

Chapitre 2

Historique, vocabulaire, perception

COORDONNATEUR : H. NIANDOU

AUTEUR : D. BREYSSE

Table des matières

Objectifs	7
Introduction	9
I - Le vocabulaire de base des risques	11
A. Les objectifs.....	11
B. Les sources de danger.....	12
C. Le poids du hasard.....	12
D. L'événement redouté.....	13
E. Les conséquences.....	14
F. Le risque.....	14
G. Les moyens d'agir.....	17
H. La classification des risques.....	17
1. Risques naturels et technologiques.....	17
2. Du risque individuel au risque majeur.....	18
3. Une approche adaptée au type de risques à traiter.....	19
II - Les facteurs constituants du risque	21
A. L'analyse des défaillances comme source de connaissance.....	21
1. L'effondrement du pont sur la rivière Tay.....	22
B. Illustration de quelques familles de défaillances.....	23
1. Des effondrements de ponts.....	23
2. Des effondrements de bâtiments.....	24
3. D'autres constructions : passerelles, barrages, digues.....	26
C. Défaillances et facteur humain.....	27
D. La défaillance, résultat d'une conjonction de facteurs défavorables.....	30
III - La construction sociale du risque	33
A. La perception des risques et sa représentation.....	33
1. Le concept d'aversion au risque.....	33
2. La théorie de l'utilité.....	34
3. Propension à payer pour éviter le risque : prime d'assurance.....	36

B. Exercice 3.1 : Approche empirique du concept d'aversion.....	37
C. Exercice 3.2 : Comportement des joueurs vis à vis du risque et assurance.	38
D. Exercice 3.3 : Prime de risque et aversion au risque.....	40
E. Perception et acceptation du risque individuel.....	40
1. La perception individuelle des risques.....	40
2. Le risque individuel acceptable.....	41
3. Approche statistique du risque individuel.....	41
4. Du risque couru individuellement au risque construit collectivement.....	46
F. Niveau d'acceptation du risque collectif.....	47
1. Du risque individuel au risque collectif.....	47
2. Variabilité du niveau d'acceptation collective des risques.....	49
3. Acceptabilité des risques liés aux ouvrages.....	50
G. L'évolution de la perception du risque et de son acceptation.....	51
1. Une demande croissante de maîtrise des risques.....	51
2. Une réponse politique : le principe de précaution.....	52
3. Comment concilier innovation et précaution ?.....	54
4. Le risque, objet de science ?.....	54

IV - Comment assurer une sécurité optimale ?

57

A. La recherche collective d'un degré de sécurité optimal.....	57
B. Approche économique de la sécurité.....	59
1. Les raisons d'une approche économique.....	59
2. Les bases du formalisme économique.....	60
3. Rôle du contexte économique.....	60
4. Exemples d'application du formalisme économique à la sécurité des constructions.....	60
C. Exercice 4.1 : Optimisation économique : Cas de la submersion d'un atardeau.....	61
D. Exercice 4.2 : Rôle du contexte économique.....	62
E. Limites du formalisme socio-économique.....	62
1. Limites liées aux modèles physiques.....	62
2. Limites liées aux modèles économiques.....	63
3. Limites éthiques : le prix de la vie.....	63
F. Choix du niveau de protection.....	66
1. Qui choisit ? Qui explique ?.....	66
2. Le choix du maître d'ouvrage.....	67
3. Evaluer les risques pour choisir : approches ALARP.....	67
4. Des niveaux de sécurité visés dans les projets.....	70
5. Probabilité de défaillance et réglementation de la construction.....	70
6. Assurer la sécurité des ouvrages existants.....	73

V - La question de la responsabilité

75

A. La recherche de responsables.....	75
1. La diversité des causes et des intervenants.....	75
2. Faut-il toujours un responsable ?.....	76
B. Responsabilité juridique.....	76
C. Les missions de l'ingénieur et ses responsabilités.....	77
D. Le partage des responsabilités.....	78
1. Acteurs techniques et non techniques.....	78

2. Les élus locaux.....	79
3. L'Etat et son administration.....	80

VI - Enjeux et vocabulaire de la maîtrise des risques.	81
---	-----------

A. Généralités.....	81
---------------------	----

Solution des exercices de TD	87
-------------------------------------	-----------

Glossaire	101
------------------	------------

Références	111
-------------------	------------

Objectifs



- Historique de la notion de risque.
- Différents types de risques, risques majeurs, facteur humain.
- Attitude face aux risques, droit à la sécurité.
- Rôle de la puissance publique.
- Contexte social, acceptation du risque, approches socio-économiques.
- Diversité des niveaux de réponse face aux risques.

Le vocabulaire de base des risques

Les objectifs	11
Les sources de danger	12
Le poids du hasard	12
L'événement redouté	13
Les conséquences	14
Le risque	14
Les moyens d'agir	17
La classification des risques	17

Ce chapitre introduit les définitions des vocables essentiels de l'étude des risques. Ces définitions permettront, dans la suite du parcours de Cyberrix, d'éviter toute confusion. Nous verrons que de telles confusions sont courantes, dans la mesure où on attache à des termes comme « risque » un sens différent selon la spécialité que l'on pratique ou le type de risque que l'on étudie.

A. Les objectifs



Définition : Sécurité

Dans le langage usuel, la sécurité (du latin « securus ») possède un double sens. C'est à la fois (Robert) :

- l'état d'esprit confiant et tranquille de celui qui se croit à l'abri du danger;
- la situation, l'état tranquille qui résulte de l'absence réelle de danger.

Ces deux définitions font référence au danger, mais dans un cas, il s'agit d'une situation assurée, dans l'autre la sécurité résulte d'une perception, qui peut ne pas correspondre à la réalité ("se croit").

Dans le langage technique, un système est dit en sécurité s'il est dans un état tel qu'il ne puisse pas porter atteinte à l'homme, aux biens ou à l'environnement. La sécurité est donc l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou des situations génératrices de risques.



Définition : Sûreté

Un système est dit sûr s'il est apte à satisfaire une mission donnée ou assurer les fonctions qui lui ont été assignées dans un contexte donné.



Définition : Système

Ensemble de composants (ou d'éléments) en interaction.

Selon la théorie des systèmes, il est difficile de définir simplement un système : un système complexe est composé d'éléments abstraits ou concrets en interaction, ouvert sur un environnement. Un système est considéré par rapport à des finalités, il possède des limites, il évolue dans le temps ou s'adapte : c'est la réponse du système aux actions de son environnement.

Nous qualifierons ici de « système » (naturel, technologique, organisationnel...) l'ensemble des éléments dont on veut assurer la sécurité.

B. Les sources de danger



Définition : Danger, menace

Dans le langage usuel, le danger est ce qui menace ou compromet la sûreté, l'existence d'une personne ou d'une chose (Robert).

L'AFNOR le définit comme une source potentielle de dommages. Pour l'ISO, la menace est une cause potentielle d'un incident non désiré dont peuvent résulter des dommages à un système ou une organisation [ISO/IEC 13335-1:2004] [ISO/IEC 17799:2000].

Danger et menace qualifient le phénomène qui peut induire des dommages, décrit en termes de nature, de géométrie, de caractéristiques physiques et mécaniques. Le danger peut également être défini comme une situation susceptible d'engendrer des événements indésirables.

Le danger peut correspondre à un danger objectif, provenant d'un phénomène avéré (un versant montagneux en mouvement régulier) ou potentiel (une chute brutale de rochers). L'importance du danger potentiel dépend du degré d'avancement des connaissances, puisque la réduction des incertitudes permet de mieux apprécier la réalité du danger et de l'objectiver. Le danger doit donc être régulièrement réévalué, en fonction de l'expérience acquise.

C. Le poids du hasard



Définition : Aléa

Qualifie tout événement, phénomène ou activité humaine imprévisible qui peut provoquer la perte de vies humaines, des blessures, des dommages aux biens, des perturbations sociales ou économiques ou la dégradation de l'environnement.

L'aléa qualifie le phénomène menaçant, existant ou potentiel, à l'origine des risques, Il est souvent accompagné d'une quantification : fréquence ou probabilité d'un phénomène d'une nature et d'une intensité donnée, dans une zone géographique donnée et sur une durée de référence.

En français, le même terme peut servir à décrire le phénomène menaçant (l'aléa naturel) et à le quantifier. Dans la terminologie anglo-saxonne, deux vocables (« danger » et « hazard ») permettent de distinguer la caractérisation du phénomène et sa quantification.

On distingue couramment :

- les aléas naturels[☹] (géologique et tellurique, climatique et hydrométéorologique, biologique),
- et les aléas dont l'origine est induite par les actions de l'homme (dégradation environnementale et aléas technologiques[☹]).



Définition : Hasard

Cause fictive de ce qui arrive sans raison apparente ou explicable (Petit Robert).

Ce qui relève "du hasard[☹]" est considéré comme hors de portée de la conscience humaine, imprévisible (cause cachée à la raison humaine pour Aristote). La question de l'existence intrinsèque du hasard et de la nature réelle du monde (déterministe[☹] ou non déterministe) demeure une question de philosophie des sciences, traitée par de nombreux auteurs comme Henri Poincaré ou Karl Popper (« Plaidoyer pour l'indéterminisme »).



Définition : Incertitude

État de ce qui est incertain[☹], Chose incertaine, mal connue, qui prête au doute (Petit Robert).

L'incertitude[☹] décrit toute situation en l'absence de certitude, que cette absence résulte des variations naturelles et/ou de la compréhension imparfaite que l'on a des phénomènes et des objets, soit par manque de connaissance, soit par manque d'information.

D. L'événement redouté



Définition : Défaillance d'un système

Altération ou cessation de l'aptitude d'un système, à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques (norme AFNOR NF X60-010).

Dans le contexte de la sécurité des structures (incluant les sols), la défaillance[☹] se rapporte souvent à des questions d'intégrité structurelle, et parfois à l'effondrement de la structure ou d'une de ses parties. Le terme de défaillance correspond aussi à des dysfonctionnements moins spectaculaires (relatifs au confort, à l'aptitude à l'emploi, par exemple une défaillance d'étanchéité).

La défaillance[☹] structurelle d'un ouvrage de génie civil résulte de la dégradation lente ou brutale de certaines de ses fonctions. La connaissance et la modélisation des mécanismes de dégradation (fissuration, endommagement, corrosion) permettent d'identifier les modes de défaillance, d'estimer les probabilités de défaillance[☹] et de définir les stratégies les plus adaptées au maintien des performances souhaitées.



Définition : Enjeux

Ensemble des éléments (population, bâtiments, infrastructures, patrimoine environnemental, activités et organisations) pouvant être exposés au danger.

Les enjeux sont susceptibles de subir des dommages ou des préjudices sous l'effet d'un danger. Les enjeux[☹] sont définis par leur valeur et leur vulnérabilité, dont la détermination constitue une étape de l'évaluation des risques.



Définition : Exposition au risque

Qualifie la situation dans laquelle les enjeux sont soumis au danger[Ⓐ] ou sont susceptibles de subir les conséquences d'un aléa[Ⓐ] redouté.

On l'utilise souvent en épidémiologie, pour qualifier les situations dans lesquelles les individus se trouvent dans un environnement (par exemple du fait de leurs activités) susceptible de causer des dommages.



Définition : Vulnérabilité

Susceptibilité d'un système d'enjeux à subir des dommages sous l'action d'un danger.

La caractérisation de la vulnérabilité[Ⓐ] ne fait pas l'objet d'une standardisation dans le domaine de la gestion des risques. La vulnérabilité peut être attachée au degré relatif de perte de valeur de l'enjeu quand il est affecté par un aléa de nature et d'intensité données. Elle est généralement exprimée sur une échelle de 0 (pas de perte) à 1 (perte complète). Elle correspond alors au niveau des dommages prévisibles engendrés par le phénomène considéré (entre 0 et 100 %).

A une autre échelle, la vulnérabilité[Ⓐ] exprime aussi un ensemble de conditions et de processus résultant de facteurs physiques, sociaux, économiques et environnementaux, qui accroissent la susceptibilité de la collectivité aux conséquences des aléas.

E. Les conséquences



Définition : Dommages

Conséquences[Ⓐ] d'un événement sur les biens, les personnes et les fonctions d'un système. Les dommages peuvent être exprimés en termes humains, financiers, économiques, sociaux ou environnementaux.



Définition : Gravité

Mesure de l'intensité des conséquences susceptibles de résulter de l'occurrence d'un événement indésirable (ou d'un aléa). La gravité[Ⓐ] peut aussi être utilisée en phase de prévision : c'est alors une évaluation de l'impact probable du danger.





Définition : Impact


Conséquences de l'événement affectant les enjeux. L'impact[Ⓐ] dépend de l'intensité[Ⓐ] de l'aléa et de la vulnérabilité des enjeux. Dans le domaine des risques, l'impact est en général négatif.

F. Le risque

Nous définirons le risque dans une logique correspondant aux domaines de la construction et de l'aménagement, en privilégiant le regard qui pourra être porté sur eux par les ingénieurs et scientifiques. Commençons par préciser pourquoi le danger, fut-il aléatoire[Ⓐ], et le risque doivent être clairement distingués. Nous prendrons pour cela l'exemple d'une falaise dans laquelle des blocs instables sont susceptibles de se détacher et d'affecter les personnes et les infrastructures placées à sa base.


