hypothèse que

chaque individu fait des choix raisonnables, on peut considérer que ces valeurs correspondent aux niveaux de risques « acceptés » individuellement.

Plusieurs calculs sont possibles :

- le nombre annuel de morts : on divise le nombre de morts enregistrées dans l'année pour une cause j par la population,
- l'espérance de perte de vie (une notion analogue au taux de défaillance d'un équipement), que l'on peut définir par :

nombre de personnes mourant à l'âge $(i+1)$ / population d'âge i ,

pour la cause j ,

nombre de personnes d'âge i mortes à cause de j / population d'âge i ;

- le taux de perte de vie spécifique à une cause, défini par :

nombre de mort dus à la cause j /

nombre d'heures passées lors de la cause j

(voir exemple du tableau 6).

Deux probabilités sont essentielles :

- **la probabilité individuelle de décès d'une personne**, que l'on évalue à 10^{-6} / heure, ou $8.76 \cdot 10^{-3}$ /an, ce qui correspond à une durée de vie de 114 ans, sous l'hypothèse exponentielle,
- **la probabilité de perdre la vie à la suite d'un risque naturel** ; en France, dans le cas du séisme important (cas des Antilles), cette probabilité est de l'ordre de $0.08 \cdot (2/11)$ / an = 0.015 /an = $1.7 \cdot 10^{-6}$ / heure (voir tableaux 4 et 5).

En effet, une fréquence (taux de mortalité dû à un risque) supérieure à la première probabilité situe le risque dans une zone inacceptable, tandis qu'une fréquence inférieure à la seconde probabilité le suppose négligeable. Entre ces deux probabilités, tout dépend des bénéfices liés au risque. La frontière entre les zones acceptable / non acceptable se situe dans la zone comprise entre les deux probabilités.

Dans le cas des Antilles, ces deux probabilités sont du même ordre de grandeur.

La figure 1 (extraite d'un blog, année non précisée), synthétise ces définitions en plaçant quelques repères, depuis les risques qualifiés d'insignifiants, jusqu'aux risques qualifiés d'élevés.

	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²
liés aux ouvrages	rupture 0.1	incendies 4				
catastrophes naturelles	tornade 0.4 foudre 0.5	séismes 2				
accidents divers			noyades 30 chutes 90	route 150 à 300	hélicoptère 5000	
accidents du travail			industries chimiques 85	industries de construction 1 30-150 mines 750	pétrole offshore 1650	
pratiques à risque					tabagisme 1000 à 3600	
sports			spéléologie 45 chasse 70	ski de randonnée 150 plongée 420	varappe en rocher 1500 à 2000 parachute 1900	
toutes causes confondues				à l'âge de 30 ans 600-1000		ensemble de la population 12000

Figure 1. Probabilités de décès attachés à différentes sources de danger (valeurs du tableau exprimées en 10⁻⁶/heure, année non précisée).

Ces analyses statistiques sont considérées comme permettant de quantifier un risque acceptable. En effet, si le niveau de risque n'est pas jugé acceptable par les citoyens, alors les règles de sécurité, les modes de pratique, les procédures de contrôle, et l'ensemble des moyens de rétroaction que la société est en mesure de mettre en place, évolueraient pour modifier ces chiffres.

On peut constater que plusieurs ordres de grandeurs séparent les risques provoqués par les catastrophes naturelles ou les ouvrages (de l'ordre de 10⁻⁶/an) de ceux causés par les accidents individuels (de l'ordre de 10⁻⁴/an) et de ceux liés à des pratiques individuelles dites « à risque » (de l'ordre de 10⁻³/an).

On peut affirmer que l'opinion publique n'a pas conscience de ces niveaux. Des risques importants (tabagisme, alcool, accidents automobiles, ...) sont acceptés. D'autres risques importants (comme les accidents domestiques, les chutes, ...) sont méconnus. Des risques au faible impact (comme ceux liés aux installations industrielles...) sont très faibles mais ne sont pas acceptés et même, l'opinion publique fait pression sur les autorités pour les réduire, les refuser. Il y a donc comme on l'a vu précédemment une grande incohérence, probablement due à un manque d'information.

Tableau 3 – Pertes en vies humaines en France.

Item	Décès	Année ou période	Observations
Population	65350000	2012	
Naissances	823394	2011	
Décès	542575	2008	
Maladies cardiovasculaires	140000	2006	
Cancer	159244	2009	
Cancer au poumon	26500	2011	25000 dues au tabac
Cancer du sein	11500	2011	
Cancer de la prostate	9200	2011	
Tabagisme	66000	2011	Direct et indirect
Alcool	22177	2002	
Drogues	3650	2011	
Sida	327	2011	
Accidents domestiques	19703	2008	Total, forte dépendance avec l'âge
Chutes	9412	2008	Forte dépendance avec l'âge (personnes âgées)
Asphyxies	2999	2008	
Violences conjugales	122	2011	Envers les femmes
Noyades accidentelles	462	2009	Forte dépendance avec l'âge (jeunes)
Chasse	42	2011	
Ski	45	2010-2011 (saison)	Toutes activités de ski confondues (7.7 millions de pratiquants)
Pollution de l'air	31600	2011	10 années de vie perdues selon ADEME
Accidents du travail	552	2011	$3.2 \cdot 10^{-5}$ / salarié
Accidents de trajet	945	2011	
Maladies professionnelles	570	2011	
Amiante	1533	2011	
Catastrophes naturelles	≈ 313 / an	1900- 2007	Fréquence en France : 1.05 /an (tableau 2) Au XXème siècle, 4 désastres (30292 victime), 28 catastrophes (997) *
Séismes	?	1900-2007	Fréquence en France : 0.08/an (tableau 2)
Avalanches	?	1970-2010	3 avalanches dévastatrices : Val d'Isère (1970, 39 morts), Chamonix (1978, 5 et 1999, 12)

Canicule	≈ 700 / an*	1976-2005	1976, 2003 ; valeur moyennée
Froid intense	≈ 450 / an*	1985-2005	
Sécurité routière	4275/an	2008	0.64 / 10 ⁸ (passagers x km)
Accidents ferroviaires	46/an	2003 *	1988, Gare de Lyon, 56 victimes 0.2 / 10 ⁸ (passagers x km)
Accidents de vélomoteur	?	2008	13.8 / 10 ⁸ (passagers x km)
Accidents aériens	≈ 472/ an	1999-2008	Statistique mondiale (370 accidents) 0.2 / 10 ⁸ (passagers x km)
Accidents maritimes	- *	1987,1994	Herald of Free Enterprise(193victimes), Estonia (852).
Accidents sur « pipes »	< 1/an	1975-2005	
Rupture de barrage	-	1895, 1959	Bouzet, Malpasset
Incident nucléaire	-	1956-2011	2 incidents classés 3, 4 par l'échelle INES (Saint-Laurent)
Installations fixes	Entre 9 et 64*	1989-2001	La Mède (1992, 6victimes), AZF Toulouse (2001, 30)
Transport ferroviaire de matières dangereuses	-	1971-2005	Pas de victimes

* (Dechy, Bouissou, 2006)

Tableau 4 – Les événements naturels dommageables en France : fréquence d'occurrence moyenne sur la période 1900 à 2007

Aléa naturel	Nombre d'évènements de classe 3 ou plus	Fréquence d'occurrence (/an)
Inondations	51	0.47
Cyclones ou tempêtes	27	0.25
Mouvements de terrains	10	0.09
Séismes	9	0.08/an * (9.5 10 ⁻⁶ / heure)
Avalanches	8	0.07
Feux de forêt	3	0.03
Canicules	2	0.02
Eruptions volcaniques	2	0.02
Raz de marée	1	0.01
Total	113	1.05/ an (1.2 10 ⁻⁴ / heure)

* Intervalle de confiance à 90% : [0.04 /an, 0.145 / an],

[4.9 10⁻⁶/heure , 16. 10⁻⁶ /heure].

Tableau 5 - Répartition régionale des séismes d'intensité supérieure à 3.5 observés de 2000 à 2012.

Région	Effectif	Gravité moyenne observée: échelle de	Dommages
---------------	-----------------	---	-----------------

		Richter	
Antilles	2	6.9	Légers dommages aux bâtiments bien construits mais peut causer des dommages sérieux à d'autres bâtisses
Provence	1	4.9	Souvent ressenti mais sans dommage
Alsace	3	4.8	Id
Autres régions	5	4.2	Id
Total	11	-	-

Le tableau 4 répertorie les principales catastrophes naturelles en France. Les valeurs de fréquence sont des valeurs moyennées. Or les catastrophes naturelles ont un impact bien spécifique en termes de lieu géographique en particulier. Par exemple, pour le séisme, utiliser ces valeurs pour les Antilles, le sud de l'Alsace ou la Provence est certainement optimiste, alors que ce serait pessimiste pour les autres régions françaises. De plus ces statistiques peuvent se trouver modifiées dans les prochaines années avec le problème du réchauffement climatique : on peut penser que le nombre d'inondations, de canicules, de tempêtes va croître.

Les accidents technologiques sont les événements qui ont le plus faible impact sur la perte de vies humaines et la santé.

L'intérêt principal de cette approche statistique est de reposer sur des faits objectifs historiques. Encore faut-il que le retour d'expérience historique ait été objectivement collecté et analysé.

Cette analyse du retour d'expérience historique est difficile car de nombreux facteurs influent sur les pertes de vies humaines : la démographie, l'âge, la résilience sociale, le réchauffement climatique, la maturité technologique, les ressources disponibles, la gestion de crise, l'impact sur l'environnement, pour ne citer que les facteurs qui viennent directement à l'esprit.

Tableau 6 – Taux horaires de perte de vie

(tableau extrait de (Bedford, Cooke, 2001)).

Cause	Fréquence horaire de perte de vie
Peste de Londres, 1665	$1.5 \cdot 10^{-4}$
Chute de pierres	$4 \cdot 10^{-5}$
Raids aériens, Londres, 1940	$2 \cdot 10^{-6}$
Voyage en avion	$7 \cdot 10^{-7}$
Voyage en voiture	10^{-7}
Bicyclette	10^{-6}

Accidents dans les mines de charbon	$3. 10^{-7}$
Vie courante (US)	$1.03 10^{-6}$

Tableau 7 - Comparaison de différents risques (COST 345, 2004)

<i>Activity</i>	<i>Death rate (10^{-9} /hour exposure)</i>	<i>Typical exposure</i>	<i>Typical risk of death (10^{-6} / year)</i>
<i>Alpine climbing</i>	<i>30000-40000</i>	<i>50</i>	<i>1500-2000</i>
<i>Boating</i>	<i>1500</i>	<i>80</i>	<i>120</i>
<i>Swimming</i>	<i>3500</i>	<i>50</i>	<i>170</i>
<i>Cigarette smoking</i>	<i>2500</i>	<i>400</i>	<i>1000</i>
<i>Air travel</i>	<i>1200</i>	<i>20</i>	<i>24</i>
<i>Car travel</i>	<i>700</i>	<i>300</i>	<i>200</i>
<i>Construction work</i>	<i>70-200</i>	<i>2200</i>	<i>150-440</i>
<i>Manufacturing</i>	<i>20</i>	<i>2000</i>	<i>40</i>
<i>Building fires</i>	<i>1-3</i>	<i>8000</i>	<i>8-24</i>
<i>Structural failures</i>	<i>0.02</i>	<i>6000</i>	<i>0.1</i>

5) L'analyse du retour d'expérience des défaillances de structures

Une structure se dégrade graduellement et irréversiblement au cours de son service.