Une instabilité de falaise peut être à l'origine d'un phénomène aléatoire : la chute de blocs rocheux. Dans ce cas l' **aléa**  peut être défini par la probabilité pour qu'au cours d'une période déterminée, un ou plusieurs blocs de volume connu atteignent le site situé en contrebas. L'éboulement dépend de plusieurs facteurs : la topographie (qui conditionne la trajectoire), la géologie (géométrie, fracturation, résistance et altération des roches), les conditions hydrologiques et climatiques (gel), l'occurrence de séismes...

La vulnérabilité  mesure les dommages provoqués par l'aléa en cas de réalisation de celui-ci. Elle est caractéristique des enjeux, constitués par l'existence des personnes, des habitations et des infrastructures susceptibles de subir des dommages. On prend en compte la vulnérabilité humaine (victimes), socio-économique (destruction de bâtiments, coupure de routes...) et environnementale (détérioration éventuelle).

Le **risque**  résulte de la conjonction de l'aléa (chute du bloc) et de l'existence des enjeux. Il n'y a donc ni risque sans aléa, ni risque sans enjeux (la chute d'une météorite en plein désert n'est pas constitutive d'un risque).







Définition : Risque

Dans le **langage courant**, le risque  est « un danger éventuel plus ou moins prévisible » (Petit Robert, 1996) ou « un danger, inconvénient plus ou moins probable auquel on est exposé » (Petit Larousse, 1997).

La **définition scientifique** du risque inclut une double dimension : celle des aléas et celle des pertes, toutes deux probabilisées. En conséquence, un risque se caractérise par deux composantes : le niveau de danger (probabilité d'occurrence d'un événement donné et intensité de l'aléa), et la gravité des effets ou des conséquences de l'événement supposé pouvoir affecter les enjeux.

Les définitions du risque dans le langage courant sont donc proches de celle que l'on attribue, en sciences du risque, au danger. Une autre confusion est possible, avec le concept de probabilité : « un événement risque de se produire », signifie qu'on peut lui attribuer une probabilité d'occurrence, sans que l'on se soucie de ses conséquences.

Les définitions du risque au sens scientifique portent le double sens aléas/pertes ou rarement aléas/gains. Ainsi le risque peut être, selon le contexte précis, caractérisé différemment, par exemple :

- Une mesure de la probabilité et de la sévérité des conséquences négatives d'un aléa sur la vie, la santé, les biens matériels ou l'environnement.
- L'espérance mathématique des dommages, pertes en vies humaines, blessés, dommages aux biens et atteinte à l'activité économique au cours d'une période de référence et dans une région donnée, pour un aléa particulier. Le risque résulte de la conjonction d'un aléa et des enjeux vulnérables en présence.
- Une mesure du danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences ¹  ¹ .
- La probabilité de conséquences nuisibles ou de pertes supposées (vies, personnes blessées, biens, activité économique interrompue ou environnement endommagé) résultant d'interactions entre les aléas naturels ou humains induits et les conditions de vulnérabilité du milieu par rapport aux capacités de réduction des effets des désastres (selon une Terminologie adoptée par l'ONU dans le cadre des catastrophes naturelles ²  ² .

On trouve cependant, comme l'illustre la figure 1.1., deux définitions assez différentes dans la normalisation internationale des risques :

1. « la combinaison de la probabilité d'un événement et de ses conséquences »

2. « la combinaison de la probabilité d'un dommage et de sa gravité »

La première définition est plutôt utilisée par les experts en risques naturels (partie gauche du graphique), qui portent traditionnellement leurs efforts sur l'aléa naturel (qu'il s'agisse de le quantifier, de le prévenir ou d'en réduire les conséquences). Le risque découle de l'occurrence de la menace potentielle, et de ses conséquences.

$$R = p(E) \cdot (V \cdot v)$$

où le risque est le produit de la probabilité de l'événement $p(E)$ par l'espérance des pertes (produit de la valeur des enjeux V par leur vulnérabilité v).

La deuxième définition est plutôt utilisée par les experts en risques technologiques (partie droite du graphique), qui ne font pas référence aux enjeux. Le système susceptible de défaillance est le système technologique étudié, et ces experts portent traditionnellement leurs efforts sur les conséquences et leur gravité.

$$R = p(E) \cdot G$$

où le risque est le produit de la probabilité de l'événement $p(E)$ par la gravité de ses conséquences.

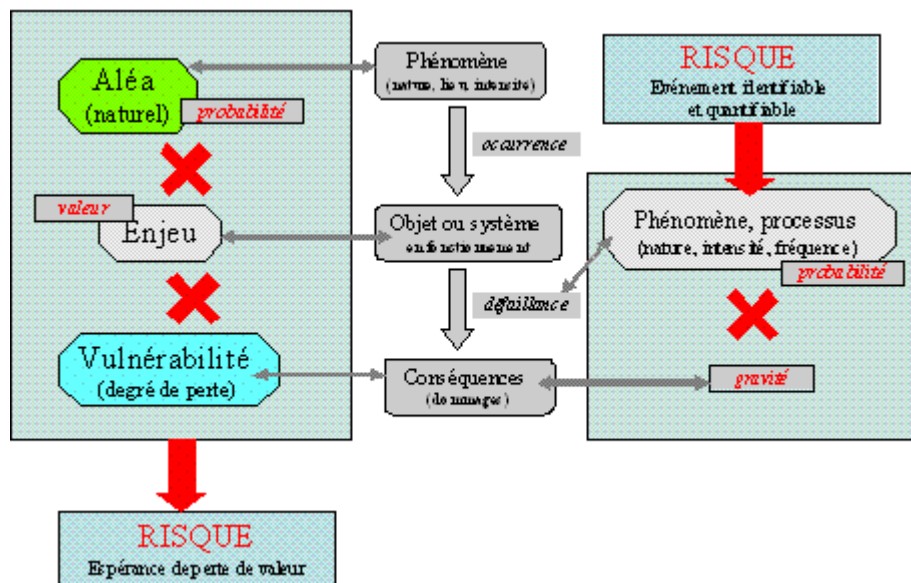


Figure 1.1 : Similitudes et différences du concept de risque pour les risques naturels et les risques technologiques.

Notons que dans ces deux définitions l'opérateur « produit » peut être remplacé par tout opérateur mathématique (produit matriciel, convolution d'intégrales, tableau à double entrée...) permettant de croiser les grandeurs liées à la probabilité d'occurrence de l'événement et celles liées aux conséquences.

G. Les moyens d'agir



Définition : Parade, défense

Toute mesure prise pour réduire ou contrer un danger ou ses conséquences. La mise en œuvre de parades est à la base de toute stratégie de réduction des risques.

Les parades relèvent souvent de mesures d'ingénierie (structurelles), mais elles

peuvent aussi intégrer des mesures non structurelles (législatives, financières, sociales...) et des outils conçus et employés pour éviter ou limiter les effets négatifs des aléas.

On distingue les parades actives, qui visent à réduire les aléas, des parades passives, qui visent à réduire les impacts (en réduisant la vulnérabilité ou en gérant les crises). On peut aussi distinguer les parades individuelles et les parades collectives, selon l'ampleur des moyens et des compétences nécessaires à leur mise en œuvre.

H. La classification des risques

D'une manière générale, les catastrophes peuvent être classées en quatre familles : naturelles (géologiques, climatiques, épidémies...), technologiques, guerres et conflits, catastrophes de société (émeutes, famines...) [Croix-Rouge, 1997]. Nous nous limiterons ici aux deux premières catégories.

Travailler sur les risques requiert aussi de préciser les thèmes traités. Les risques peuvent être classés en grandes familles, selon deux critères principaux : la nature des risques traités (ou des aléas à l'origine des risques, et l'intensité (ou la fréquence) des risques.

1. Risques naturels et technologiques

On a coutume de distinguer les risques d'origine naturelle et ceux d'origine technologique. Par abus de langage on les qualifie usuellement de risques naturels et de risques technologiques.



Définition : Risque naturel

Événement dommageable, intégrant une certaine probabilité, conséquence d'un aléa naturel pouvant survenir dans un milieu vulnérable.

Les risques naturels peuvent eux-mêmes être classés en grandes catégories, selon la nature de l'aléa : risques d'origine tellurique (volcanisme, séismes), d'origine climatique et météorologique (sécheresse, inondations, tempêtes et cyclones...), d'origine géologique (mouvements de terrain)...

Lorsque l'on parle de risques naturels, c'est en référence aux dangers en provenance du milieu naturel, par opposition aux risques environnementaux, pour lesquels l'environnement est susceptible de subir des impacts, du fait de pollutions par exemple.



Définition : Risques environnementaux

Risques affectant les écosystèmes naturels, relatifs à la beauté ou à la pérennité du milieu naturel.

Lorsque l'homme, ou l'action de l'homme est directement à l'origine du danger, on parle de risque technologique.



Définition : Risque technologique

Risque qui se caractérise par la possibilité d'occurrence d'un accident impliquant un système technique et pouvant entraîner des conséquences graves pour le personnel, les populations, les biens, l'environnement ou le milieu naturel.

Le concept de risque industriel est employé pour les situations où une installation

industrielle (usine chimique, centrale de production d'énergie...) est à l'origine de la menace. Dans le domaine du génie civil, les risques technologiques sont liés aux défaillances des structures (barrages, tunnels, bâtiments) et à leurs conséquences sur les usagers ou le milieu environnant.

L'explosion de l'usine AZF, le 21 septembre 2001 à Toulouse, est une illustration convaincante du risque industriel. Elle a causé 30 victimes, 8 833 blessés, endommagé plus de 45 000 logements dont 650 bâtiments publics pour un coût estimé entre 1 et 2 milliards d'euros.

2. Du risque individuel au risque majeur

Les risques peuvent aussi être classés selon leur gravité et leur fréquence (Tableau 1.1). Les risques les plus fréquents affectent peu d'individus à chaque occurrence. C'est leur cumul qui peut avoir des conséquences significatives. Il en est ainsi de ce que l'on qualifie de « risques de la vie quotidienne » : accidents domestiques, accidents de la route...

Fréquence	Très élevée	Moyenne	Faible
Gravité	Faible	Modérée	Extrême
Exemple	Accident de voiture avec tôles froissées. Chute de pierres sur une route de montagne	Grave accident de la route. Glissement de terrain affectant quelques maisons	Catastrophe des transports Glissement affectant une ville

Tableau 1 : Tableau 1.1 : Classification des types de risques selon la gravité et la fréquence.

La première colonne est celle du risque individuel, la troisième celle du risque majeur. L'accident majeur ou la catastrophe se définissent donc à partir de l'intensité ou de la gravité des conséquences.



Définition : Accident majeur

Événement d'importance majeure tel qu'une émission, un incendie ou une explosion résultant de développements incontrôlés survenus au cours d'une activité, entraînant pour la santé humaine ou pour l'environnement, à l'intérieur ou à l'extérieur de la zone d'activité, un danger grave, immédiat ou différé.

Par extension, un accident majeur peut caractériser la succession d'événements imprévus susceptibles de mettre en péril une activité humaine ou avoir un impact socio-économique notable, sans toucher ni à la santé, ni à l'environnement.



Définition : Catastrophe

Perturbation profonde du fonctionnement d'une collectivité ou d'une société, causant des pertes humaines, matérielles, économiques ou environnementales de grande ampleur, qui surpasse les capacités de la collectivité ou de la société affectée à les surmonter par ses propres moyens.

Rowe, cité par [Croix-Rouge, 1997] a proposé l'échelle suivante, selon le nombre de victimes : accident ordinaire (1-10), accident catastrophique (10 - 100), désastre collectif (100 - 1 000), désastre majeur (10³ à 10⁵), catastrophe majeure (10⁵ à 10⁷), super-catastrophe (10⁷ à 10⁹), catastrophe universelle (plus de 10⁹). L'OCDE définit une catastrophe comme un événement causant plus de 50 victimes, plus de 100 blessés, plus de 2 000 évacués ou plus de 50 millions de dollars US de

dégâts (1987).

En France, la MISE (Mission d'Inspection Spécialisée de l'Environnement) a établi une échelle de gravité des dommages, sous la forme d'une table à double entrée (Tableau 1.2.), qui range les événements naturels en six classes, depuis l'incident jusqu'à la catastrophe majeure.

	Classe	Dommages humains	Dommages matériels
0	incident	aucun blessé	moins de 0,3 M€
1	accident	1 ou plusieurs blessés	de 0,3 M€ à 3 M€
2	accident grave	1 à 9 morts	de 3 M€ à 30 M€
3	accident très grave	10 à 99 morts	de 30 M€ à 300 M€
4	catastrophe	100 à 999 morts	de 300 M€ à 3 G€
5	catastrophe majeure	1000 morts ou plus	3 G€ ou plus

Tableau 2 : Tableau 1.2 : Echelle de classification des événements naturels dommageables [MATE, 2002].

Selon cette échelle, les événements les plus dommageables de 2001 en France ne dépassaient pas la classe 3 (inondations en Bretagne (janvier), inondations généralisées en mars, inondations dans la Somme et l'Oise au printemps, vents violents à Strasbourg le 6 juillet, causant 13 victimes).

Sur la même échelle, les tempêtes de décembre 1999 ont atteint le niveau 5 (92 victimes et plus de 15 milliards d'euros de dégâts). Pour l'ensemble du vingtième siècle, seuls trois autres événements ont atteint la classe 5 : deux éruptions de la Montagne Pelée à la Martinique les 8 mai et 30 août 1902 et un ouragan ayant dévasté la Guadeloupe le 12 septembre 1928 (1 200 victimes). 28 autres événements ont atteint la classe 4, dont 13 inondations, 9 cyclones ou ouragans, 3 tempêtes. La liste recense aussi le séisme de 1909 dans le Sud de la France (46 victimes), l'incendie de forêt de Cestas en 1949 (82 victimes) et la sécheresse géotechnique chronique de ces dernières années.

3. Une approche adaptée au type de risques à traiter

Une approche globale des risques est nécessaire. Concernant par exemple les accidents de la route en France, la stratégie de réduction du risque ne consiste pas à prévenir, individuellement, chaque accident, mais à agir au niveau collectif, de manière à réduire les facteurs de risque[⊖] (législation plus ou moins sévère, contrôle accru du respect des règles de conduite, meilleur contrôle de l'état des véhicules, suppression des points noirs du réseau routier, intensification des contrôles de vitesse...) pour diminuer le nombre d'accidents ou leur gravité.

Le Génie Civil peut être concerné aussi bien par les risques de faible gravité mais diffus (endommagement des constructions du fait du retrait et du gonflement des argiles par exemple) que par les accidents majeurs (effondrement d'ouvrage faisant de nombreuses victimes). Nous verrons que les stratégies d'analyse et de réduction des risques devront être adaptées selon la nature, la gravité et la fréquence des risques concernés.

Ainsi, pour des enjeux individuels de grande ampleur, on pourra mettre des moyens importants : surveillance[⊖] accrue, matériaux de meilleure qualité, calculs plus sophistiqués... A l'inverse, pour des enjeux plus banals, on préférera jouer sur le cadre général (procédures normalisées de dimensionnement et de contrôle...), de façon à intégrer la réduction du risque dans une démarche statistique.

Les facteurs constituants du risque



L'analyse des défaillances comme source de connaissance	21
Illustration de quelques familles de défaillances	23
Défaillances et facteur humain	27
La défaillance, résultat d'une conjonction de facteurs défavorables	30

Le caractère récurrent des défaillances permet de les analyser pour en identifier les causes les plus courantes. Quelques exemples historiques ou récents de défaillances seront examinés (ponts, bâtiments, barrages...), ce qui permettra de mettre en lumière les rôles respectifs joués par les propriétés des matériaux, par les actions exercées sur les ouvrages (trafic, actions climatiques...) mais aussi par le contexte socio-économique et technique de la construction. Le poids du facteur humain sera mis en évidence, qu'il soit à l'origine d'erreurs ou de fautes intentionnelles. On montrera enfin qu'une défaillance ne se produit généralement que dans les situations où plusieurs causes potentielles coexistent. Ce constat servira de base à l'approche de la sécurité des constructions, qui consistera à assurer un degré de sécurité pertinent vis-à-vis de chacune des causes potentielles identifiées.

A. L'analyse des défaillances comme source de connaissance

Le risque a longtemps été évacué des préoccupations des ingénieurs qui parlaient d'action « accidentelle ». Si un séisme est une action « accidentelle », il convient de le traiter comme un accident, c'est à dire comme un phénomène rarissime. Mais, statistiquement parlant, le séisme n'a rien d'accidentel : il est tout à fait prévisible et relativement fréquent ⁹ . De même, la chute d'un bloc rocheux sur un ouvrage de protection peut-elle être qualifiée d'accidentelle, alors qu'elle justifie la présence même de l'ouvrage ?

Une culture du risque permet de poser un regard différent sur ces questions et de développer une approche alternative : le rocher risque de tomber, donc de générer des actions sur l'ouvrage, dont les propriétés peuvent être telles qu'il risque de ne pas se comporter de façon satisfaisante.

La défaillance apparaît alors non comme un accident, mais comme la conséquence logique de la conjonction de divers événements aléatoires défavorables (la chute du bloc et sa trajectoire, la résistance insuffisante de l'ouvrage), qu'il s'agit de mieux cerner si l'on vise à préciser la sécurité offerte par l'ouvrage (Perrotin, 2001).

Dans ce qui suit, le terme de « défaillance » ne devra pas être compris comme synonyme de ruine ou rupture : on considérera que le régime de défaillance est atteint dès que l'une des fonctions que doit assurer l'ouvrage n'est plus satisfaite.

Analysons à partir d'une situation concrète quels facteurs peuvent conditionner la défaillance.

1. L'effondrement du pont sur la rivière Tay

En 1878 s'achevait la construction du plus long pont du monde : sur la rivière Tay, à l'Est de l'Ecosse, ce pont métallique était destiné à favoriser le développement du chemin de fer. Il fut conçu par le plus éminent ingénieur de l'époque, Thomas Bouch. Inauguré le 31 mai 1878 par la Reine Victoria, il s'effondra le 28 décembre 1879 au cours d'une tempête (vents de force 11, soit plus de 120 km/h), au passage du train Liverpool-Edimbourg, causant 75 victimes.

Une commission d'enquête fut alors chargée de rechercher les origines de la catastrophe. Parmi les multiples causes, elle retint la conception trop légère de l'ouvrage, la faiblesse des piles (les piles devaient à l'origine être maçonnées mais les travaux ayant révélé la présence d'une couche de mauvaise qualité sous une faible épaisseur de roches saines, les briques furent remplacées par une charpente métallique en fer), la qualité de la fonte et des négligences de montage.

La plupart des concepteurs de ponts métalliques avant la catastrophe ne tenaient pas compte des efforts dus au vent pour le dimensionnement de l'ouvrage. Il était alors admis que l'assurance que l'ouvrage résiste aux efforts verticaux (poids de l'ouvrage et charges d'exploitation) suffisait pour assurer une stabilité latérale satisfaisante. En fait, les connaissances scientifiques dans le domaine des effets du vent étaient dans un état embryonnaire et il n'existait pas de consensus entre les experts. Cependant, l'environnement économique du projet semble avoir aussi joué un rôle, le budget limité et les délais très courts ayant probablement conduit Bouch au choix d'une solution non optimale pour la charpente des piles [Martin, Macleod, 1995].



Remarque

Le passage du train et la tempête pourraient être considérés comme les causes de l'effondrement, mais celui-ci ne serait sans doute pas survenu si un certain nombre d'autres facteurs n'avaient placé l'ouvrage dans une situation défavorable (conception hardie, qualité des matériaux et de la mise en œuvre, justesse des modèles de calcul...). Il est difficile, voire impossible, de quantifier le rôle exact de chacun de ces facteurs dans la défaillance finale. On peut toutefois constater la multiplicité des « facteurs d'insécurité », dont la conjonction malheureuse a conduit à la défaillance finale.

Si l'on considère le fait d'avoir des efforts très élevés, des matériaux trop médiocres, un calcul trop optimiste ou un contrôle déficient, comme autant d'événements indépendants, la probabilité de chacun de ces événements est assez élevée (peut être de l'ordre de quelques pour cent). C'est parce que la défaillance ne résulte que de la réalisation simultanée de plusieurs de ces événements qu'elle est, de fait, rare. Une telle réflexion, pour qualitative qu'elle soit, sert de base à l'approche usuelle de la sécurité en génie civil, dont nous allons progressivement développer les fondements.

Les réflexions menées après des catastrophes spectaculaires ou des accidents permettent souvent une avancée collective, sur le plan de la recherche, de la pratique ou de la réglementation. Ainsi, la réglementation évolue régulièrement en réponse à de tels événements.

Par exemple, l'analyse rétrospective de plusieurs catastrophes dans des tunnels européens dans les années 1990 (Tunnel sous la Manche, tunnel du Mont-Blanc,

avec 39 victimes, tunnel du Saint-Gothard, avec 11 victimes) a montré l'insuffisance des mesures de sécurité et le besoin d'améliorer les connaissances du comportement de ces ouvrages en cas d'incendie. Plusieurs recherches ont été mis en place dans ce but et la réglementation a été adaptée.

B. Illustration de quelques familles de défaillances

Ainsi que nous venons de le montrer avec l'exemple du Tay Bridge, l'expertise des défaillances sur des exemples concrets permet de mieux cerner les facteurs pouvant contribuer à la défaillance. Nous allons évoquer d'autres exemples avant de tirer quelques règles générales.

1. Des effondrements de ponts

L'effondrement du pont secoue la confiance sud-coréenne

Le pont de Songsu, à Séoul, s'est effondré le 21 octobre 1994. Le texte qui suit est extrait de la revue Construction today, de décembre 1994.

Dong Ah, le maître d'ouvrage responsable du pont Songsu (Séoul) qui s'est rompu en provoquant la mort de 32 personnes et en a blessé 17 autres a offert de démolir et de remplacer le pont de 1062 m de long. Il ne demandera pas à être payé pour ce travail qui sera effectué à partir de plans élaborés par une compagnie japonaise.

La fissuration due à la fatigue de pièces métalliques du treillis a causé la rupture du pont (qui avait été construit il y a 15 ans). La section à mi-travée s'est effondrée sans avertissement à 7h40 le 21 octobre, en projetant des véhicules 15 mètres plus bas, dans la rivière Nam. Les enquêteurs ont accusé le **trafic trop intense** et se sont demandés pourquoi de récents avertissements concernant la condition du pont ont été ignorés. Ils ont aussi cherché à savoir si la corruption a influencé la procédure de construction.

Le désastre a provoqué une crise politique, et pourrait ternir la réputation sud-coréenne en génie civil, qui est un sujet de fierté nationale. Le pont à plusieurs travées sur la rivière Nam était constitué d'un tablier en béton armé supporté par un ensemble de treillis métallique et avait une durée de vie estimée à 100 ans... Un expert a dit que la **fissuration de fatigue** des pièces reliant les treillis fixés aux piles aux treillis centraux (qui sont suspendus) a causé la ruine. La presse locale a évoqué des explications techniques légèrement différentes, impliquant la rupture d'attaches plutôt que celle de pièces porteuses.

Le Dr Sung Woo Lee, membre de l'équipe d'enquête payée par le gouvernement de Séoul et professeur de Génie Civil à l'Université a dit que le pont devait supporter des charges excédant celles permises par sa conception, mais que **des défauts de matériaux et de fabrication** peuvent aussi avoir contribué au désastre. L'équipe a analysé précisément l'hypothèse de rupture par fatigue... Certains éléments qui n'ont pas rompu présentent eux aussi des fissures de fatigue... L'une des premières tâches de l'enquête a été d'estimer la capacité portante de la structure à partir des dessins originaux.

L'acier utilisé a pu être importé et les **procédures d'assurance-qualité** à l'époque ne fournissent pas la preuve de sa qualité. Des questions se posent aussi quant à l'adéquation des soudures, telles que le **comportement théorique** du pont peut différer considérablement de celui de la structure réelle. Avant que le pont ne soit démolé, les enquêteurs devront achever un examen détaillé de la structure restante. Le Dr Sung a dit que les règles de construction d'il y a 15 ans pourraient n'avoir pas pris en compte les cycles de chargement et de fatigue.

Le rapide développement de la Corée du Sud a vu le trafic dépasser les prévisions.

Le pont de Songsu voyait passer environ 100 000 véhicules par jour. Le Ministère de la Construction a communiqué les Règles de Conception des Ponts d'Autoroute qui ont été suivies pour cet ouvrage. Le chargement est pris en compte sous la forme d'une charge uniforme et d'un véhicule représentatif. A l'époque de la conception, il s'agissait d'un 'DB18', véhicule à trois essieux, d'un PTC de 32.4 tonnes. En 1982, le Ministère de la Construction a fait passer la taille maximale des véhicules à celle d'un 'DB 24' (43.2 tonnes), à cause de l'augmentation du trafic, et a modifié les codes en conséquence. Le pont Songsu a été classé comme 'Niveau 1', capable de supporter tout type de trafic. Il n'apparaît pas qu'il ait fait l'objet de nouveaux calculs, ni d'améliorations structurelles à cette occasion.

De sérieux problèmes de circulation dans le centre ville ont conduit les autorités à décentraliser le trafic... De nombreux poids lourds empruntant le pont ajoutaient à la charge. Une usine de béton prêt à l'emploi s'est récemment implantée près du pont, intensifiant encore le chargement. Les chauffeurs de taxi parlaient du pont comme du « pont des poids lourds ». Le Dr Sung estime que des véhicules dépassant 60 tonnes au moins utilisaient régulièrement la structure jusqu'à l'accident.

Le désastre a soulevé le problème de la **corruption** dans l'industrie nationale de la construction. Une source a révélé que la compétition intense entre les compagnies a conduit à la corruption des responsables officiels... les travaux ne devaient coûter que 80 % du prix contractuel, les 20 % restants étant destinés au corrompu, et de nombreuses compagnies sous-traitaient les travaux, ce qui conduisait à un travail bâclé.

Il n'est pas certain que ce fût le cas pour ce pont, mais les enquêteurs examinent la qualité de la construction de l'ouvrage, édifié sous la responsabilité de Dong Ah. La responsabilité de la maintenance du pont revenait aux autorités municipales, et à une équipe de sept inspecteurs, qui avait sous sa charge 80 ouvrages dans Séoul... Les **vérifications détaillées** n'étaient pas requises pour les structures ayant moins de 20 ans, pour lesquelles on se limitait à des inspections visuelles. Des avertissements avaient été faits par plusieurs ingénieurs indépendants au cours des 19 derniers mois, apparemment sans effets...