La structure est abandonnée après défaillance de la structure ou lorsque l'état limite de service tend à devenir ultime ou lorsque les coûts technico – économiques du cycle de vie deviennent prohibitifs compte tenu du vieillissement ou à la suite de l'abandon de son exploitation généralement pour des raisons de défaillance organisationnelle.

Les conséquences d'une défaillance de structure sont généralement graves : atteinte à la vie humaine et à l'environnement (pollution, rejets, dispersion de gaz, ...), pertes économiques, conséquences financières (remise en état – rénovation ou destruction – nouvelle construction), atteinte à l'image de marque du constructeur, de l'exploitant, de l'autorité réglementaire...

Dans le cas du séisme, il faut se protéger du mouvement du sol qui va dépendre de la région géographique, de la fonction de la structure, de l'objectif recherché, de la nature du sol. Généralement on vise la sauvegarde des vies humaines et le maintien des fonctions de bâtiments importants comme les hôpitaux, les tours de contrôle des aéroports, les centrales nucléaires, les barrages, les ponts, ... d'une façon générale les bâtiments recevant du public ou les structures critiques de

l'industrie ou des transports. Rappelons que les nouvelles structures sont dimensionnées au séisme selon la réglementation européenne Eurocode 8.

Il est important d'identifier les structures les plus vulnérables au séisme et pour ces structures vulnérables d'identifier les éléments de structures les plus sensibles, les plus critiques. Une méthode de type OMF (Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité) appliquée aux structures existantes peut être recommandée. Elle permettrait d'identifier, hiérarchiser les éléments de structures les plus critiques vis-à-vis du séisme et donc d'adapter au juste besoin et d'optimiser les mesures de prévention – protection, comme le renforcement de structures existantes (figure 2 ; (Jacquot et al, 1994 ; Bryla et al, 1997)).

Le tableau 8 donne des valeurs moyennes de fréquences de rupture de structures considérées acceptables, courantes dans l'industrie. Ces fréquences sont estimées à partir d'un retour d'expérience historique. Ces fréquences peuvent servir d'indicateurs de comparaison pour le choix d'une valeur cible. Ces valeurs peuvent aussi servir de valeurs a priori dans la cadre d'une démarche bayésienne. Elles peuvent être utilisées dans des évaluations probabilistes de sûreté ou dans des études de danger.

Les critères de choix d'une fiabilité cible pour une structure vont dépendre d'un grand nombre de facteurs :

- des conséquences d'un éventuel accident : atteinte à la vie, dommage à l'environnement, pertes économiques, impact médiatique,
- des efforts (techniques et financiers) nécessaires pour diminuer le risque de défaillance,
- de la phase du cycle de vie de la structure : conception, exploitation, extension de la durée d'exploitation,
- de la durabilité envisagée et du profil de fonctionnement de la structure,
- du scénario de défaillance : corrosion, fatigue, flambage, choc, ...
- de la nature de la défaillance et du mode de défaillance,
- de la variabilité des paramètres importants pour la tenue de la structure : répartition des défauts, distribution des chargements, cinétique de dégradation, conditions environnementales, résistance.

Les collectes et analyses du retour d'expérience historique sont à encourager. Elles permettraient de mieux identifier les scénarii de défaillance, les causes et de mieux apprécier les coûts de non sûreté.

Tableau 8 - Quelques valeurs de fréquence de défaillance (catastrophique) de structures, estimée à partir du retour d'expérience historique.

Structure	Fréquence moyenne de défaillance (x 10⁶ heures de service)	Intervalle de confiance à 90% (x 10⁶ heures de service)
Section droite de tuyauterie métallique (1)	0.027 / km	0.0005, 0.1040
Tuyauterie (4), <i>valeur médiane générique</i>	0.100 /km	37. , 750.
Pipelines (1)	0.442/ km	0.0074, 1.7100
Pipelines <460 mm (2)	0.075 / km	
Récepteur métallique à la pression atmosphérique (1)	0.985	0.127, 3.020
Récepteur sous pression (1)	0.0109	0.0002, 0.0424
Réservoir (5)	0.97	
Gazoduc de gaz naturel (1997-2001) (3)	0.024 / km	
Gazoduc de gaz naturel <150mm (2)	0.035 / km	
Gazoduc de gaz liquéfié < 460mm (2)	0.05 /km	
Eolienne (2008)	0.445	
Réacteur nucléaire (tout type de réacteur) (2011) (6)	0.031	0.010, 0.070
Réacteur nucléaire PWR – REP (2011) (6)	0.012	0.006, 0.059
Grands barrages (2001)	0.0016	
Tout barrage (1999)	0.057	
Ponts autoroutiers (2001)	0.034	
Ponts et bâtiments (2001)	0.0011	

- (1) American Institute of Mechanical Engineers, 1989
- (2) EDF R&D, 1967-1982, 1984. Observations en France
- (3) 5th EGIC Report 1970-2001, décembre 2002, valeurs européennes
- (4) RMC reliability data handbook, February 1991.
- (5) EG&G, Idaho National Engineering Laboratory, February 1990.
- (6) Valeur moyenne estimée au 31/12/2011 (monde)

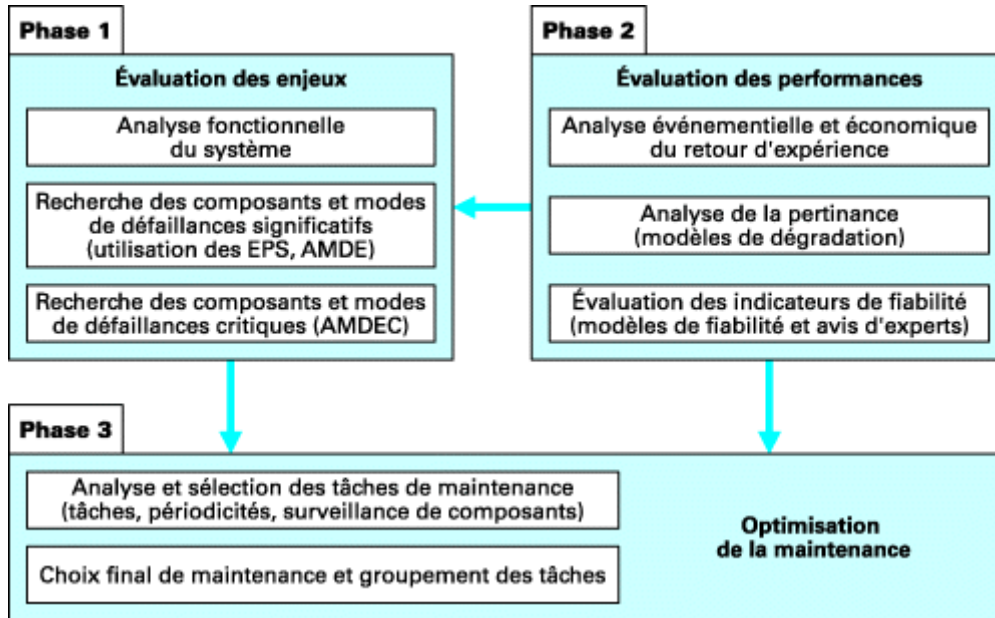


Figure 2 – La méthode OMF appliquée aux structures.

6) Les courbes de Farmer

On peut définir un risque individuel par la probabilité qu'une personne sans protection décède à la suite d'une activité dangereuse ou d'un risque naturel par :

$$\text{risque individuel } (x, y) = Pf \times Pdf,$$

où Pf est la probabilité de défaillance dans le cadre de cette activité et Pdf est la probabilité de décès d'un individu, placé à une certaine distance (x, y) de l'activité, sachant qu'une défaillance s'est produite.

Si l'on connaît le nombre de maisons $h(x, y)$ à la distance (x, y) , le risque agrégé s'écrit :

$$\text{risque agrégé} = \iint \text{risque individuel } (x, y) \cdot h(x, y) \, dx \, dy.$$

Si A est l'aire sur laquelle on veut déterminer le nombre de décès (*number of fatalities*) et si $m(x, y)$ est la densité de population à la distance (x, y) , le nombre de décès s'écrit :

$$E(N) = \iint \text{risque individuel } (x, y) \cdot m(x, y) \cdot dx \, dy,$$

sur l'aire A .

Le risque est représenté par une courbe dite fC, fréquence – conséquences, montrant à la fois les évènements peu probables aux fortes conséquences et les évènements fréquents aux faibles conséquences. Cette notion a été introduite par Farmer en 1967 à propos de rejets d'iode 131 des réacteurs nucléaires. On trouve donc des courbes fC (*frequency – consequences*) et des courbes FN (*frequency - number of fatalities*) tracées dans un diagramme log - log. Ce diagramme est tracé lors de la plupart des analyses de risques pour son caractère simple et informatif.

Ces courbes permettent de distinguer trois zones : risque négligeable, risque acceptable et risque inacceptable. Le risque peut donc être refusé ou réduit (par exemple selon le principe ALARA - ALARP, *as low as reasonably achievable-practicable*) (paragraphe 8.5).

On utilise généralement une courbe de la forme arbitraire

$$F \leq \alpha \cdot N^{-b},$$

qui délimite la région acceptable.

α et b sont des constantes, choisies de telle sorte que la courbe enveloppe la plupart des catastrophes naturelles et les agressions les plus courantes liées à l'activité humaine.

Dans le cas des structures, on peut prendre α variant de 10^{-6} à 10^{-4} . $b = 1$ exprime la neutralité vis-à-vis du risque. $b < 1$ au contraire correspond à des conséquences très importantes en termes de vies humaines et de coûts, ce cas n'est donc pas acceptable.

Une autre possibilité d'utilisation de la courbe est de prendre en compte la variabilité de N , avec un critère :

$$E(N) + 3 \sigma(N) \leq 100 a.$$

Le facteur a est un facteur empirique, prenant en compte l'acceptation sociétale. Il serait égal à 10 pour des activités d'alpinisme et au contraire de 0.01 pour une activité industrielle sans bénéfices évidents. Pour le calcul d'un risque acceptable, la valeur 3 est recommandée par comparaison avec des activités existantes.