2. Des effondrements de bâtiments

Effondrements de bâtiments en Egypte : une tragique tradition

L'effondrement d'un bâtiment au Caire a causé 6 victimes le 10 janvier 1999, lorsque des travaux de fondations pour une construction voisine ont créé une fouille de 6 m de profondeur et ont provoqué la déstabilisation de l'ouvrage. [France Inter, janvier 1999].

Ce type d'événement est fréquent en Egypte et s'inscrit dans un contexte très large d'urbanisation sauvage qui multiplie les **constructions sans permis** ou les **étages rajoutés illégalement** à des structures existantes (un accident récent a causé 70 victimes lorsqu'une banque occupant le rez-de-chaussée d'un bâtiment a supprimé 2 poteaux qui gênaient son occupation du hall). S'y ajoute la **mauvaise qualité des matériaux** employés dans les ouvrages construits dans les années 70, quand le ciment de qualité était réquisitionné par l'armée et quand les constructions civiles étaient édifiées avec du ciment médiocre en provenance des pays de l'Est. Chaque famille de victime est indemnisée à hauteur de 250 euros.

Le 27 octobre 1996, 64 personnes sont décédées et une vingtaine ont été blessées dans l'effondrement d'un bâtiment de douze étages. Un permis de construire avait été délivré en 1969 pour un bâtiment de sept étages, puis en 1977 pour un étage supplémentaire. Au fil des années, cinq avaient été construits. En 1993, le propriétaire avait été condamné à détruire le bâtiment jugé dangereux. Il est usuel au Caire **d'ajouter illégalement des étages** aux constructions existantes ; 75 %

des bâtiments neufs sont estimés illégaux [Reuters, 28-10-1996].

Le 25 février 2002, 26 personnes ont été tuées et 25 blessées dans l'effondrement d'un bâtiment de quatre étages à Damiette. La plupart étaient en train de préparer un mariage dans un salon de beauté situé dans le bâtiment. Les habitants avaient évacué l'ouvrage quelques jours plus tôt, par crainte de son effondrement. Les autorités l'avaient destiné à la démolition deux ans plus tôt [CNN 27-02-2002].



Figure 2.1. Les constructions courantes en Egypte : un désastre en puissance.

Le gouvernement égyptien avait été obligé, suite à la catastrophe de 1996 et à la colère qu'elle provoqua dans la population, de renforcer les règles de construction. Cependant, le tableau 2.1., établi à partir de diverses sources (presse et Internet) recense (sans exhaustivité) ces effondrements d'immeubles, et en illustre le caractère récurrent, à tel point que deux catastrophes se sont produites le même jour, le 28 août 2006 !

Lieu	Nombre de victimes	
Héliopolis	64	bâtiment, 12 étages
un village au nord du Caire	1	rupture de balcon
Le Caire	>5	bâtiment
Alexandrie	6	bâtiment, 2 étages
Ashmun	5	bâtiment
Tanta	5	bâtiment
Damiette	26	bâtiment, 4 étages
Le Caire	7	bâtiment, 6 étages
Dahasa	0	église
Le Caire (Madinet Nasr ?)	18	bâtiment, 12 étages
Assouan	>13	bâtiment, 5 étages
Alexandria	19	bâtiment
Alexandria	>7	bâtiment, 4 étages
Hadeyiq al-Qubba	5	bâtiment, 4 étages
Qaliubiya	3	bâtiment, 3 étages
Mansoura	7	bâtiment, 4 étages
Le Caire	3	bâtiment, 4 étages
Alexandrie	30	bâtiment, 12 étages

Tableau 3 : Tableau 2.1. Chronique des effondrements de bâtiments égyptiens.

Pour un expert égyptien, « la qualité des techniques courantes de construction en Egypte est tout simplement un désastre en puissance... sous l'effet d'un séisme, ces panneaux de brique se désintègreront et provoqueront de nombreuses victimes» (figure 2.1), <http://www.info-world.com/egypt/>¹.

Au fil de la lecture, des facteurs récurrents apparaissent (mépris des règles, matériaux trop médiocres, études insuffisantes, dimensionnement non satisfaisant...), à tel point que leur présence semble presque « normale » une fois que la défaillance s'est produite. Un dernier exemple confirme cette impression, même quand c'est un séisme qui provoque l'effondrement.

3. D'autres constructions : passerelles, barrages, digues...

Gaddis a étudié en détail la défaillance structurelle ayant causé le plus de victimes aux Etats-Unis, la rupture d'une passerelle dans le hall du Hyatt Regency de Kansas City, en 1981 (114 victimes et plus de 200 blessés) [Gaddis, 1993]. La passerelle suspendue par des tiges métalliques s'est brusquement effondrée sur les danseurs qui se trouvaient dans le hall, précipitant aussi de nombreuses personnes dans le vide. L'expertise des causes révéla deux défauts majeurs de conception : les suspentes des passerelles avaient une **résistance 40 % plus faible que celle initialement prévue** sur les plans, le dessin des assemblages avait été modifié, conduisant à des efforts deux fois plus élevés **sans que les calculs aient été refaits**. Un **manque de coordination** entre les divers intervenants du projet expliquait ces déficiences dans la réalisation de la structure [Moncarz, 2000].

La rupture du barrage de Gouhou (Chine, 1993) a causé la mort d'au moins 400 personnes [Hayward, 1993]. La rupture brutale a conduit au déversement de 2 millions de m³ du réservoir quasiment plein. Le barrage de 71 m de haut consistait en une digue de sables et graviers protégée par un voile amont de béton. La

1 - <http://www.info-world.com/egypt/>

rupture a été consécutive à des **déficiences d'étanchéité** : l'eau a pénétré le corps de la digue et a provoqué un phénomène d'érosion interne. L'ouvrage avait été conçu par un institut local de ressources en eau et édifié par un bureau régional de constructions ferroviaires qui n'avait pas d'expérience passée dans le domaine. Le **contrôle des travaux** avait été minimal et les enquêteurs ont trouvé des preuves de **réparations hâtives** autour de joints défectueux.

Les **événements climatiques** peuvent avoir des conséquences dramatiques. Ainsi, le barrage de Shakidor au Balouchistan (sud-ouest du Pakistan), s'est effondré en février 2005, ne pouvant résister à une semaine de pluies torrentielles et de chutes de neige exceptionnelles. La rupture de ce barrage de 150 mètres de long a causé plus de 80 victimes et 400 disparus.

Le 26 août 2003, une digue qui protégeait le bourg de Wilnis, aux Pays-Bas, s'est effondrée sur une longueur de 60 mètres, provoquant l'inondation du voisinage et l'évacuation de 1 500 personnes. A cause de l'exceptionnelle période de sécheresse, le niveau de l'eau dans le canal était bas et la rupture était surprenante. En fait, c'est **la sécheresse** qui a été à l'origine de l'inondation (!), en provoquant la fissuration des sols et en fragilisant le matériau de la digue. Le Ministère en charge du système de canaux a réagi en imposant le pompage de l'eau de lacs pour réalimenter le réseau de canaux.

J.M. Duncan cite l'exemple d'une tranchée creusée en 1970 dans la baie de San Francisco, en relation avec l'aménagement du port [Duncan, 2000]. Au lieu d'une pente de talus de 1/1, les ingénieurs, rassurés par un calcul de stabilité, ont extrait les terres avec un profil de talus plus raide de 1/0.875, les **gains espérés** étant de l'ordre de 200.000 euros. Deux effondrements successifs ont interrompu les travaux et conduit à adopter une solution moins ambitieuse. L'analyse a posteriori a montré que la variabilité des propriétés mécaniques des sédiments avait été négligée.

Nous arrêterons là ce qui pourrait devenir une énumération fastidieuse. La Base de Données accessible en contient de nombreux que chacun pourra découvrir librement.

C. Défaillances et facteur humain

Au bout du compte, les défaillances des ouvrages se manifestent toujours selon une logique mécanique : elle se produit parce que les effets des actions dépassent les capacités de résistance. On peut distinguer deux grandes familles de raisons :

- La capacité est « convenable », mais les actions très supérieures à ce qui était attendu : phénomènes naturels exceptionnels, actions accidentelles...
- Les actions n'ont rien d'exceptionnel mais les capacités sont notablement inférieures à ce qui était attendu, du fait de propriétés insuffisantes ou de la détérioration progressive des matériaux.

Cependant, les facteurs humains jouent souvent un rôle essentiel, que ce soit en phase de conception, de construction ou d'exploitation de l'ouvrage. L'erreur humaine peut provenir de décisions inappropriées, de connaissances insuffisantes ou de problèmes de compréhension ou de communication.



Définition : Facteurs humains

Ensemble des facteurs relatifs aux individus (psychologie, degré de préparation, vigilance...) et à leur organisation collective (organisation du travail, aspect sociaux...) qui peuvent influencer les comportements et la réponse du système d'une manière telle qu'elle peut affecter la sécurité.

Une étude sur les sinistres de construction expertisés par le bureau Véritas a montré que 82 % des désordres résultent d'une méconnaissance des sols. Dans la quasi-totalité des cas, les sinistres mettant en cause le terrain proviennent beaucoup plus de l'ignorance du comportement des sols, de l'absence de reconnaissances, d'erreurs de conception, que des incertitudes inhérentes aux paramètres mécaniques eux-mêmes. On entend souvent l'expression de « vice géotechnique », mais le sol n'est pas vicieux par nature. C'est la méconnaissance de ses propriétés, soit par incompetence, soit par souci d'économie, soit parfois parce que les variations locales sont inattendues, qui le fait apparaître tel.

Les accidents peuvent résulter de risques assumés consciemment (25 % des cas, correspondant à des niveaux de protection que l'on accepte, soit parce que l'élimination de ces risques est techniquement impossible, soit parce qu'elle n'est pas viable économiquement) ou d'erreurs humaines (75 % des cas). Ces dernières peuvent être classées en plusieurs familles [Matousek, 1976 ; Favre, 2001] :

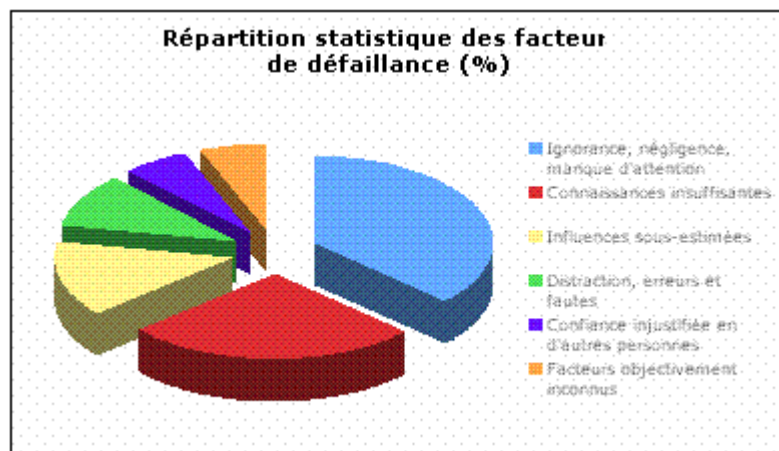


Figure 2.2. Répartition statistique des facteurs de défaillance (d'après Matousek).

La classification (taxonomie) des erreurs est une question complexe [Chao, 2004], qu'il est cependant utile d'aborder pour mieux comprendre ce qui conduit à la défaillance. Trois familles de raisons expliquent la majorité des défaillances : le manque de coordination entre spécialistes de différents champs disciplinaires, le manque de communication entre concepteurs, constructeurs et clients, l'incapacité à résister de façon optimale aux pressions (on peut qualifier de pression l'environnement économique, social, politique... ou l'ego de l'ingénieur). Réduire de façon significative la fréquence et l'importance des défaillances requiert donc d'identifier, de maîtriser et de s'efforcer de réduire les risques liés aux facteurs humains.

L'emploi de matériaux nouveaux ou de techniques innovantes, l'expérience et le niveau de connaissance de l'équipe chargée de la conception ou de la construction et l'environnement social, économique et politique sont identifiés depuis longtemps comme des facteurs de risque [Pugsley, 1973]. Walker a résumé les causes majeures de défaillance et leur pourcentage d'occurrence [Walker, 1981].

Cause	%
Mauvaise appréciation des charges ou du comportement structural	43
Erreurs dans les plans et les notes de calcul	7
Mauvaise rédaction de documents et d'instruction	4
Non respect de contraintes de documents ou d'instructions	9
Mauvaise exécution des procédures de construction	13
Mauvaise utilisation, sabotage, catastrophe, dégradation	7
Variation dans les charges, les matériaux, la qualité du personnel d'exécution	10
Autres	7

Tableau 4 : Tableau 2.2 : Causes les plus fréquentes de défaillance, d'après Walker, 1981.

Cette classification confirme l'omniprésence du facteur humain. Les erreurs provoquant des sinistres auraient pu être détectées à temps dans 32 % des cas par une revue attentive des documents, et dans 55 % des cas par des contrôles supplémentaires, si on avait adopté les bonnes pratiques [Matousek, 1976].

La défaillance est l'aboutissement d'une séquence causale complexe. Chaque stade de la séquence est affecté d'incertitudes souvent difficiles à évaluer. Certains des éléments intervenant dans les séquences causales ne sont pas aisément modélisables. C'est par exemple le cas d'une erreur de calcul grossière dans un projet ou de l'oubli d'une circonstance possible [Mathieu, 1999].