Les courbes fC et FN sont des estimations. Dans un cadre bayésien, il doit être possible d'explicitier l'incertitude de ces estimations et de la prendre en compte.

7) La comparaison avec les codes et règlements existants

Les tableaux qui suivent (tableaux 9 à 16) sont extraits de la documentation technique (par exemple de (Chateauneuf, Ardillon, 2012 ; Det Norske Veritas, 2010; Diamantidis, Holicky et al, 2012) ou issus de groupes de travail internationaux. Ces tableaux ont été construits à partir de l'examen des structures existantes considérées acceptables (paragraphe 5 et 8.4) et aussi en combinant les différentes approches présentées au paragraphe 8 dans de nombreuses études. Les valeurs proposées concernent soit les conséquences possibles d'une défaillance, soit la période de durée de vie horizon (ou période de référence, souvent une seule année est considérée dans les recommandations). Deux cas sont à considérer : le dimensionnement en phase de conception et le cas des structures existantes.

7.1) Les critères préconisés dans les différentes normes et recommandations

Les industries dangereuses et les transports ont définis des critères probabilistes d'acceptation des risques, relatifs aux conséquences des défaillances de structures.

Les tableaux 9 concernent les structures marines et l'offshore. Dans la recommandation du JCSS 2000 (tableau 10, 1 an pour la période de référence), l'indice de fiabilité cible dépend des conséquences de la défaillance et des coûts de sécurité – sûreté (de façon analogue à la norme ISO 2394). Dans la norme ISO / CD 13822 (tableau 11), la fiabilité cible dépend principalement du type d'état limite, des conséquences de la défaillance et des coûts des mesures de sécurité - sûreté. En ce qui concerne la norme ISO 2394 (tableau 12), la fiabilité cible va dépendre des conséquences et des coûts des mesures de sécurité – sûreté. Pour l'Eurocode 1(1993) (tableau 13), la fiabilité cible dépend uniquement de l'état limite. On ne précise aucune période de référence. Dans le cas de la recommandation NBK (tableau 14), la fiabilité cible dépend du type de défaillance et des conséquences. La norme EN 1990 (2002) donne des indices de fiabilité pour deux périodes de référence, 1 an et 50 ans (tableau 15). Dans cette dernière norme, il est indiqué que des niveaux de fiabilité pour toute durée de vie horizon sont les mêmes que ceux préconisés pour la durée de vie prévue à la conception d'une nouvelle structure. Des indices identiques sont donc retenus pour des durées de vie cibles de 25 ans ou 50 ans. Le tableau 16 (EASA, 2003) concerne les critères d'acceptation en fiabilité pour les structures aéronautiques.

Tableau 9 - Valeurs cibles pour les structures marines et l'offshore
(selon (Chateauneuf, Ardillon, 2012)).

Structures marines (navires): 8×10^{-4} à 1.3×10^{-4}

American Petroleum Institute (offshore): 4×10^{-4}

Canadian Standard Association (offshore)

Safety class	Consequences of failure	Annual target
Class 1	Great risk to life or high potential for environmental pollution or damage	10^{-5}
Class 2	Small risk to life or low potential for environmental pollution or damage	10^{-3}
Serviceability	Impaired function and none of the above	10^{-1}

Det Norske Veritas – cibles annuelles

Type of structural failure	Less serious consequences	Serious consequences
I – Redundant structure	10^{-3}	10^{-4}
II- Significant warning before the occurrence of failure in a non redundant structure	10^{-4}	10^{-5}
III- No warning before the occurrence of failure in a non redundant structure	10^{-5}	10^{-6}

Tableau 10 - Recommandations (JCSS 2000),
probabilité et indice de fiabilité cibles annuels.

Relative cost of safety measure	Minor consequences of failure	Moderate consequences of failure	Large consequences of failure
High)	3.1 (Pf $\approx 10^{-3}$)	3.3 (Pf $\approx 5 \cdot 10^{-4}$)	3.7 (Pf $\approx 10^{-4}$)
Normal	3.7 (Pf $\approx 10^{-4}$)	4.2 (Pf $\approx 10^{-5}$)	4.4 (Pf $\approx 5 \cdot 10^{-6}$)
Low	4.2 (Pf $\approx 10^{-5}$)	4.4 (Pf $\approx 5 \cdot 10^{-6}$)	4.7 (Pf $\approx 10^{-6}$)

Tableau 11 - Indice de fiabilité cible pour la conception et pour l'évaluation des structures existantes (ISO/ CD 13822, 1999).

Relative costs of safety structures	Consequences of failure			
	small	some	moderate	great
high	0	1.5	2.3	3.1
moderate	1.3	2.3	3.1	3.8
low	2.3	3.1	3.8	4.3

Tableau 12 – Indice de fiabilité cible (ISO 2394, 1998).

Relative costs of safety measures	Consequences of failure			
	small	some	Moderate	great
High	0	1,5	2,3	3,1
Moderate	1,3	2,3	3,1	3,8
Low	2,3	3,1	3,8	4,3

Tableau 13 - Indice de fiabilité cible pour la conception de structures

(Eurocode 1, 1993).

Limit states	Target reliability index β (design working life)	Target reliability index β (one year)
Serviceability	1.5	3.0
Fatigue	1.5 – 3.8	-
Ultimate	3.8	4.7

Tableau 14 - Recommandations pour la conception des structures - chargements et réglementations de sûreté (NBK, 1978)

Failure consequences	Failure type		
	Ductile with extra carrying capacity	Ductile without extra carrying capacity	Brittle
Less serious	3.1	3.7	4.2
Serious	3.7	4.2	4.7
Very serious	4.2	4.7	5.2

Tableau 15 – Fiabilités cibles (EN 1990, 2002).

Reliability classes	Consequences for loss of human life, economical, social and environmental consequences	Reliability index β		Examples of buildings and civil engineering works
		β (reference period = 1 year)	β (reference period = 50 years)	
RC3 high	High	5.2	4.3	Bridges, public buildings
RC2 normal	Medium	4.7	3.8	Residential and office buildings
RC1 low	Low	4.2	3.3	Agriculture buildings, greenhouses

Tableau 16 – Classification des risques pour la conception des aéronefs
(EASA CS-25, 2003).

Severity				Probability	
Effect on flight crew	Effect on occupants	Effect on aeroplane	Severity class		
Fatalities or incapacitation	Multiple fatalities	Normally with hull loss	Catastrophic	$< 10^{-9}$	Extremely improbable
Physical distress or excessive workload impairs ability to perform tasks	Serious or fatal injury to a small number of passengers or cabin crew	Large reduction in functional capabilities or safety margins	Hazardous	$< 10^{-7}$	Extremely remote
Physical discomfort or a significant increase in workload	Physical distress possibly including injuries	Significant reduction in functional capabilities or safety margins	Major	$< 10^{-5}$	Remote
Slight increase in workload	Physical discomfort	Slight reduction in functional capabilities or safety margins	Minor	$< 10^{-3}$	Probable
No effect	Inconvenience	No effect on operational capabilities or safety	No safety effect	1	No probability requirement

7.2) En résumé...

Le **tableau 17** résume les différentes recommandations et règlements retenus dans les différents secteurs industriels. De façon générale, il est recommandé d'utiliser ces indices cibles pour toute étude de fiabilité.

Lorsque l'ingénieur a effectué son analyse de risque et donc estimé la probabilité de défaillance de la structure (probabilité prévue pour la durée de vie prévue à la conception ou pour la durée de vie cible pour une structure existante), il doit comparer cette estimation à un critère d'acceptation. Il choisira les valeurs de critères qui correspondent au mieux à la structure étudiée. Ce choix va dépendre surtout de la nature du problème posé, de la durée de vie cible, des incertitudes liées aux données d'entrée (données de chargements, de matériaux, loi de dégradation) mais aussi des conséquences potentielles d'une éventuelle défaillance et des coûts des mesures de sécurité – sûreté.

**Tableau 17 – Résumé des critères d'acceptation recommandés
dans différents secteurs industriels.**

Activité	Hierarchie des critères d'acceptation	Forme des critères d'acceptation du risque	Nature des critères	Méthodes ou outils de calcul standards	Observations
Aviation	Risque majeur	Niveau cible de sûreté, taux de défaillance tolérable	Quantitatifs	Existence d'outils standards	(EASA, 2003) < 10 ⁻⁹ / heure de vol
Chemins de fer	Haut niveau de risque	Exprimés en nombre de morts/ blessés par passagers x km (ou par heure travaillée)	Quantitatifs	Des outils standards sont disponibles	<i>Royaume Uni</i>
Industrie chimique	Aucune	Aucune	-	Oui Voir aussi IEC 61508 – 61511.	Méthodologie ARAMIS (ECCR, 2004) d'analyse de risque qui inclut la culture de sûreté et des processus d'estimation du facteur humain.
Industrie de processus	Risque majeur	Conséquences et probabilité	Quantitatifs	Nombreux méthodes et outils disponibles. Analyse de risque	<i>Pays-Bas.</i> P(conséquence > 10 ⁿ victimes) < 10 ⁻³⁻²ⁿ Risque individuel < 10 ⁻⁶ / installation x an.
Nucléaire	Niveaux de doses permises pour un individu pendant une période de temps donnée. Probabilité de fusion du cœur.		Quantitatifs	Nombreuses méthodes disponibles. Analyse de risque. Le facteur humain est pris en compte.	(EURATOM 96/29, 1996). REP 900: 5. 10 ⁻⁵ / an REP 1300, N4: 10 ⁻⁵ / an EPR: 10 ⁻⁶ / an
Offshore	Aucune	Aucune	Aucun critère d'acceptation.	Non	Les réglementations nationales concernant l'analyse de risque s'appliquent.
Transport maritime	Niveau de risque élevé	Risque individuel (10 ⁻³ / an (équipage)) et	Quantitatifs	Oui, méthodologie d'analyse de risque	(IMO - Formal Safety Assessment, 2002)

		risque sociétal (10^{-4} / an (passagers, public))			
IEC 61508, systèmes électriques /électroni ques	Niveaux 1-4 de sûreté	Probabilité : 10^{-1} à 10^{-4} / sollicitation	Quantitatifs	Oui, discutés.	Toute technologie, tout secteur industriel, avec logiciel intégré.

7.3) Le cas des structures existantes

Les options possibles (Lannoy, Procaccia, 2005) lorsqu'il s'agit de se protéger vis-à-vis du risque sismique peuvent être :

- ne rien faire,
- modifier la structure soit en remplaçant un élément par un élément plus résistant ou d'une autre technologie, soit en le rénovant, soit en renforçant la structure existante,
- déconstruire la structure et en construire une nouvelle ayant a minima les mêmes fonctions.