Levy et Salvadori [Levy et Salvadori, 1992] ont analysé finement les raisons d'une vingtaine de défaillances d'ouvrages. Dans leur conclusion, ils posent la question : « est-il possible de prévenir d'autres effondrements à l'avenir ? ». Selon eux, les 5 facteurs principaux qui influencent la sécurité des structures, quelles qu'elles soient, sont :

- les théories des structures,
- les techniques de calcul,
- les propriétés des matériaux,
- les nouvelles techniques de communication,
- les facteurs économiques.

Ils remarquent que la pression du temps et de l'argent est souvent la cause principale des défaillances de structures. Après avoir souligné, exemples à l'appui, que presque tous les effondrements sont dus à des erreurs humaines, ils expriment leur scepticisme quant au fait que les progrès techniques puissent seuls garantir une réduction des effondrements ; ils pourraient même augmenter. Leurs derniers mots sont : « Seule une meilleure prise de conscience de nos responsabilités humaines et sociales peut conduire à la construction d'ouvrages plus sûrs ».

D. La défaillance, résultat d'une conjonction de facteurs défavorables

La rupture résulte donc, dans la plupart des cas de la conjonction de plusieurs facteurs défavorables. Ces facteurs peuvent être liés à la prise en compte des actions (actions imprévues ou sous-estimées), à la prise en compte des capacités des matériaux (reconnaissance insuffisante, matériaux nouveaux, mal maîtrisés), à des erreurs de calcul ou de modélisation. A ces facteurs s'ajoute souvent un manque de soin dans la réalisation et des insuffisances dans le contrôle. Chacun de ces paramètres a des implications sur le niveau de sécurité de l'ouvrage. Dès lors, il est essentiel, pour réduire les risques (et les quantifier le plus exactement possible), de préciser le rôle joué par chaque facteur.



Définition : Facteurs de risque

Les éléments qui interfèrent de telle façon sur le danger qu'ils augmentent ou réduisent la probabilité d'occurrence des effets néfastes ainsi que leur intensité. L'identification des risques \Rightarrow repose sur une identification de ces facteurs, et de leur influence sur les risques.

Raikar [Raikar, 2001] rassemble en huit rubriques les causes les plus classiques des effondrements de bâtiments :

- défaut de portance du sol qui peut être du à des tassements différentiels, à la présence de cavités, à l'érosion interne du sol sous l'effet de circulations d'eau...
- basculement de l'ouvrage sous l'effet d'une dissymétrie des chargements ou des tassements induits sur les fondations,
- instabilité des poteaux trop élancés,
- défaut de résistance et écrasement des poteaux porteurs,
- défaut de résistance aux efforts gravitaires, causés par exemple par la suppression ou la modification d'éléments porteurs lors de réparations ou d'aménagements,
- mauvaise prise en compte des efforts latéraux,
- défauts de conception, par exemple sous-dimensionnement manifeste de certains éléments, pouvant conduire à des défaillances localisées,
- rupture en cisaillement, ou combinaison des causes précédentes.

L'inventaire des causes n'est cependant que le point de départ de l'analyse. Une première analyse permet de citer, en les regroupant par familles, les facteurs qui ont pu contribuer, comme cause principale ou secondaire, à la défaillance de l'ouvrage :

- les actions : actions subies par l'ouvrage non prises en compte lors de la conception, ou actions d'intensité exceptionnelle (protection non assurée a priori),
- les matériaux : propriétés des matériaux mis en œuvre (ou des sols) plus faibles que celles escomptées lors de la conception,
- les calculs : modèle de conception et de calcul erroné ou trop simpliste,
- la mise en œuvre et/ou le contrôle : qualité insuffisante de la mise en œuvre (par exemple non respect des prescriptions) et/ou contrôle insuffisant. L'exploitation : conditions d'exploitation différant sensiblement de celles prévues initialement.

L'analyse des défaillances confirme la multiplicité des facteurs qui peuvent expliquer (a posteriori) les événements observés. Elle a permis l'émergence récente d'une nouvelle spécialité d'ingénieur : le « forensic engineer ». Ce spécialiste (la traduction littérale « ingénieur forensique » est un néologisme) est, dans les pays-anglo-saxons, l'expert en analyse de défaillance [Raikar, 2001]. On peut aisément se convaincre du dynamisme de cette discipline en tapant les mots-clés « Hyatt », « failure » et « 1981 » sur un moteur de recherche. On a directement accès à plus de 100 000 références !



Définition : Ingénierie forensique

Discipline de l'ingénierie qui consiste à développer des méthodes d'investigation scientifique et à analyser les accidents pour en identifier les causes, à la manière d'une autopsie.

La maîtrise de la sécurité des constructions doit tenir compte de cette multiplicité des causes et de cette grande diversité des modes de défaillance. L'analyse pourra en être approfondie en étudiant les scénarios[Ⓐ] de défaillance, par exemple sur des familles d'ouvrages de même nature, de manière à tirer des conclusions à caractère générique.



Définition : Mécanisme de défaillance

Processus physique à l'issue duquel les performances exigées d'un système ne sont plus satisfaites. La description du mécanisme de défaillance[Ⓐ] repose sur la modélisation de la succession causale des états qui conduit à la perte de performance.



Définition : Mode de défaillance

Processus qui, à partir d'une cause intérieure ou extérieure au bien, entraîne la défaillance du bien considéré. (NF X60-010)



Définition : Scénario

Une séquence d'états intermédiaires d'un système qui permet de passer d'un état initial à un état final. Le scénario[Ⓐ] définit une suite de circonstances pertinentes pour la phase d'estimation des risques[Ⓐ].

La sécurité effective d'un ouvrage résulte donc des efforts entrepris à chacune des étapes (conception, construction, exploitation) de la vie de l'ouvrage. La multiplicité des intervenants concernés (bureaux d'étude, bureaux de contrôle, entreprises de construction, fabricants de matériaux et de produits, exploitants...) ne doit pas conduire chacun à agir au détriment de la sécurité, en comptant sur les autres pour assurer le fonctionnement satisfaisant du système. Elle justifie, au contraire, une approche rationnelle et partagée de la sécurité, où chacun peut, dans son domaine de compétence (conception, fabrication, réglementation, contrôle...), faire en sorte que les niveaux de qualité et de la sécurité visées soient assurés.

La construction sociale du risque



La perception des risques et sa représentation	33
Exercice 3.1 : Approche empirique du concept d'aversion.	37
Exercice 3.2 : Comportement des joueurs vis à vis du risque et assurance.	38
Exercice 3.3 : Prime de risque et aversion au risque	40
Perception et acceptation du risque individuel	40
Niveau d'acceptation du risque collectif	47
L'évolution de la perception du risque et de son acceptation	51

Nous allons voir dans cette partie combien les dimensions individuelles (par exemple psychologiques) et collectives (sociales) des risques sont essentielles et dans quelle mesure le regard qu'une société porte sur les risques est le produit d'un système complexe où les aspects économiques, politiques, médiatiques... jouent chacun leur rôle.

Nous introduirons le concept d'aversion au risque et la théorie de l'utilité, qui établiront un cadre formel pour expliquer les préférences que peuvent avoir les acteurs dans les situations à risque. Nous montrerons comment on peut parler de risque acceptable à l'échelle individuelle et comment les statistiques peuvent nous aider à les identifier. Nous verrons aussi comment, à l'échelle collective, le risque résulte d'une construction sociale, les exigences pouvant varier selon le contexte, l'époque... Enfin, nous présenterons le principe de précaution, qui peut servir de cadre à la prise de décision.

A. La perception des risques et sa représentation

1. Le concept d'aversion au risque

En situation d'incertitude, les individus se distinguent quant à leur appétence pour le risque. Trois attitudes sont théoriquement possibles : la recherche du risque (on parle aussi « d'amour du risque », son évitement (on parle « d'aversion au risque »), ou encore l'indifférence à l'égard du risque. Dans le premier cas, on perçoit le risque comme l'occasion de gains importants et rapides (la possibilité de se procurer des satisfactions), dans le deuxième, comme la source de pertes potentielles et, dans le troisième cas, l'incertitude n'est synonyme ni de chance ni de désagréments. **Voir Exercice 3.1 ci-dessous.**

Ainsi, alors qu'elle constitue un bon outil de prévision en contexte incertain³, l'espérance mathématique échoue à bien décrire le comportement des individus face à une loterie. Ainsi, un agent averse au risque préfère gagner 1 000 € tout de suite plutôt que de jouer à un jeu où il a une chance sur 100 de gagner 100 000 €, alors que l'espérance des gains est identique dans les deux cas.

L'aversion au risque est un comportement qui a été modélisé dans le cadre des théories économiques. C'est l'un des tous premiers principes découverts en économie. Dû à Daniel Bernoulli (1700-1782), ce principe a conduit au concept économique d'« utilité » et à la notion boursière de « prime de risque », qui ont permis de mieux comprendre les équilibres de prix et de rendements, et d'aborder leur modélisation mathématique.



Définition : Aversion au risque

Qualifie le comportement d'un individu (ou de la collectivité) face au risque. L'aversion est le comportement qui traduit la volonté d'éviter le risque, c'est à dire de réduire les probabilités de conséquences défavorables. L'aversion peut être modélisée, dans le cadre de la théorie de l'utilité, pour tenir compte de la perception négative du danger ou d'aléas dont on redoute les conséquences défavorables.



Définition : Utilité

Mesure de l'intensité⁴ de satisfaction retirée de la possession d'une ressource. La notion d'utilité est à la base de la théorie des choix en contexte d'incertitude. Elle permet, entre autres, de comprendre et de formaliser le comportement des agents face au risque. On distingue l'utilité cardinale, qui mesure directement le degré de satisfaction qu'un agent retire de la possession d'un bien, et l'utilité ordinale, qui permet de comparer et de classer des solutions, en établissant un ordre des préférences.

Il est généralement considéré que les investisseurs et les agents économiques ont une certaine aversion au risque : ils préfèrent un gain relativement sûr à un gain bien plus important mais moins probable (mieux vaut recevoir 125 euros qu'avoir une chance sur 8 d'en recevoir 1000), selon l'adage « un tiens vaut mieux que deux tu l'auras ». Toutefois, chaque agent économique (donc, en généralisant, chaque individu) a son propre comportement face au risque. C'est ainsi qu'il y a neutralité ou tolérance au risque, voire recherche du risque, pour certains d'entre eux (voire pour un grand nombre en période d'euphorie boursière).

Cependant, le comportement des joueurs de Loto montre qu'ils préfèrent jouer avec une chance sur 10 millions de gagner 5 millions d'euros plutôt que de garder l'euro que leur coûte le billet. Ce paradoxe peut être levé si l'on considère que si la perte d'un euro ne change guère la vie du joueur, le gain de cinq millions, même improbable, la transformerait profondément.

2. La théorie de l'utilité

Les travaux de Von Neumann et Morgenstern (1944) ont fondé la théorie de l'utilité, définie comme la mesure de l'intensité de satisfaction retirée de la possession d'une ressource. La notion d'utilité est à la base de la théorie des choix incertains.



Figure 3.1. Gravure représentant des joueurs.

Considérons une fonction d'utilité $u(x)$, qui fait correspondre son utilité à chaque somme x , et un jeu (expérience aléatoire) à deux issues possibles :

- issue $x = x_1$ avec la probabilité p_1
- issue $x = x_2$, avec la probabilité $p_2 = 1 - p_1$

L'espérance mathématique est $E(x) = p_1 x_1 + (1 - p_1) x_2$

On peut comparer :

- l'utilité de l'espérance $u(E(x)) = u(p_1 x_1 + (1 - p_1) x_2)$
- et l'espérance de l'utilité $E(u(x)) = p_1 u(x_1) + (1 - p_1) u(x_2)$

Ces deux grandeurs peuvent être différentes et l'on peut noter

$$E(u(x)) = u(x^*)$$

où x^* est ce que l'on appelle « l'équivalent certain », c'est à dire la valeur équivalente, sûre et certaine, qui procurerait la même utilité que l'espérance du jeu (richesse finale risquée).

Cette notion permet de comparer différentes solutions, la solution la meilleure étant celle qui procure le plus fort équivalent certain. Pour un jeu donné (ensemble de valeurs $\{x_1, x_2, p_1, p_2\}$), la valeur de l'équivalent certain dépend de l'expression de la fonction $u(x)$, et en particulier de son comportement mathématique au voisinage de la valeur $E(x)$.

Revenons maintenant sur l'exercice pour comprendre comment relier l'aversion (le comportement de l'individu) et sa préférence pour une loterie. L'analyse des choix repose sur l'hypothèse que le comportement rationnel d'un individu consiste à maximiser sa fonction d'utilité.

De manière plus générale, pour tout jeu, si on appelle $u(x)$ la fonction d'utilité, où x est la richesse finale (richesse initiale + perte ou gain éventuel probabilisé), on peut calculer :

- $E(x)$, l'espérance de la richesse finale,
- $u(E(x))$, l'utilité de l'espérance de la richesse finale,
- $E(u(x))$, l'espérance de l'utilité de la richesse finale.