La première option ne coûte rien mais elle peut s'avérer dangereuse à une échéance qu'on ne peut déterminer.

La deuxième est bien souvent plus coûteuse que la dernière option.

Concernant la dernière option, il est possible de concevoir et construire une structure plus résistante, par exemple selon les recommandations des Eurocodes (Eurocode8, 1998).

Pour la deuxième option qui est souvent la plus coûteuse, notamment pour les structures du patrimoine historique, les codes existants précisent qu'on peut retenir les indices cibles pour les nouvelles structures (valeurs des tableaux 9 à 16) qui sont des valeurs cibles objectifs, mais que, pour des raisons essentiellement économiques, ces indices peuvent être réduits. Par exemple le groupe JCSS (2000) recommande de prendre les valeurs du tableau 10 en choisissant la classe (la ligne) juste supérieure des coûts des mesures de sûreté.

(Vrouwenvelder, Scholten, 2011) recommandent de choisir comme indice de fiabilité cible:

$$\beta_{\text{existant}} = \beta_{\text{neuf}} - \Delta\beta$$

où :

$$\Delta\beta > 1.0, \text{ par exemple } 1.5.$$

Du fait de la préservation de la vie humaine, une solution pratique serait d'exiger une valeur minimale $\beta = 2.5$, pour toutes les situations associées à une durée horizon de 15 ans.

Dans ce cas, on peut vérifier que (hypothèse uniforme) :

$$P_f < \varphi(-\beta) / 15 = \varphi(-2.5) / 15 = 4. \cdot 10^{-4} \text{ /an.}$$

Dans la pratique, on peut remarquer que la préservation de la vie humaine sera toujours le critère de décision. Le tableau 18 donne les valeurs minimales recommandées. Par exemple, pour des conséquences de classe 3, la norme EN1990 (2002) préconise $\beta = 4.3$ pour une structure nouvelle (tableau 15, période de référence : 50 ans). Le tableau 18 préconise $\beta = 3.3$. Une réduction complémentaire $\Delta\beta = 1.5$ conduirait à une valeur trop basse si la vie humaine est concernée. Dans ces conditions, la valeur cible est bien 3.3 correspondant à une durée de vie horizon de 15 ans (tableau 18).

Ce type de méthodes (avec des données génériques) permet de déterminer la fiabilité cible de la structure connaissant la durée de vie horizon souhaitée. Les méthodes dites de gestion des actifs (*asset management*) peuvent permettre de choisir alors la solution optimale parmi les trois options.

Les considérations économiques sont donc importantes, pour les structures nouvelles comme pour les structures existantes. Il faudra bien souvent examiner l'écart de coût entre ne rien faire, une amélioration de la sécurité – sûreté de la structure existante, une prolongation de sa durée de vie et la construction d'une nouvelle structure de fonctions équivalentes.

Le tableau 19 donne une matrice de criticité d'un potentiel de dommage acceptable aux bâtiments, pour un danger pouvant entraîner d'importants dégâts et l'effondrement de structures (Diamantidis, Holicky et al, 2012).

De même les aspects sociaux devront être examinés. Ils ne doivent pas se limiter aux pertes en vies humaines et aux blessés, il faut aussi apprécier les éventuels déplacements de population, d'activités, les pertes éventuelles d'héritage historique.

La figure 3 compare différentes activités dans un diagramme de Farmer.

Tableau 18 - Valeurs minimales pour l'indice de fiabilité β et une période horizon minimale (Vrouwenvelder, Scholten, 2011).

Consequence class	Minimum reference period for existing building	β_{neuf}		β_{existant}	
		wn	wd	wn	wd
0	1 year	3.3	2.3	1.8	0.8
1	15 years	3.3	2.3	1.8(a)	1.1(a)
2	15 years	3.8	2.8	2.5(a)	2.5(a)
3	15 years	4.3	3.3	3.3(a)	3.3(a)

Class 0 : as class 1, but no human safety involved
 wn: wind not dominant
 wd: wind dominant
 (a) In this case is the minimum limit for human safety normative

Tableau 19 – Matrice de criticité : degré potentiel acceptable de dommage aux bâtiments.

Event size	CC1	CC2	CC3
Very large	Severe	High	moderate
Large	High	Moderate	Mild
Medium	Moderate	Mild	Mild
Small	Mild	Mild	Mild

CC = consequence class.

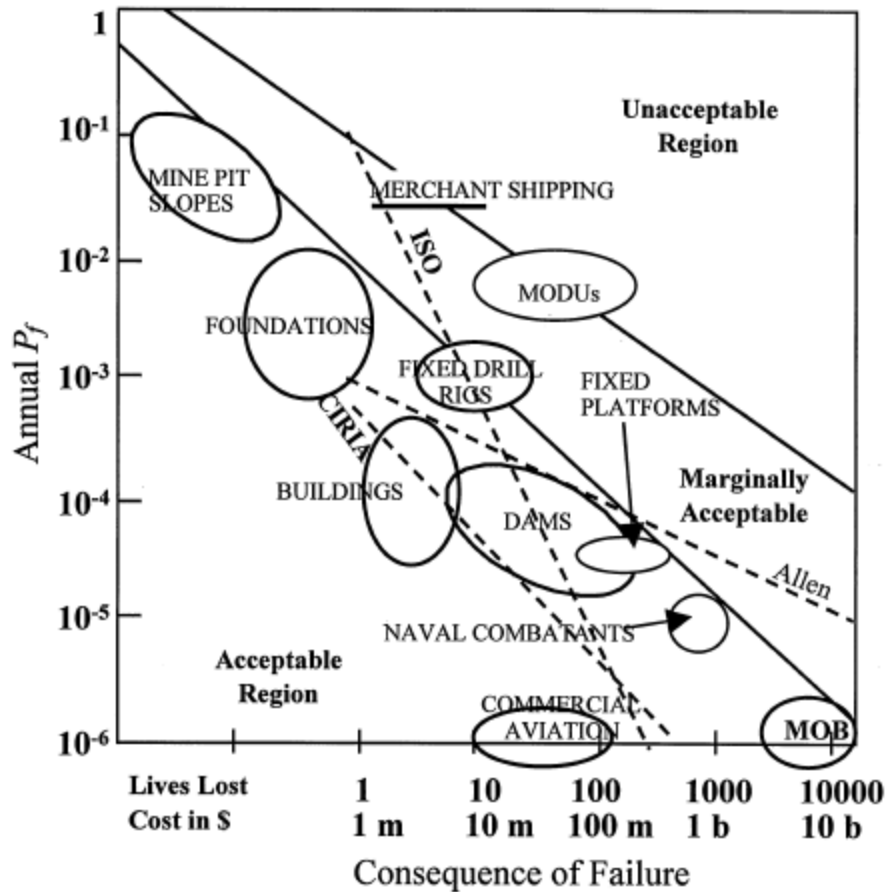


Figure 3 - Comparaison des risques de différentes activités représentées dans un diagramme de Farmer (Chateauneuf, Ardillon, 2012).

8) Quelques méthodes de spécification d'une fiabilité cible

8.1) Les méthodes d'allocation

Ces méthodes sont très utilisées en phase de spécification d'un nouveau produit. Elles permettent généralement de spécifier les exigences de sûreté de fonctionnement et en particulier les exigences de fiabilité, la fiabilité allouée. Cette dernière est exprimée par une probabilité sur un profil de mission. C'est un objectif de fiabilité à atteindre (Lannoy, Procaccia, 2006).

Quantitativement, on utilise différents indicateurs probabilistes pour caractériser la fiabilité allouée (AFNOR, 1996) :

- le MTBF (*mean time between failures*), la moyenne des temps entre la mise ou la remise en service d'un bien et la défaillance qui suit,

- l'indice de fiabilité d'une analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) ; cet indicateur est le produit des notations sur les trois critères : probabilité de défaillance, probabilité de non détection, gravité de la défaillance,
- un taux de défaillance seuil,
- quelquefois un niveau objectif de fiabilité.

Cette fiabilité est donc une valeur cible, un objectif à atteindre, un seuil minimal de fiabilité admis.

Elle est le résultat d'une décision de responsables du bien qui décideront de sa réalisation ou de son utilisation en fonction :

- du retour d'expérience, notamment des états limites des composants, des modes et des conséquences d'une éventuelle défaillance,
- des améliorations à apporter et des efforts nécessaires, compte tenu des progrès technologiques, des performances, des contraintes budgétaires,
- des jugements d'experts.

Une allocation se fait généralement au niveau d'un système. Elle est ensuite distribuée de manière descendante aux groupements fonctionnels, puis aux ensembles technologiques, enfin aux composants élémentaires. Il est donc nécessaire pour définir une allocation de fiabilité de disposer de l'arborescence fonctionnelle – matérielle du système.

Plusieurs méthodes d'allocation de fiabilité existent (Elegbede, Adjallah, 1998).

Les deux types de méthodes les plus utilisées sont :

- les méthodes dites d'égale allocation : cette méthode consiste à allouer une part égale de l'objectif de fiabilité d'un système aux sous-systèmes qui le composent ; on homogénéise ainsi la probabilité de défaillance de tous les niveaux du système ;
- la méthode ARINC (*Aeronautical Radio INCorporation*) : c'est une méthode d'allocation de taux de défaillance élémentaires ; elle est fondée sur l'extrapolation des données de retour d'expérience ou sur des calculs effectués à partir de taux de défaillance partiels de chaque sous-ensemble i ; on calcule le poids de chaque sous-ensemble par rapport au taux global du système existant ;

l'objectif de taux de défaillance pour un nouveau système, pondéré par ce facteur de poids permet d'allouer un nouvel objectif de défaillance à chaque sous-ensemble i .

D'autres méthodes existent, qu'il convient d'encourager, en particulier celles prenant en compte à la fois la pondération du retour d'expérience et l'optimisation d'efforts à consentir (par exemple sur les coûts).

Il faut enfin noter que toutes les méthodes d'allocation, quel que soit le paramètre de sûreté de fonctionnement à allouer, nécessitent l'accès à et l'analyse d'un retour d'expérience.