On dira que l'individu est :

- indifférent au risque si $u(E(x)) = E(u(x))$
- « risquophobe », ou aversé au risque si $E(u(x)) < u(E(x))$
- « risquophile », ou chercheur de risque si $u(E(x)) < E(u(x))$

Pour un individu « normal » (l'attitude « risquophobe » est la plus répandue), il vaut mieux avoir de façon certaine une richesse d'une certaine utilité que, de manière probable, une richesse plus grande, de plus forte utilité, mais au risque de tout perdre (ici à espérance de richesse identique).

3. Propension à payer pour éviter le risque : prime d'assurance

Une fonction exponentielle est souvent employée pour modéliser la fonction d'utilité. Elle s'exprime sous la forme :

$$u(x) = 1 - \exp(-\lambda x)$$

où λ est le coefficient d'aversion au risque.

Dans ce cas, on a :

$$u'(x) = \lambda \exp(-\lambda x)$$

et

$$u''(x) = -\lambda^2 \exp(-\lambda x)$$

où $u(x)$, $u'(x)$, et $u''(x)$ désignent respectivement la fonction d'utilité et ses dérivées première et seconde et le rapport.

$$A(x) = -u''(x)/u'(x) = \lambda$$

est constant.

De manière plus générale, si l'utilité est une fonction croissante ($u'(x) > 0$), on a donc une fonction d'utilité concave ($u''(x) < 0$) pour $A(x)$ positif et convexe ($u''(x) > 0$) pour $A(x)$ négatif. On établit donc une correspondance entre la forme de la fonction d'utilité et le comportement de l'agent.

Le sujet averse au risque est « prêt à payer », par exemple en s'assurant, pour compenser la perte d'utilité résultant d'un jeu. Il est prêt à payer d'autant plus que cette perte potentielle est élevée : pour le sujet, deux jeux sont équivalents quand leurs espérances d'utilité sont identiques.

La différence peut donc ici être traduite en « prime de risque » : c'est la quantité maximale que le joueur est prêt à payer pour compenser la perte d'utilité qui résulte de la prise de risque. En payant cette prime, le joueur se replace dans une situation sans incertitude (si l'événement redouté se produit, l'assurance en compensera les effets néfastes). **Voir Exercice 3.2 ci-dessous.**

La différence entre les deux options (assurance / pas d'assurance) est liée à l'aversion au risque : elle est positive pour le sujet averse au risque (l'assurance fournit une utilité plus grande), et négative pour le sujet chercheur de risque. On appelle « prime de risque » la différence entre les espérances d'utilité des deux jeux, c'est à dire le montant que le sujet est prêt à payer pour compenser sa perte d'utilité.

Pour tirer un bilan synthétique :

- Les fonctions hyperboliques et logarithmiques, de concavité négative, correspondent à une aversion au risque.
- La fonction puissance (exposant > 1), de concavité positive,, correspond à une recherche du risque.
- La fonction linéaire correspond à un comportement neutre face au risque.

Si on revient sur la formule exposée plus haut :

$$A(x) = -u''(x)/u'(x)$$

on peut montrer que le coefficient d'aversion $A(x)$ peut, pour certaines fonctions d'utilité, varier selon les sommes en jeu. La figure 3.4 reproduit les variations de $A(x)$ pour les quatre fonctions d'utilité de l'exercice précédent.

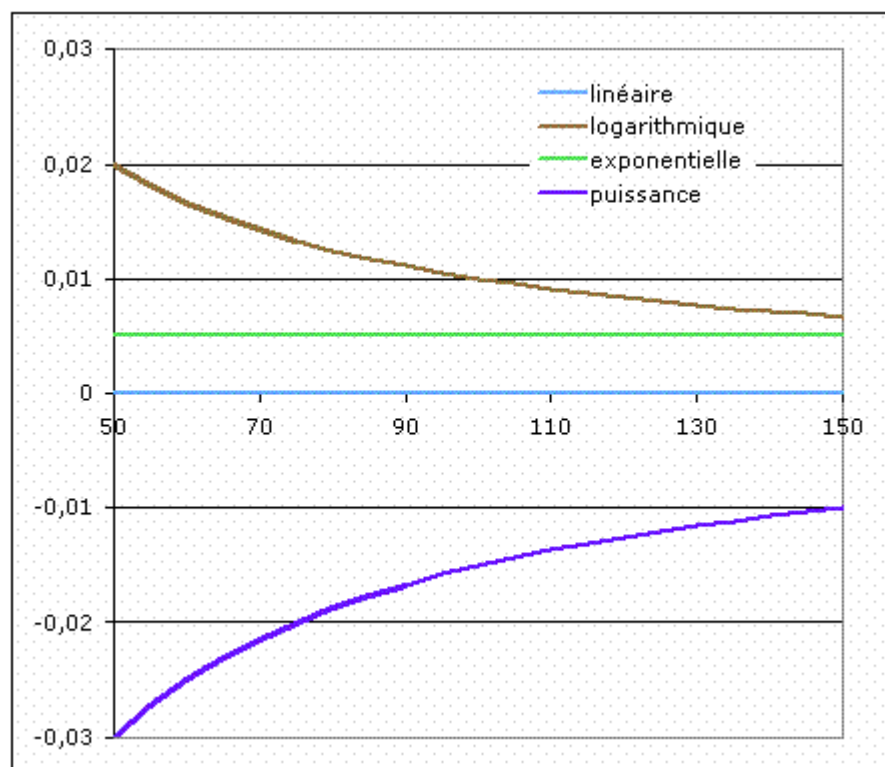


Figure 3.4. Variation du coefficient d'aversion au risque pour 4 fonctions d'utilité.

Elle montre que l'aversion est constante pour la fonction linéaire et la fonction exponentielle, qu'elle est positive et décroissante pour la fonction logarithmique (aversion qui se réduit pour les fortes valeurs de la variable), et qu'elle est négative et croissante pour la fonction puissance (recherche du risque, mais moins élevée pour les fortes valeurs de la variable). De telles fonctions peuvent ainsi rendre compte de la réalité, pour laquelle l'espoir de gagner une très forte somme, même avec une probabilité très faible, explique par exemple le comportement des joueurs aux loteries nationales.

B. Exercice 3.1 : Approche empirique du concept d'aversion.

Vous disposez d'un montant de 100 € et l'on vous propose de choisir l'une des trois loteries suivantes, reposant sur le résultat d'un lancer de dé, avec une mise de 100 €.

	Loterie 1	Loterie 2	Loterie 3
Le gain possible est de	mise + 200 €	mise + 500 €	mise + 50 €
Vous gagnez si	le dé fait 5 ou 6	le dé fait 6	le dé fait 3, 4, 5 ou 6
Vous perdez votre mise si	le dé fait 1, 2, 3 ou 4	le dé fait moins de 6	le dé fait 1 ou 2

Tableau 5 : Tableau 3.1 : Règles de 3 loteries.

Question

[Solution n°1 p 87]

Quelle loterie préférez-vous ?

Indice :

Ces trois loteries sont dites « équilibrées » (l'espérance des gains est nulle). Elles ne se distinguent que par la variance des résultats possibles. Le choix de votre loterie préférée est révélateur de votre comportement face au risque.

Si vous avez choisi la loterie 3, vous êtes « réticent au risque », comme la majorité des individus. Si vous avez choisi la loterie 2, vous êtes « chercheur de risque ». Si vous avez choisi la loterie 1, ou si vous n'avez aucune préférence, vous êtes « indifférent au risque ». Nous allons expliquer ces concepts.

C. Exercice 3.2 : Comportement des joueurs vis à vis du risque et assurance.

Considérons 4 personnes en possession d'un bien de valeur 100, soumis à un risque de destruction. La probabilité annuelle de destruction est p. Dans ce cas, le bien perd la moitié de sa valeur. Pour se prémunir des effets de cette destruction potentielle, les personnes peuvent choisir de s'assurer.

Si elles s'assurent, elles paient une prime annuelle PR et, en cas de destruction, sont indemnisées de la valeur perdue du bien. On suppose que la prime PR est telle que le jeu est équilibré (espérance de gain ou de perte nulle).

On considérera les quatre fonctions d'utilité suivantes, chaque fonction correspondant à l'une des personnes :

Linéaire	$u_1(x) = x$
Logarithmique	$u_2(x) = 21.7147 \ln x$
Exponentielle	$u_3(x) = 254.149 (1 - \exp^{-0.005 x})$
Puissance (exposant > 1)	$u_4(x) = 0.1 x^{1.5}$

Tableau 6 : Tableau 3.5 : Fonctions d'utilité choisies.

Les graphes de ces fonctions sont tracés ci-dessous. Les valeurs numériques des constantes ont été fixées de manière à ce que la valeur de $u(100) = 100$ soit identique pour les quatre fonctions. Trois des fonctions ont déjà été utilisées avec les mêmes valeurs à l'exercice 3.1.

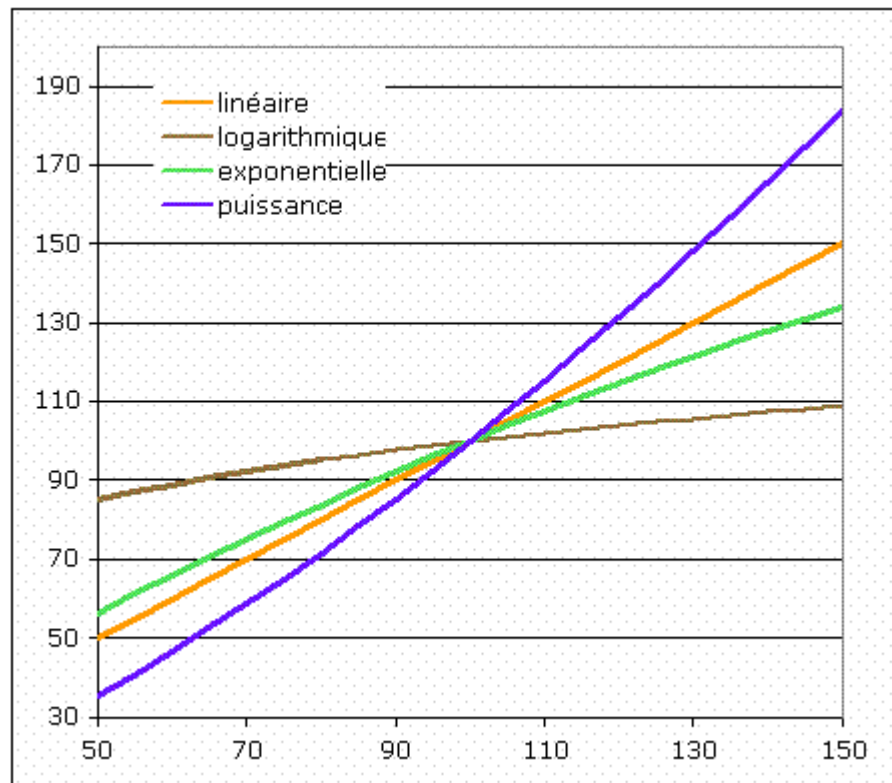


Figure 3.2 : Les fonctions d'utilité.

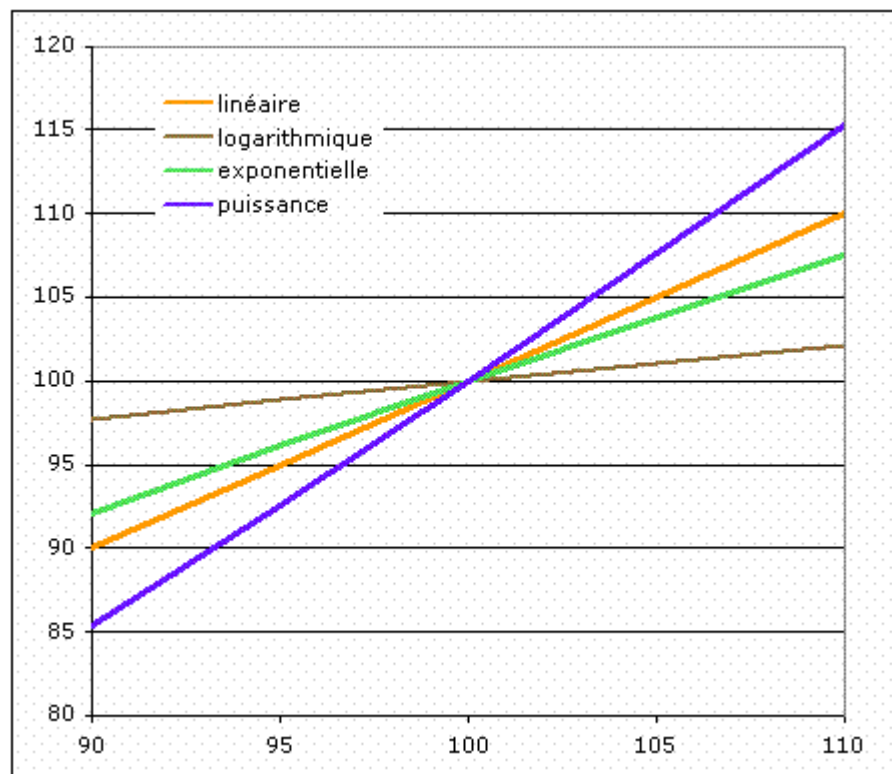


Figure 3.3 : Zoom sur les fonctions d'utilité.