Les évaluations probabilistes de sûreté (les EPS) peuvent aussi être utilisées pour l'allocation au niveau des systèmes – structures – composants (SSC) d'objectifs différenciés selon l'importance de ceux-ci dans la sûreté. C'est ce que montrent (Ardillon, Vasseur, 2012) en utilisant les EPS pour allouer des fiabilités cibles à des tuyauteries. Le principal intérêt est certainement d'allouer des fiabilités cibles adaptées au niveau réel d'importance des composants vis-à-vis de la sécurité – sûreté : relaxation pour certains SSC, au contraire renforcement pour d'autres. La démarche est brièvement décrite dans (Ardillon, Vasseur, 2012). On évalue la contribution du système à un événement redouté (le risque de référence, risque réf). On alloue cette contribution au risque à chaque SSC formant le système. On évalue ainsi le Facteur d'Accroissement du Risque (FAR) de chaque SSC par :

$$\text{FAR}(\text{SSC}) = (\text{risque si le SSC est défaillant} - \text{risque réf}) / \text{risque réf}.$$

On alloue au SSC considéré :

$$P_f \text{ cible} = \text{contribution au risque de référence du SSC} / (\text{FAR}(\text{SSC}) \cdot \text{risque réf}).$$

Ainsi, en envisageant une EPS séisme réalisée sur des bâtiments de génie civil, des infrastructures ou des installations industrielles, on pourrait mettre en évidence les points réellement critiques au sens de la sécurité – sûreté par les types de dommages que l'on pourrait observer, par exemple l'effondrement d'un étage, la rupture d'une canalisation, la défaillance d'équipements importants pour la sécurité – sûreté... bref tous les objets pour lesquels la fiabilité associée se trouve inférieure au seuil d'acceptabilité. Tous ces éléments seront donc critiques. On peut les identifier, hiérarchiser ces criticités, allouer des objectifs de fiabilité, prendre des mesures de protection vis-à-vis du risque (par exemple en renforçant une structure).

Signalons que ce type de méthode reste à explorer et doit encore être appliqué et validé. Pour ce faire, il convient aussi de disposer d'un retour d'expérience, d'une courbe de danger fondée sur une évaluation statistique de la région considérée, d'une courbe de fragilité (probabilité de défaillance pour le SSC à un pic donné d'accélération du sol) prenant en compte les incertitudes. Notons enfin qu'on est certainement dans un cas de traitement de défaillance de cause commune, le séisme pouvant impacter différents éléments.

8.2 La maximisation de l'utilité espérée

Le problème est formalisé dans ce paragraphe comme un problème de prise de décision économique. Il s'agit de maximiser l'espérance de l'utilité (ou de minimiser le coût total) qui s'écrit :

$$\text{Utilité} = B - \Sigma (\text{Coûts}).$$

où B représente les bénéfices pour la société, les actionnaires, ... Les bénéfices doivent être analysés. Généralement une estimation des bénéfices attendus mais aussi des pertes est effectuée lorsqu'il s'agit de comparer différentes technologies pour un même besoin.

La somme des coûts actualisés comprend :

- les coûts d'investissement - conception - construction ; ces coûts dépendent aussi de la probabilité de défaillance prévue, plus elle sera prévue faible et plus le coût d'investissement sera important,
- les coûts d'exploitation – maintenance pendant la durée d'exploitation qui dépendent de la probabilité de défaillance,
- les coûts de la défaillance, coûts de sécurité – sûreté et coûts de perte d'exploitation ; ces coûts dépendent aussi fortement de la probabilité de défaillance ; dans ces coûts interviennent aussi le prix de la vie humaine ; cette dernière ne peut être mesurée ; de nombreux facteurs (la richesse du pays, la formation, l'âge, ...) peuvent intervenir ; généralement des méthodes de régression multiple permettent de déduire des valeurs ; le tableau 20 donne des valeurs empiriques relevées dans la documentation technique pour le transport routier (Andersson, Treich, 2010) ; on y remarque une grande dispersion en ce qui concerne la ligne France ; d'autre part les coûts de sécurité – sûreté sont très difficiles à évaluer et généralement très mal connus.

Une version simplifiée peut-être proposée en calculant l'espérance du coût total qu'il convient donc de minimiser :

$$E(\text{coût total}) = C_i + P_f \cdot C$$

où C_i est le montant de l'investissement initial, P_f la probabilité de défaillance et C le coût de défaillance (inspection – maintenance, indisponibilité, sécurité).

$E(\text{coût total})$ se présente sous la forme d'une courbe en U, dont on peut déterminer le minimum, permettant ainsi de donner une valeur seuil de la probabilité de défaillance (il s'agit finalement du calcul classique fait en optimisation de la maintenance lorsqu'il faut choisir entre maintenance corrective et maintenance préventive).

Cette méthode est intéressante dès lors que les pertes ne sont qu'économiques. Dès que la situation devient extrême, lorsque la défaillance implique des pertes de vies humaines, que les accidents potentiels sont des accidents aux conséquences graves et aux probabilités faibles (événements extrêmes). Cette méthode est difficilement applicable car on se heurte aux problèmes du prix de la vie humaine et des coûts de sécurité- sûreté.

Néanmoins cette méthode peut être intéressante pour les produits innovants, sans *a priori* historique, ou pour fixer des fiabilités cibles pour des produits similaires ou des structures courantes.

Enfin, on peut remarquer que ce coût de défaillance dépend fortement de la probabilité de défaillance (prévue, calculée de l'instant d'observation à l'instant objectif de durée de vie) qui s'avère être *in fine* le paramètre le plus influent, avant les coûts. Peut-être est-ce dû au fait que l'incertitude sur l'estimation de la probabilité de défaillance est plus grande que celle sur les coûts (hormis les coûts de sûreté souvent indéterminés).

Il est donc clair **qu'un critère d'acceptation probabiliste est l'outil le plus neutre, le plus objectif pour juger de l'acceptabilité d'un risque.**

Tableau 20 – Estimations empiriques de la valeur de la vie humaine (VSL) pour le trafic routier (extraites de (Andersson, Treich, 2010)) –

Valeurs en M US \$ 2005.

Pays	Année	Valeur de la vie humaine (1)	
		Inf	Sup
Australie	1989	1.853	5.114
Canada	1986	1.989	3.558
Chili	2005	0.541 (2)	-
Danemark	1993	0.898	1.398
France	1994	1.031	23.984
Inde	2005	0.150 (2)	-
Royaume Uni	1996	1.510	17.060
Suède	2004	2.192	5.781
Suisse	1993	1.094 (2)	-
US	1999	3.517	4.650

(1) VSL, *Value of Statistical Life*

(2) Valeur unique

8.3 La méthode LQI (Life Quality Index)

Cette méthode a été développée et appliquée notamment par Ardillon, Chateaufeuf et Proske (Université de Vienne) dans les années récentes (ESReDA, Ardillon et al, 2010). Cette méthode, ses concepts, ses avantages et défauts sont amplement décrits dans cette référence.

En pratique les ressources disponibles, notamment financières, sont limitées.

La figure 4 présente les différentes variables influentes agissant sur la qualité de vie.

LQI peut s'écrire :

$$LQI = G^q E,$$

$$\text{ou encore : } LQI \approx g^w \cdot e^{b(1-w)}$$

où g est le PIB par habitant (ou la part du PIB utilisable pour réduire les risques ($g = 0.6$ PIB)), w le rapport temps de travail / durée de vie ($\approx 18\%$), e l'espérance de vie en bonne santé (90% de l'espérance de vie).

On a:

$$d LQI / LQI = d e / e + w / (1-w) \cdot dg / g$$

ou encore :

$$C = (1-w) / w \cdot Cf / M \cdot N \cdot g \cdot (Pf1 - Pf2),$$

où C est le coût maximal possible des mesures de mitigation pour éviter la réduction de qualité de vie, N le nombre de victimes, Cf le coût de la défaillance, M la mortalité moyenne, Pf1 la probabilité de défaillance, Pf2 la probabilité de défaillance après renforcement.

Notons que :

- les conséquences sont bien souvent difficiles à déterminer,
- la valeur statistique de la durée de vie dépend des pays, elle est d'autant plus élevée que le pays est développé (tableau 20); donner une valeur monétaire au prix de la vie humaine est en outre sujet à controverses,
- la méthode doit encore être expérimentée et validée,
- elle n'est pas utilisable lorsque des événements extrêmes (probabilité très faible, conséquences très fortes) sont en jeu (par exemple les événements impliquant la sûreté nucléaire).

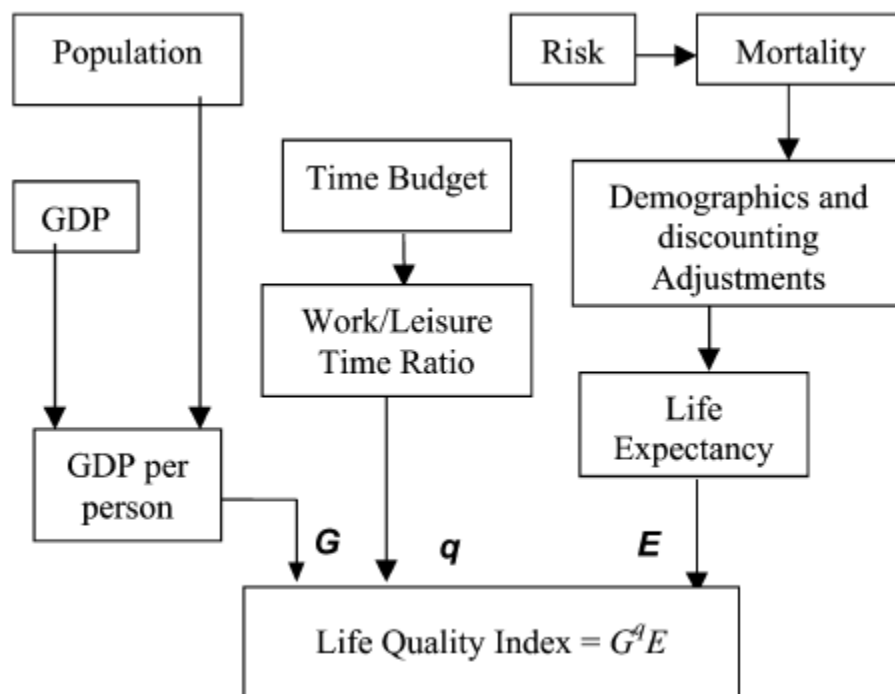


Figure 4 – Démarche LQI

(ESReDA, Ardillon et al, 2010 ; Pandey, Nathwani, 2003).

8.4 Les méthodes de calibrage

Un grand nombre de méthodes dites de calibrage ont été utilisées depuis une trentaine d'années (JCSS, 2000). Il s'agit de refaire les calculs de conception en

utilisant les règles, pratiques, connaissances en méthodes et matériaux actuelles et de calculer la probabilité de défaillance ou l'indice de fiabilité pour s'assurer que le niveau de fiabilité auparavant accepté est maintenu. Ceci permet de vérifier les marges de sûreté dont on dispose, et de valider les codes physico – fiabilistes. Les résultats obtenus présentent une certaine dispersion. Néanmoins on a pu observer (Diamantidis, Vrouwenvelder, 2012) :

- des indices élevés sont observés chaque fois que les mesures de contrôle de la fiabilité sont peu coûteuses,
- dans le cas d'une rupture fragile, les exigences de fiabilité sont renforcées,
- dans le cas de la fatigue, si une défaillance peut se produire, elle sera différée et les exigences de fiabilité sont alors relâchées,
- les exigences de fiabilité sont généralement plus fortes pour les éléments primaires d'une structure.

8.5 La méthode ALARP (*as low as reasonably practicable*)

Le principe ALARP suppose qu'il existe un niveau de risque tolérable et que tout risque doit se situer au moins sous ce niveau. Le terme "*reasonably practicable*" signifie qu'un risque considéré de bas niveau peut être transféré vers une zone où le risque devient négligeable. Un effort infini pourrait réduire le risque à un niveau infiniment petit, mais cet effort serait infiniment coûteux. C'est pourquoi la méthode ALARP suppose qu'il existe un niveau de risque tel que cela ne vaut plus la peine et l'effort financier de le réduire encore. Ceci signifie que toutes les mesures de prévention – protection doivent être prises jusqu'à ce qu'une réduction de risque ne puisse être entreprise sans une augmentation significative des investissements ou des dépenses. En d'autres termes, la dépense serait disproportionnée par rapport au gain de sécurité – sûreté réalisé.

Le guide ALARP a été développé par le Health and Safety Executive (HSE) au Royaume Uni, dans le cadre du management des risques et de la prise de décision. Il est apparu la première fois en 1988 à propos du risque tolérable dans les centrales nucléaires. ALARP est devenu le cadre standard des critères de risque acceptable et s'est développé dans tous les secteurs industriels.

Le modèle conceptuel est donné sur la figure 5.

Dans la région "risque inacceptable", il convient de réduire le risque et de se déplacer vers la région ALARP (entre les deux lignes horizontales).

Dans cette région ALARP, il est recommandé de faire tous les efforts possibles pour réduire le risque. Le niveau d'arrêt de ces efforts fait l'objet d'une analyse, d'une discussion et d'un compromis.

Les critères ALARP sont représentés par les deux lignes horizontales de la figure 5: la ligne du risque acceptable et la ligne du risque négligeable. Un risque acceptable n'est donc pas une seule valeur probabiliste. Un risque acceptable doit identifier les valeurs de risque correspondant aux deux lignes, estimer l'étendue du risque étudié et comparer cette valeur estimée aux deux valeurs des deux lignes horizontales, déterminer dans quelle région va se situer le risque estimé. Ensuite les décideurs décident en fonction des résultats obtenus. Le niveau du risque détermine la décision. Cette dernière va donc dépendre des incertitudes de l'analyse, des conséquences prévisibles, de la durée de vie cible, des coûts de sûreté et du prix de la vie humaine.

De nombreux pays pratiquent cette méthode. Quelques pays ont défini les niveaux « risque acceptable » (ligne supérieure) et « risque négligeable » (ligne inférieure) des deux lignes (voir tableaux 21 et 22), utilisables à la fois en conception et pour des installations existantes.

En conception, la ligne «risque acceptable» est à 10^{-4} / an tandis que la ligne « risque négligeable » se situe à 10^{-6} par an. Pour les installations existantes, ces deux lignes sont respectivement à 10^{-4} et 10^{-5} par an. De façon générale, il y a un facteur multiplicatif de 10 ou 100 entre les deux valeurs.

La figure 6 illustre le principe ALARP sur les courbes de Farmer. On peut trouver des applications ALARP au risque sismique et à d'autres risques dans la documentation technique (par exemple (Liu, Xie, 2008)).

L'autre principe pouvant être utilisé est le célèbre principe de précaution élaboré à Rio en 1992. Mais ce dernier présente de très gros défauts : différer les projets voire (et surtout) les abandonner et ne pas les réaliser. Ceci concerne essentiellement les projets innovants dont notre économie a grand besoin à l'heure actuelle. Nous préférons la méthode ALARP à ce principe de renoncement.

Tableau 21 - Les deux limites de la région ALARP .

Valeur limite haute, morts / an		
10^{-3}	Royaume Uni	travailleurs
10^{-4}	Royaume Uni	public
10^{-5}	Hongrie	Pas de distinction : public – travailleurs
Valeur limite basse, morts/ an		
10^{-6}	Royaume Uni	Pas de distinction : public – travailleurs
	Hongrie	

Tableau 22 – Limite haute, morts/ an (une seule limite est définie).

10 ⁻⁵	Pays-Bas	Situations existantes
	Tschéquie	Installations existantes
10 ⁻⁶	Pays-Bas	S'applique pour les nouveaux permis : installations fixes, transport de matières dangereuses, pipelines
	Tschéquie	Limite pour les nouvelles installations

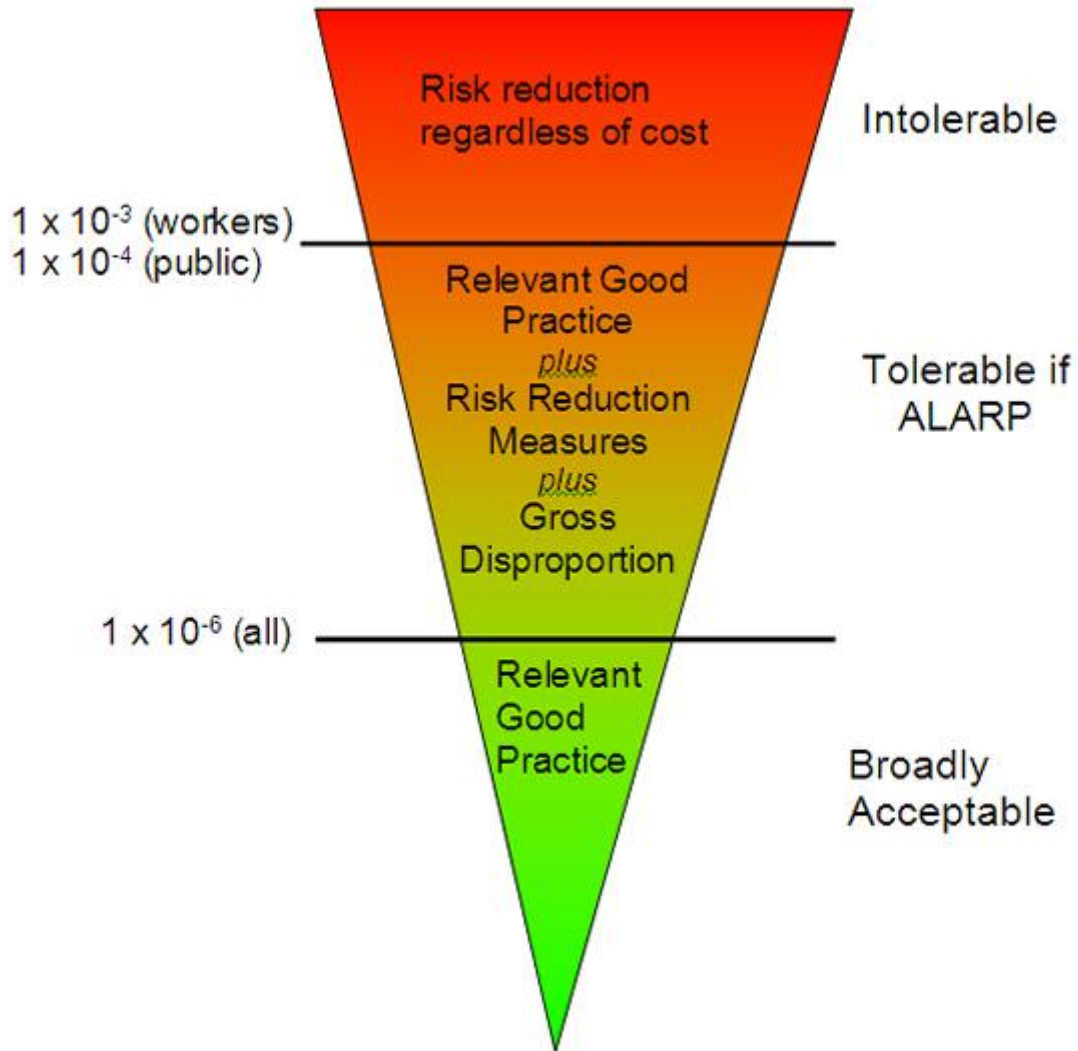


Figure 5 - Principe ALARP (HSE, 1992).

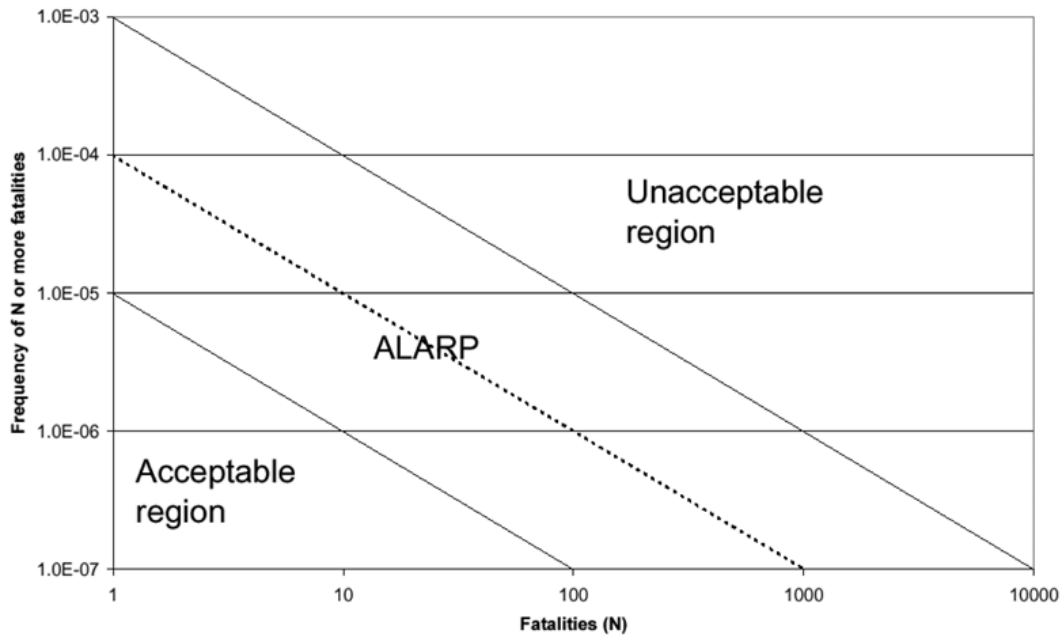


Figure 6 – Courbes de Farmer FN illustrées par le principe ALARP.

9) Les aspects sociologiques

Le tableau 23 donne les valeurs cibles les plus reconnues pour les risques individuel et sociétal.