Question

[Solution n°2 p 90]

On souhaite :

- Identifier quel est l'intérêt de chaque personne : s'assurer ou ne pas s'assurer ?
On fera une application numérique avec $p = 0.04$, ce qui correspond à une prime $PR = 2$, pour laquelle on vérifiera que le jeu est équilibré ;
- En déduire à quel type de comportement du sujet correspond chacune des fonctions d'utilité.

D. Exercice 3.3 : Prime de risque et aversion au risque

Etudions maintenant comment la « prime de risque » varie, pour une fonction d'utilité de forme fixée, en fonction de l'intensité de l'aversion au risque.

Supposons une fonction d'utilité de forme hyperbolique :

$$u(x) = k \times (1 - e^{-\lambda x})$$

et considérons les deux situations (assurance / pas d'assurance) de l'exercice 2, en notant PR la valeur de la prime d'assurance. On considérera qu'en cas de destruction, la perte du bien est totale, et l'indemnisation de l'assuré totale.

Question

[Solution n°3 p 92]

Montrons comment la valeur de la prime varie en fonction du risque p_1 et du degré d'aversion λ .

E. Perception et acceptation du risque individuel

1. La perception individuelle des risques

L'exposition au risque \cong est un fait partagé, ne serait-ce que parce que vivre est dangereux : on risque de mourir ! Plus sérieusement, l'attitude de chacun face au risque dépend de nombreux facteurs individuels et collectifs. Le degré de risque qui paraît « raisonnable », c'est à dire le niveau que l'on est prêt à supporter (ou à prendre) dépend de composantes psychologiques, des enjeux, du contexte économique, social et culturel. Nous avons vu comment le concept d'aversion permet de décrire et d'expliquer les comportements face au risque. Les spécialistes des sciences humaines essaient de comprendre ce qui conditionne ces comportements sur le plan individuel (psychologie) ou collectif (sociologie).

Verdel [Verdel, 2007] cite les travaux de Renn [Renn, 1998] qui a montré qu'il existe quatre types de perception usuelle des risques :

- l'épée de Damoclès : danger latent avec potentiel catastrophique très fort,
- la boîte de Pandore : une menace invisible aux effets différés,
- l'espoir d'un gain, chez les économistes et les financiers en particulier,
- la recherche de plaisir, dans les sports à risque par exemple.

Job [Job, 1995] a étudié les composantes psychologiques et sociologiques pouvant influencer la notion de risque accepté. Il montre que la perception même du niveau de risque peut varier selon les individus (âge, sexe...) et le contexte. Il a ainsi mis en évidence un « biais d'optimisme » qui conduit certaines catégories de la population à courir plus de risques que d'autres, comme dans le cas des jeunes

conducteurs. Ce biais s'explique par des raisons psychologiques (l'action individuelle est modifiée par le degré de contrôle que l'on estime avoir sur la situation) et sociologiques (poids de l'utilité du risque, c'est à dire des bénéfices attendus, réels ou estimés, de la prise de risques).

La manière dont chacun perçoit les risques qu'il court est à la base des choix individuels. Les facteurs qui influencent le plus la perception individuelle sont :

- le caractère effrayant de la menace, d'autant plus effrayante qu'elle est difficile à contrôler, catastrophique et difficile à prévenir,
- le caractère volontaire ou non de l'exposition,
- le degré de familiarité du risque.

Ces paramètres peuvent expliquer des différences significatives entre le risque réellement calculé par l'ingénieur et le niveau perçu par les individus [Hammel et Corotis, 2007].

2. Le risque individuel acceptable

Une évaluation personnelle est pratiquée inconsciemment par chaque individu. En fait, cette évaluation personnelle résulte d'une comparaison coûts/bénéfices de chaque terme de l'alternative, même si personne ne procède à une analyse formelle. Qu'il s'agisse par exemple de fumer, de pratiquer la varappe, de fréquenter les fast-foods ou du mode de conduite automobile, chaque individu adopte les choix qui lui conviennent : on pourrait dire qu'il maximise sa propre fonction d'utilité. Notons cependant, tout en demeurant à l'échelle individuelle, que ces choix sont le plus souvent contraints par des règles collectives (interdiction de fumer dans les lieux publics, code de la route, normes sanitaires...), sur lesquelles nous reviendrons.

Le problème de l'instabilité du versant montagneux de Séchilienne, en Isère, et du danger de glissement soudain de millions de mètres cubes de roches illustre les multiples facettes que recouvrent les questions de risque. En 1995, la « loi Barnier », relative au renforcement de la protection de l'environnement, a été votée. Elle a introduit la possibilité pour l'Etat d'exproprier des habitations exposées à un risque naturel majeur, lorsque les moyens de sauvegarde et de protection des populations s'avèrent plus coûteux que les indemnités d'expropriation.

La procédure d'expropriation a été appliquée sur le territoire de l'Ile Falcon, hameau de la commune de Saint Barthélémy de Séchilienne en 1997 : 115 hectares, comprenant 94 maisons et équipements publics (une école, une papeterie en cessation d'activité (Rhodia) et une centrale EDF automatisée) impliquant plus de 300 personnes, ont été expropriés. Début 2007, il restait encore 6 familles à l'île Falcon.

3. Approche statistique du risque individuel

La perception des risques varie totalement selon le point de vue duquel on se place. On ne peut d'ailleurs même pas dire que ce sont les personnes les plus exposées qui ont la conscience la plus aiguë du danger, comme le montre l'exemple ci-dessus.

Une approche plus formelle peut être menée à partir de statistiques globales qui permettent d'exprimer des niveaux de risques relatifs à divers types d'activités. Les sociétés d'assurances sont de grosses consommatrices de telles données, qui constituent la base de leur activité (barèmes, primes...). Le calcul de probabilités (par exemple le risque de décès lié à une activité quelconque) peut être fait pour

toute nature d'activité (une compagnie a même proposé d'assurer le risque d'enlèvement par les extra-terrestres !). Les statistiques établies à l'échelle de la population donnent une indication moyenne sur les risques courus à pratiquer une activité donnée. Sous l'hypothèse que chaque individu fait des choix éclairés, on peut considérer que ces valeurs correspondent aux niveaux de risques « acceptés » individuellement.

Deux indicateurs permettent de quantifier les faibles probabilités de décès, en les rendant intelligibles :

- la probabilité individuelle annuelle de décès par personne, que l'on exprime en général en 10^{-6} par an,
- le TAM – taux d'accidents mortels¹, où les mêmes données sont pondérées par la durée d'exposition au risque ou de pratique de l'activité.

¹ La dénomination anglo-saxonne est FAR = fatal accident rate. On l'exprime en général en 10^{-8} /heure, ce qui revient à quantifier le nombre de décès pour 1000 personnes pratiquant l'activité pendant 100 000 heures.

Si l'on considère que, pour simplifier, une année compte environ 10 000 heures, on peut dresser une correspondance simple entre ces deux échelles, que l'on peut graduer des risques « insignifiants » vers les risques « élevés ».

On peut alors comparer entre elles les probabilités de décès relatives à différentes activités ou les situer par rapport à des valeurs de référence :

- Le risque « **naturel** », incontournable, de mourir de causes naturelles : pour un individu de moins de 30 ans il est, dans les pays occidentaux, de l'ordre de 10^{-3} /an.
- Le risque « **résiduel** » : un niveau de risque de l'ordre de 10^{-7} /an (une chance sur dix millions) peut être qualifié de résiduel, il correspond à un niveau d'indifférence de la société [Pate-Cornell, 1994]. Un aussi faible niveau est hors de l'appréhension humaine, seule la conjonction de deux événements de 10^{-3} à 10^{-4} parlant à l'esprit. Il faut cependant avoir conscience du fait qu'un tel niveau correspond cependant à plus de 30 victimes annuelles à l'échelle de la population des Etats-Unis : le fait que ce niveau soit non perceptible individuellement ne signifie donc pas qu'il soit sans intérêt !

La figure ci-dessous synthétise ces définitions en plaçant quelques repères, depuis les risques qualifiés d'insignifiants, jusqu'aux risques qualifiés d'élevés.

TAM en $10^8/h$		Probabilité annuelle	Niveau de risque
100		10^{-2}	Élevé
10	Risque « naturel »	10^{-3}	Tolérable
1	Risque assumé individuel (niveau variable selon activité)	10^{-4}	Très faible
0.1		10^{-5}	Minime
0.01		10^{-6}	
10^{-3}	Risque « résiduel »	10^{-7}	Négligeable
10^{-4}		10^{-8}	
10^{-5}		10^{-9}	
10^{-6}		10^{-10}	Insignifiant

Tableau 7 : Tableau 3.10 : Quelques repères sur une échelle de mesure des risques individuels.

Il est alors intéressant de quantifier les risques attachés à différentes situations et d'essayer de comprendre ce qui en conditionne le niveau. Le tableau 3.11 rassemble les ordres de grandeurs des probabilités annuelles de décès (par personne et par an), tels que les ont synthétisés divers auteurs (Reid, 1999 ; Ellingwood, 1999 ; Camilleri, 2001 ; Sivardière, 2002 ; Menzies, cité par Lemaire, 2000 et Crémona, 2001). Les valeurs repères du risque « résiduel » et du risque « naturel » sont repérées par des traits gras.

	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²
liés aux ouvrages	rupture 0.1	incendies 4				
catastrophes naturelles	tornado 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

Tableau 8 : Tableau 3.11. Probabilités de décès attachés à différentes sources de danger.(valeurs du tableau exprimées en 10⁻⁶/an)

² Cette valeur correspond à un taux de mortalité de 12 pour mille.

Le postulat est que ces analyses statistiques permettent de quantifier un « risque acceptable ». Il est fondé sur l'idée que, si le niveau de risque n'était pas jugé acceptable par les citoyens, 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 constate 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).

Dans une société démocratique, l'individu peut accepter individuellement un niveau de risque très supérieur à celui qu'il accepte que la collectivité lui fasse implicitement courir. La probabilité de perdre la vie dans les activités quotidiennes normales (conduite automobile, travail...) est inférieure d'un ou deux ordres de grandeur à la probabilité normale de mourir. A l'opposé, les risques encourus au cours d'activités volontaires peuvent dépasser le risque « naturel » de 10^{-3} /an et être 100 à 1000 fois plus élevés que ceux que l'on encourt de façon involontaire, tout en demeurant acceptables.



Définition : Risque acceptable

C'est 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 y est soumis.

Le risque assumé individuel, calculé sur ces bases, dépend fortement du caractère **individuel** ou **collectif** des activités et du caractère **volontaire** (risque choisi) ou **obligatoire** (risque subi) de ces activités. On peut ainsi distinguer quatre catégories d'activités [Seiler, 2001] :

- catégorie 1 : activités permettant de satisfaire des désirs individuels, par exemple les sports dangereux,
- catégorie 2 : activités à haut degré de liberté individuelle et à bénéfice individuel direct, par exemple la conduite automobile,
- catégorie 3 : activités à faible degré de liberté individuelle et à bénéfice individuel, par exemple les activités professionnelles,
- catégorie 4 : exposition subie au risque, sans bénéfice direct, par exemple liée à la proximité d'une installation dangereuse ou à l'occupation d'un local.



Définition : Risque volontaire

Risque que prend volontairement un individu ou une collectivité dans l'objectif d'obtenir un certain bénéfice.



Définition : Risque involontaire

risque imposé à la population par la société et qui n'est pas choisi librement par la population soumise au risque.

Pour résumer, les individus, par leurs actions et leur comportement, acceptent implicitement des risques (volontaires) jusqu'à un niveau de 10^{-3} /an et tolèrent des risques involontaires mais identifiés jusqu'à un niveau de 10^{-5} /an. La tolérance pour des risques qu'ils découvrent brutalement ou qu'ils ne comprennent pas est encore plus basse. On peut écrire que la probabilité acceptée au niveau individuel s'exprime sous la forme $p(\text{décès}) = k 10^{-4}$ /an où k est une constante qui dépend du caractère volontaire et du profit tiré de l'activité, les plus faibles valeurs (soit entre 0.01 et 0.1) correspondant aux activités involontaires et à faible profit [Vrouwenwelder, 2001].

Les recherches en psychologie confirment que le grand public, dans son appréciation des risques, n'utilise pas de telles notions abstraites. Chacun apprécie généralement le niveau d'exposition au risque à partir d'un certain nombre d'éléments qui sont, par ordre d'importance décroissante, les risques de conséquences mortelles ou d'effets graves, la possibilité de circonscrire les

conséquences, le nombre de personnes exposées, la familiarité avec les conséquences et le caractère volontaire de l'exposition aux risques.

4. Du risque couru individuellement au risque construit collectivement

Intéressons-nous maintenant aux risques provenant des avalanches. L'aléa est d'origine naturelle (l'instabilité de la couverture neigeuse). Les analyses statistiques montrent que la grande majorité des victimes pratiquent des activités sportives : une étude suisse montre que près de 70 % des victimes sont des randonneurs à skis et des alpinistes, et 23 % des skieurs hors-piste [Tschirky, 1997]. C'est l'aspect « activité volontaire » dont nous avons parlé plus haut³. Le décès consécutif à une avalanche est « plus acceptable » (du point de vue de la société) pour un skieur hors-piste, qui brave délibérément le danger, que pour l'habitant d'un chalet édifié en zone constructible.

³ En France, on peut rapprocher les trente victimes annuelles d'avalanche (en moyenne) des 600 décès par noyade et de 40 à 45 victimes d'accidents de chasse [Sivardière, 2002].