Le risque individuel est la probabilité qu'un individu exposé soit impacté. Ce risque individuel est la somme de tous les risques engendrés par les différents modes de défaillance associés aux dangers qui peuvent affecter l'individu. On voit que la valeur est de l'ordre 10^{-5} - 10^{-6} /an.

L'acceptabilité dépend de l'activité en cause, volontaire ou non. En ce qui concerne les structures, l'activité est considérée non volontaire. La norme ISO 2394 (1998) propose un seuil d'acceptation pour une défaillance de structure subie par :

$$\text{Critère} \leq B / p^*,$$

p^* étant la probabilité qu'un individu soit présent au voisinage de la structure en cas d'effondrement, $B = 10^{-6}$ / an (pour le public) et 10^{-5} / an (pour les employés).

Le risque sociétal est la probabilité que des conséquences négatives impactent la société tout entière, amenant une réponse socio- politique, car le risque a provoqué de nombreuses victimes ou une forte atteinte à l'environnement ou des pertes économiques considérables. Il est aussi appelé parfois risque collectif,

risque susceptible d'affecter plusieurs entités ou communautés ou la société. Actuellement la société montre son aversion de plus en plus forte vis-à-vis des risques en général, des risques industriels et technologiques en particulier. Le risque sociétal est bien souvent représenté sur un diagramme fC ou FN de Farmer (paragraphe 6).

Tableau 23 - Valeurs cibles communément admises pour le risque individuel et pour le risque sociétal (HSE, 1999).

Target values of maximum risk not to be exceeded	
Employee individual risk	
All process causes	10 ⁻⁴ per year
Specific process causes	10 ⁻⁵ per year
Public individual risk	
All process causes	10 ⁻⁵ per year
Specific process causes	10 ⁻⁶ per year
Risk of major accidents (societal risk)	
Near miss from all process causes	10 ⁻⁴ per year
Accident from all process causes	10 ⁻⁵ per year
Catastrophic accident from all process causes	10 ⁻⁶ per year
Accident from specific process causes	10 ⁻⁶ per year
Catastrophic accident from specific process causes	10 ⁻⁷ per year

Les aspects sociologiques sont importants. Beaucoup de débats sur l'acceptabilité des risques sont dus au fait que, bien trop souvent, les risques et leurs conséquences ont été déterminés de façon subjective sans se référer à des calculs physiques, à des expérimentations ou à des estimations probabilistes objectifs. L'absence d'études documentées, de mesures physiques et d'études probabilistes objectives, la non estimation des incertitudes, l'incompréhension, la subjectivité du processus, les intérêts particuliers, une communication défailante et les aspects médiatiques (destinés au public, ils sollicitent plus l'affect que la raison) sont certainement les raisons les plus importantes du rejet des nouveaux projets par le public. Le problème de l'acceptation est en outre d'autant plus difficile que certains groupes ou communautés peuvent estimer qu'un risque est acceptable tandis que d'autres groupes de la société le considèrent inacceptable, ce qui peut engendrer des différences politiques.

De nombreux travaux ont été effectués par des ingénieurs sociologues ou philosophes. L'ouvrage (Kermisch, 2010) est l'ouvrage que l'on peut conseiller sur ces sujets de perception et d'acceptation. Seuls quelques résultats et quelques grandes tendances sont évoqués dans les deux paragraphes suivants.

9.1 La perception du risque

Le problème de la perception des risques n'est pas nouveau et se posait déjà dans l'Antiquité. Lors des XVIII – XIX èmes siècles, le problème ne se pose pas. C'est la période de la révolution industrielle. L'homme est devenu apprenti sorcier. Les populations ont une grande confiance dans la maîtrise des risques par l'homme. Tout change dans les années 1970 à une époque où apparaît la notion de risque technologique majeur. On constate un début d'opposition du public aux nouvelles technologies, aux nouveaux risques, à cause du développement des grandes industries de processus (chimie, gaz, nucléaire, pétrole). De premières études psychométriques sont effectuées et montrent que le dommage potentiel, le contexte et le sujet percevant sont des facteurs d'influence importants sur la perception des risques. D'autres études effectuées dans les années 1990 ont montré que les individus n'appréhendent pas de façon identique les mêmes risques et que les facteurs socioculturels, locaux et politiques jouent un rôle dans la perception. L'approche culturaliste (développée par (Kermisch, 2010) considère que l'individu percevant ne peut être dissocié de son milieu et que, par conséquent, ce dernier a une influence considérable sur la manière de percevoir et d'évaluer les risques. Le risque estimé par les analystes de risque, qui se fondent sur un retour d'expérience et une démarche méthodologique reconnue, et celui estimé par le public, qui s'appuie sur une démarche complètement subjective pouvant reposer sur des peurs comme sur des enthousiasmes, sont bien souvent deux appréhensions différentes d'un même danger.

9.2 L'acceptation du risque

Le tableau 24 donne quelques critères qualitatifs à caractère général sur l'acceptabilité des risques (liste non exhaustive). Ces critères ont été mis en évidence à la suite d'enquêtes auprès des populations voisines de sites à risques, en France (voir notamment (IMdR, 2012)) et au Royaume Uni. Ils traduisent des tendances, sans qu'on puisse garantir un caractère général.

On peut insister sur l'importance des aspects locaux et des enjeux socio – politiques. Il faudrait probablement faire prendre conscience du risque et de son acceptabilité au public susceptible d'être exposé.

**Tableau 24 – Critères qualitatifs (exemples) indiquant
les aversions et les préférences du public pour les risques.**

	Risques plutôt refusés	Risques plutôt mieux acceptés
1	Risques subis (médiator, vache folle)	Risques choisis (alpinisme, bateau)
2	Risques technologiques majeurs (accidents industriels ou de transports), défaillance de protections contre les agressions naturelles (mauvaise résistance de digues lors d'inondations)	Risques diffus (de la vie courante, tabac, accidents automobiles, ...), qui ont pourtant un taux fort élevé d'occurrence
3	Risques non naturels, issus de l'activité humaine (doses de rayonnement dans l'industrie nucléaire, téléphones portables, terrorisme)	Risques naturels ou familiaux (émission de radon dans les maisons d'Auvergne et de Bretagne)
4	Risques en lien avec les activités militaires (camps militaires, usines d'explosifs)	Autres risques
5	Risques émergents (nanotechnologies, OGM, fusion nucléaire...), dont les effets ne sont pas connus	Risques avérés dont les effets sont connus.
6	Risques avec effets à long terme (faibles doses radioactives, fluage) ou avec effets irréversibles	Risques aux effets connus s'exerçant pendant des durées courtes ou aux effets réversibles
7	Risques mettant en cause la sécurité, l'environnement, la santé	Risques économiques, réglementaires,...
8	Risques avec absence de bénéfices (gêne, bruit, pollution atmosphérique d'usines chimiques)	Risques avec bénéfices (pour les patients : risques dus à la radiothérapie, baisse du chômage)
9	Absence de retombées locales (environnementales, économiques, financières), bénéfices importants pour les actionnaires, les constructeurs, l'état central	Nombreuses retombées économiques et sociales locales (redevances payées par les centres de production d'électricité, construction de routes, piscines, ...)
10	Dangers immédiats, concernant l'individu, sa famille et ses biens (installation dangereuse près d'une école)	Dangers différés (agriculture sur les pentes d'un volcan, fatigue sur une structure)
11	Dangers invisibles (nuage d'hydrogène, mauvaise organisation, mauvaise maintenance pouvant provoquer une chute d'avion)	Danger visible (danger d'éboulement de rochers, danger lié à des gazoducs ou à des stockages)
12	Facteur humain concerné (accident industriel, erreur humaine de maintenance), recherche d'un responsable, d'un coupable.	Aléa naturel
13	Risques évalués par des industriels et des experts de l'analyse des risques	Risques évalués par des organismes indépendants des industriels
14	Etudes de risques, analyses de risque non accessibles	Transparence des données et méthodes utilisées et des résultats des études
15	Non participation au choix des options et aux décisions	Participation au choix des options et aux décisions
16	Absence de concertation, communication	Concertation et communication

Cependant ce que dit Freddy Vinet (2006) à propos des inondations nous semble vrai aussi pour les séismes. L'acceptabilité la plus difficile à faire admettre n'est pas l'acceptabilité du risque, qui reste une réalité bien palpable, mais l'acceptabilité des contraintes inhérentes à une prévention efficace : maîtrise de l'occupation des sols, plans de sauvegarde, vigilance, ...

10) Conclusion

Le problème de l'acceptation d'un risque est un problème difficile. Un risque acceptable est un risque d'emblée accepté. Il semble qu'il vaudrait mieux parler de risque tolérable, car tout industriel, toute collectivité prend des mesures de prévention – protection pour réduire le risque et le faire accepter. Aussi préférons-nous risque tolérable qui correspond plus à la pratique.

Le présent article fait un tour d'horizon des critères d'acceptation existants pour les structures. Ces critères sont généralement définis en termes de probabilité de défaillance ou d'indice de fiabilité.

Avant d'accepter un risque, il faut déjà savoir estimer le risque dans ses deux composantes, probabiliste et déterministe, ce qui n'est déjà pas facile. Mais il faut le faire car ces deux mesures sont essentielles pour décider d'accepter ou non ce risque en garantissant un résultat certes imprécis, mais honnête, rigoureux et objectif.

Si cette estimation est incertaine, de part les incertitudes des données d'entrée, de l'incertitude des modèles physique et probabiliste, ..., elle n'en est pas moins objective, prenant en compte les connaissances et les incertitudes du moment. Et c'est sa grande qualité. Ce qui est important est de savoir intégrer les notions d'incertitude, de marge d'erreur, de tangibilité de la connaissance du risque. Sinon, la méthode d'estimation peut être subjective et le résultat peut varier en fonction des intérêts, de la versatilité, de la cupidité. Toutefois, cette méthode subjective, qui prendra en compte malgré tout des jugements d'experts, les intuitions ou les pressions, a le mérite d'exister et elle est de toute façon meilleure que l'absence d'estimation.

Se poser la question de l'acceptabilité d'un risque, c'est donc d'abord lever la dichotomie objectif / subjectif, sachant que la vision objective est la seule envisageable lorsqu'il s'agit de la sécurité, de la santé ou de la protection de l'environnement. Pour ce faire, il faut définir un (ou des) critère(s) quantitatifs (déterministes ou probabilistes, ces derniers étant les plus simples à manipuler), critères qui vont différer selon les risques étudiés mais aussi selon les réglementations nationales ou selon les points de vue des publics.

Dans un premier temps, il convient donc de prendre en compte les recommandations et réglementations déjà existantes, le retour d'expérience, l'expertise, les calculs d'estimation des conséquences et de la probabilité

d'occurrence, les méthodes de décision économiques. On a pu voir que les critères d'acceptation dépendent fortement des conséquences de la défaillance, de la durée de vie horizon fixée pour la structure, des connaissances du moment et des incertitudes liées aux données et aux modèles, des efforts techniques et financiers nécessaires pour sécuriser la structure, des réactions du public. Ces critères sont certainement plus difficiles à définir en l'absence de retour d'expérience, comme pour les évènements rares aux conséquences catastrophiques, ou pour les projets innovants. Il semble qu'on puisse accepter un critère probabiliste d'acceptation de l'ordre de 10 fois plus faible pour une structure existante par rapport à une structure nouvelle en conception. La méthode EPS, la méthode LQI (Life Quality Index) nous semblent des méthodes intéressantes et prometteuses qu'il conviendrait de développer, d'expérimenter et de valider. Elles nécessitent cependant un gros effort de retour d'expérience et de braver certains principes liés à l'éthique (problème de l'estimation financière de la perte de vie humaine).

Le risque acceptable est certes une affaire d'abord technique mais c'est aussi une affaire de concertation.

Dans un second temps, il paraît important d'effectuer des démarches de concertation – consultation et d'échanges entre tous les acteurs (politiques, acteurs locaux, économiste et financiers, industriels, experts de maîtrise des risques, chercheurs, public, autorités réglementaires). Ces dernières ont un rôle initial à jouer dans la définition, la quantification de critères, le respect du processus d'analyse. Ce rôle ne peut leur être dévolu qu'après consultation des parties prenantes. Il faut aussi que le public apprenne à composer avec l'incertitude qui est la première composante du risque

Le principe ALARP proposé par HSE nous paraît un progrès important conduisant à un compromis raisonnable, permettant de réduire le plus possible les effets des risques, avec des efforts raisonnables tant humains, techniques, que financiers, de réduire le niveau du risque, de contrôler le bon déroulement des études et des projets. De notre point de vue, ce rôle de suivi – contrôle doit être assuré par les autorités réglementaires, en toute indépendance des pouvoirs politiques, des industriels et du public.

L'assurance a certainement aussi un rôle à jouer (ce point n'est pas évoqué dans cet article): comment couvrir le risque résiduel ? Comment mettre en place une assurance globale permettant de répartir les risques pour compenser un risque

local ? Par exemple, comment faire participer un grand nombre de pays d'une part à un programme de construction antisismique à Haïti, d'autre part à la compensation des dépenses liées à une catastrophe ?

Enfin, une veille technologique sur ce sujet et une harmonisation européenne des critères semblent nécessaires.

11) Références bibliographiques

Adjallah K ;, Elegbede C. (1998), *Etude de la sensibilité des méthodes d'allocation de fiabilité*, Congrès $\lambda\mu$ 11, Arcachon, 29/09-01/10-1998.

AFNOR (1996), *Qualité en conception, la rencontre besoin – produit – ressources*.

Andersson H., Treich N. (2010), *The Value of a Statistical Life*, Toulouse School of Economics.

Ardillon E., Chateauneuf A. (2012), *Comment spécifier les objectifs cibles de fiabilité ?*, journée IMdR « Perception et acceptation des risques en sécurité et sûreté des structures », ESTP, Cachan, 24 mai 2012.

Ardillon E., Vasseur D. (2012), *Objectifs de fiabilité pour les structures de centrales nucléaires*, journée IMdR « Perception et acceptation des risques en sécurité et sûreté des structures », ESTP, Cachan, 24 mai 2012.

ASN (Autorité de Sûreté Nucléaire), Directive 96/29/ Euratom du Conseil du 13 mai 1996 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant de rayonnements ionisants.

Bedford T., Cooke R. (2001), *Probabilistic Risk Analysis – Foundations and Methods*, Cambridge University Press.

Bryla Ph., Ardorino F., Aufort P., Jacquot J-P, Magne L., Monnier B., Pitner P., Vérité B., Villain B. (1997), *Development of a Maintenance Optimization Procedure for Structural Components in Nuclear Power Plants*, ESREL'97, Advances in safety and reliability, Pergamon, Volume 2, pp 1121-1228, Lisbon, June 1997.

Buffon, *Supplément à l'Histoire Naturelle* (1776), Tome Troisième, Partie expérimentale, Onzième et Douzième mémoires, page 157.

COST 345, *Numerical Techniques for Safety and Serviceability Assessment* (2004), European Commission, Directorate General Transport and Energy.

Dechy N., Bouissou C. (2006), *A Risk Comparison for Global Decision Maker: an Epidemiological Study*, Safety and Reliability for Managing Risk – Guedes Soares & Zio (eds), Taylor & Francis Group, London.

Desroches A., Leroy A., Quaranta J-F, Vallée F. (2006), *Dictionnaire d'analyse et de gestion des risques*, Hermes Science.

Det Norske Veritas, *Risk Acceptance Criteria for Technical Systems and Operational Procedures* (2010), Report for the European Railway Agency, Report N°24127328/03 Rev 02, 22 January 2010.

Diamantidis Dimitris, Holicky Milan et al (2012), *Innovative Methods for the Assessment of Existing Structures*, Lifelong Learning Programme. Voir en particulier: Diamantidis D., Vrouwenvelder T., *Chapter 9 : Acceptance Criteria*.

Dictionnaire sur l'environnement, *1001 mots et abréviations de l'environnement et du développement durable*, éditions Recyconsult.

EASA (European Aviation Safety Agency), CS-25, *Acceptable Means of Compliance (AMC)* (2003), 25.1309-1, System design and analyses

ESReDA (European Safety and Reliability Data Association) (2004), *Lifetime Management of Structures*, Lannoy A. et al, Det Norske Veritas.

ESReDA (European Safety and Reliability Data Association) (2010), *SRA into SRA: Structural Reliability Analyses into System Risk Assessment*, Ardillon E. et al, Det Norske Veritas.

The European Commission Community Research “*Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the Context of the Seveso II Directive*”, Contract No: EVG1 – CT – 2001 – 00036, December 2004.

EN 1990 Eurocode, *Basis of Structural Design*, European Committee for Standardization, April 2002.

Eurocode 1: 1993, *Basis of Design and Actions on Structures*.

Eurocode 8: 1998, *Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes*, <http://www.eurocode1.com/fr/eurocode8.html> .

Hasofer A.M., Lind N.C. (1974), *Exact and Invariant Second Moment Code Format*, Journal Of Engineering Mechanics, vol 100, pp 111-121, 1974.

HSE (1978). Health and Safety Executive: *Canvey Island: an Investigation*, HMSO.

HSE (1988). Health and Safety Executive: *The Tolerability of Risk from Nuclear Power Stations*. Discussion Document, HMSO, London. Revised edition, 1992.

HSE (1999). Health and Safety Executive: *Reducing Risks - Protecting People*. Discussion Document, HSE Books.

IAEA (International Atomic Energy Agency) (2007), *IAEA Safety Glossary, Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection*.

IEC 61508 (2000). International Electrotechnical Commission. International Standard IEC 61508: Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety Related Systems. IEC, Geneva. www.iec.ch

IMdR (Institut pour la Maîtrise des risques), journée IMdR « Perception et acceptation des risques en sécurité et sûreté des structures », ESTP, Cachan, 24 mai 2012. Voir notamment les conférences (Ardillon – Chateauneuf, Ardillon – Vasseur, Brugidou, Colbeau-Justin, Kermisch).

International Maritime Organization(IMO), *Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-making Process* (2002), London, 5 April 2002.

ISO/CD 13822: 1999, *Bases for Design of Structures – Assessment of Existing Structures*, December 1999.

ISO 2394: 1998, *General Principles on Reliability for Structures*, second edition, June 1998.

ISO 31000 : 2009, *Management du risque – Principes et lignes directrices*.

Jacquot J-P, Dubreuil-Chambardel A., Lannoy A., Villemeur A. (1994), *Optimisation de la maintenance par la fiabilité*, Epure N°44, pp 23-31, octobre 1994.

JCSS 2000 (Joint Committee of Structural Safety), *Probabilistic Evaluation of Existing Structures* (2000), RILEM Publications SARL.

Kermisch Céline (2010), *Les paradigmes de la perception des risques*, Collection SRD, Lavoisier, Editions Tec&Doc.

Lannoy A. (2012), *Danger ou risque, quelle(s) différence(s) ?*, monographie IMdR, 07 décembre 2012.

Lannoy A., Procaccia H. (2005), *Evaluation et maîtrise du vieillissement industriel*, Collection SRD, Lavoisier, Editions Tec&Doc.

Lannoy A., Procaccia H. (2006), *Evaluation de la fiabilité prévisionnelle*, Lavoisier, Editions Tec&Doc.

Lavédrine P. (2009), *La maîtrise des risques, la sûreté de fonctionnement et la notion de risque acceptable illustrées à travers la conduite d'un projet industriel de conception et de construction d'avion*, Conférence Airbus, Toulouse, 15-16/06/2009.

Lecomte P., Suety J-P (2000), *Le risque acceptable : opinion publique et idéologie*, Annales des Mines, Juillet 2000.

Liu L., Xie L.L. (2008), *Research on Acceptable Risk Level for Cities' Ability in Reducing Earthquake Disasters*, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China.

MAIF, 5èmes Rencontres géographes et assureurs face aux risques naturels /// *Les risques sismiques/// Nouveaux regards sur la prévention et la gestion*, 7 avril 2011.

Michel X. (2012), *La gestion du risque, quelle fiabilité organisationnelle ?*, Université de Nantes, 21/03/2012.

Nordic Committee on Building Regulations, *Guidelines for Loading and Safety Regulations for Structural Design* (1978), NBK report Nr 36, November 1978.

NRC, Nuclear Regulatory Commission, *Reactor Safety Study: an Assessment of Accident Risks in US Commercial Nuclear Power Plants* (1975), WASH-1400, NUREG-75/014, 1975.

Pandey M.D., Nathwani J.S. (2003), *Life Quality Index for Estimation of Societal Willingness – to – pay for Safety*, Structural Safety, n°26, 181-199.

Vinet Freddy (2006), *Limites méthodologiques et perspectives de la cartographie informative et réglementaire du risque inondation en France*, Laboratoire Gester, université Paul Valéry, Montpellier III, Actes du Colloque Géographes et assureurs face aux risques naturels/// Acteurs complémentaires de la connaissance et de la prévention, pages 44- 69.

Vrouwenvelder T., Scholten N.(2011), *Assessment Criteria for Existing Structures*, IABSE.

Remerciements

L'auteur remercie vivement Alaa Chateauneuf , professeur à l'Université Blaise Pascal à Clermont-Ferrand, et Henri Procaccia membre du comité directeur de l'*European Safety And Reliability Data Association* pour leur relecture de la première version de cette monographie et pour leurs remarques pertinentes.