Au cours de l'hiver 1950/51, les avalanches dans les Alpes suisses ont coûté la vie à 98 personnes. Parmi celles-ci 91 personnes ont été tuées au cours de deux catastrophes, la première à la fin du mois de janvier et la seconde au milieu du mois de février, dans des bâtiments ou sur des voies de communication. Après cette année la plus noire de ce siècle pour les accidents d'avalanche, les autorités suisses ont entrepris de gros efforts en vue de protéger les villages de montagne, les voies de communication et les lignes de chemins de fer menacés par les avalanches. Grâce à ces travaux permanents, aux plans des zones d'avalanches, à une meilleure information sur les risques d'avalanches et à la possibilité de déclencher artificiellement à l'aide d'explosifs des glissements dangereux de neige avant que le danger ne soit trop grand, le nombre de décès dus à des catastrophes d'avalanches a nettement diminué [Tschirky, 1997]. La société a donc élaboré progressivement des règles d'aménagement, de construction et de gestion de la montagne qui rendent suffisamment faible la destruction des habitations par les avalanches. Cela n'est pas incompatible avec la pratique tolérée du ski hors-piste.

Chacun sait que les populations des pays à faible revenu sont les plus frappées par les catastrophes naturelles : sur les 109 pires catastrophes relevées de 1960 à 1987 par l'OMS, 41 ont touché des pays en développement, mais 98.5 % des décès se sont produits dans ces pays [Favre, 1998]. Ces statistiques brutales peuvent être expliquées de plusieurs façons : une vulnérabilité supérieure du fait que ces populations habitent dans des zones à risque, un défaut relatif de protection explicable par un développement technique et économique moindre, une acceptation quasi-philosophique de la fatalité... La réalité est évidemment complexe et toute tentative de rationalisation pourra apparaître simpliste. Notre propos s'adressant avant tout à des étudiants et à des spécialistes de génie civil et d'aménagement, nous tâcherons de montrer comment, en fonction du contexte local, les solutions techniques (choix de procédés, réglementation, contrôle...) peuvent s'adapter pour répondre au mieux aux besoins de protection des populations.

Un autre facteur déterminant de l'appréhension collective du risque réside dans l'éducation de la population et dans son expérience. En comparant la gestion des risques d'inondations dans deux pays aussi différents que les Etats-Unis et le Bangladesh [Odon et al, 2000], on note que si le taux d'alphabétisation au Bangladesh n'est que de 40 %, la mousson est parfaitement connue et ses

conséquences sont attendues par les paysans. Aux Etats-Unis, la quasi-totalité de la population est alphabétisée et la grande majorité des habitants sont conscients des risques encourus par leur installation en zone inondable. La catastrophe du cyclone Katrina qui a frappé la Nouvelle-Orléans en 2005 et fait près de 1500 victimes a cependant confirmé que les victimes sont plus souvent les individus les moins bien informés ou disposant de moins de moyens.

Autre point inquiétant soulevé lors des inondations catastrophiques de Mississipi en 1993 : 18 % des sinistrés pensaient que c'était le jugement de Dieu sur les Américains pour leurs péchés. Les dimensions psychologiques qui influencent la perception des risques individuels trouvent ici un pendant à l'échelle collective. Les « croyances » de la population influencent sa perception, et donc son acceptation des risques.

F. Niveau d'acceptation du risque collectif

1. Du risque individuel au risque collectif

L'analyse statistique peut, comme à l'échelle individuelle, fournir des informations sur les risques acceptés à l'échelle de la collectivité.

Prenons l'exemple des accidents de la route aux USA [Crozier, 1988]. Le risque statistique résulte de la fréquence (15 millions d'accidents par an) et de la gravité (1 décès tous les 300 accidents), ce qui conduit à environ 40 000 décès annuels. La population concernée étant de 250 millions de personnes, le risque de décès consécutif à un accident de la route est de $40\,000 / 250\,000\,000$, soit $1.5 \cdot 10^{-4}$ par personne et par an. Cette probabilité peut être comparée à celle qui résulte des catastrophes naturelles, pour lesquelles le risque de décès est de moins de 10^{-6} par personne et par an.

Le tableau 3.12 est extrait de statistiques sur les causes de décès aux Etats-Unis en 1995 (pour une population de 252 millions d'habitants). Les probabilités y sont exprimées dans les mêmes unités que dans le tableau 3.10.

Cause du décès	Nombre total	Probabilité annuelle
Toutes causes confondues	2176000	8.6 10 ⁻³
Tous accidents	86777	3.4 10 ⁻⁴
dont		
Automobile/moto	41 000	1.6 10 ⁻⁴
Incendie	3958	1.6 10 ⁻⁵
Transport aérien	1094	4.3 10 ⁻⁶
Maladies (cancers + cardiovasculaires)	1486416	5.7 10 ⁻³
Catastrophes naturelles	181	7.2 10 ⁻⁷
Morts violentes du fait des armes à feu (suicides, meurtres, accidents)	37776	1.5 10 ⁻⁴

Tableau 9 : Tableau 3.12. Statistiques sur les causes de décès aux Etats-Unis.

Ces nombres résultent d'une construction itérative complexe (élaboration progressive de règles, de contrôle, ...) qui conduisent à des taux que l'on peut qualifier de socio-économiquement acceptés, puisqu'il s'agit des taux desquels se satisfait la société parvenue à un certain état de son développement socio-économique. Le niveau socialement acceptable dans une société démocratique résulte donc, en théorie, de l'agrégation des risques individuels acceptables.

On peut donc s'attendre à ce que la valeur de ces taux dépende en outre du niveau de développement des sociétés. Les résultats sont, au-delà de légères variations, relativement stables d'un pays à l'autre. Dans ce cadre-là, on peut justifier d'une approche socio-économique, en développant une approche d'optimisation des coûts et des bénéfices à l'échelle de la collectivité. Nous reviendrons sur ce point au Chapitre suivant.

On peut aussi s'interroger sur les modes de rétroaction et la manière dont la régulation collective opère. On peut penser que, dans une société de



communication, ce ne sont plus seulement les « sachants » qui communiquent, mais que le partage de l'information entre tous les citoyens peut conduire à des changements de mentalité et à des modifications de prise en charge des risques. Ulrich Beck, cité par Devanssay (2003), est cependant plus réservé. Il considère que l'individu n'est pas en mesure de parer les risques auxquels il est soumis.

Revenons à la question des accidents de la route. La probabilité que l'on peut quantifier à l'échelle d'un pays découle des investissements et des règles que la société a progressivement mises en place (qualité des véhicules et de leurs équipements, des infrastructures, législation routière, ...). Chaque individu est toutefois libre d'adopter une attitude personnelle qui, de fait, aboutit à augmenter ou diminuer significativement ce risque (conduire plus rapidement ou en état d'ébriété...). Le chiffre global résulte de la façon dont la société, dans son ensemble, tolère la possibilité de telles attitudes individuelles).

Il en va de même dans les domaines techniques, y compris ceux plus proches du génie civil. La rigueur des procédures de construction repose sur des règles (non forcément explicites) qui conduisent à adopter des probabilités de défaillance, acceptables par la collectivité, même si chacun peut individuellement courir (ou faire courir) des risques plus ou moins grands, par exemple en violant délibérément les normes. Il est parfaitement connu que dans un certain nombre de pays, ce n'est pas la faiblesse des règles parasismiques qui est l'explication du grand nombre de victimes en cas de séisme, mais le laxisme avec lequel elles sont appliquées.

2. Variabilité du niveau d'acceptation collective des risques

Comme les individus, les organismes n'ont pas tous la même attitude face aux risques. Ainsi, dans une étude récente sur les risques professionnels, on distinguait quatre types d'entreprises selon leur comportement face aux risques [Marmier, 2007] :

- les « résignées », qui ont une bonne connaissance des outils de prévention, s'assurent de la mise aux normes, mais dont les motivations sont défensives : éviter d'être taxées d'une mauvaise image, d'encourir des conséquences pénales, réduire le montant des cotisations d'assurance,
- les « impliquées », qui ont mis en place des politiques de prévention avec des objectifs mesurables, dans l'optique d'éviter des pertes d'exploitation et de faire baisser le nombre d'arrêts de travail. Dans leur cas, la maîtrise des risques fait partie intégrante de la stratégie de l'entreprise,
- les « spontanées », qui savent qu'elles pratiquent des activités à risque (c'est le cas en particulier des entreprises du BTP), multiplient les initiatives pour protéger leurs salariés et n'hésitent pas à communiquer sur le thème de la sécurité,
- les « détachées », qui s'estiment peu exposées et s'impliquent peu dans la prévention.

De nombreuses études statistiques permettent de comparer la criminalité dans les différents pays. Le tableau 3.13 en présente un extrait significatif [Barclay, 2002].

Afrique du sud	Russie	Etats-Unis	France	Japon
542 10 ⁻⁶	205 10 ⁻⁶	58.7 10 ⁻⁶	16.8 10 ⁻⁶	10.6 10 ⁻⁶

Tableau 10 : Tableau 3.13 : Taux d'homicide dans différents pays (1998-2000) - nombre annuel d'homicides ramené au nombre d'habitants.

Les taux varient dans un rapport de 1 à 50 selon les pays concernés, voire plus, les chiffres japonais incluant les tentatives de meurtre. Ils traduisent de grandes

disparités dans la tolérance à la violence et en particulier aux risques induits par les armes à feu, qui causent 65 % des homicides aux Etats-Unis, 39 % en France et 3 % au Japon.

Aujourd'hui, dans la société française, le degré d'acceptabilité des risques industriels se réduit. L'industrie est perçue comme une activité ancienne, dont l'importance globale dans la vie du pays décroît. La proportion des personnes qui en vit directement diminue. Cela explique en partie pourquoi le risque induit par l'industrie, et plus encore l'accident industriel, est moins bien vécu par les populations soumises au danger. Ce phénomène a été très sensible à Toulouse après la catastrophe de l'usine AZF, où il a favorisé une rupture préjudiciable entre les personnels des entreprises du site sinistré et les riverains [Rasse, 2007]. En effet, si l'on peut délibérément choisir de s'installer près d'un cours d'eau, source de danger en cas de crue, on choisit rarement de s'installer à proximité d'un site industriel.

Les exigences de la société évoluent aussi en même temps que le patrimoine. Les pays occidentaux sont aujourd'hui fortement dotés en équipements techniques (bâtiments industriels, ouvrages d'art, réseaux), dont le maintien à niveau est essentiel. La maintenance des ouvrages génère une fraction croissante de l'activité du BTP : il s'agit de remettre à niveau de performance et de sécurité des ouvrages vieillissants, de rendre conformes les ouvrages à des règles plus sévères que celles pour lesquelles ils ont été initialement conçus, de prolonger leur durée de vie... [Fuzier, 1999]. La notion de risque change, les agressions chimiques (corrosion, vieillissement chimique, lessivage...) deviennent des facteurs à étudier... Certaines situations auparavant tolérées deviennent aujourd'hui inacceptables (telle l'exposition aux peintures au plomb dans les habitations). D'autres risques, encore marginaux, commencent à être évoqués, tels ceux dus aux émanations de radon [Robé, 1998] ou à la qualité de l'air intérieur. Depuis septembre 2001, la vulnérabilité aux explosions est une préoccupation nouvelle.

La perception et les stratégies de prise en compte par les pouvoirs publics dépendent aussi des régimes politiques et de la richesse de la société. Par exemple, en Chine, l'exploitation des ressources minières en charbon est l'un des moteurs de la croissance du pays. Elle se fait dans des conditions de sécurité telles que les accidents sont nombreux. Ainsi, en 2006, on a officiellement recensé 4746 décès de mineurs (les statistiques officieuses font état d'environ 20 000 victimes). Pour une population d'environ 6 millions de mineurs, cela correspond à un TAM de 1 à 3 10⁻³/an, qui ne serait pas jugé tolérable dans d'autres contextes.

3. Acceptabilité des risques liés aux ouvrages

Pour replacer les risques techniques dans leur environnement, il importe, au-delà de quelques catastrophes spectaculaires qui peuvent faire les manchettes des journaux, de replacer les chiffres dans leur contexte. Des statistiques menées sur la ville de San Francisco en octobre 1989 ont relativisé les 70 décès consécutifs au séisme qui a ravagé la ville à cette période (10 décès liés à des causes diverses et 60 dus à l'effondrement de constructions) en les comparant aux décès liés à d'autres causes pendant la même période : 100 pour les accidents automobiles et le SIDA, 200 pour l'alcool et 700 pour le tabac. De façon générale, nos sociétés sont donc bien moins tolérantes pour les risques technologiques que pour ceux liés à d'autres activités.

Nous avons vu ci-dessus que le risque de décès consécutif à des défaillances de structures est en moyenne de plusieurs ordres de grandeur inférieur à celui des autres causes de décès, avec une probabilité individuelle de l'ordre de 10⁻⁷/an⁴. Ce niveau très faible correspond à la catégorie 4 citée au § 3.2.2. : « exposition subie, sans bénéfice direct ».

⁴ Ces chiffres ne recouvrent pas les accidents du travail dans le secteur de la construction, qui relèvent d'une autre logique.

Les synthèses statistiques sur les effondrements d'ouvrages et leurs conséquences (nombre de victimes, coûts...) sont rares. Aux Etats-Unis, on estime que les défaillances dans le secteur économique de la construction causent environ 450 décès annuels du fait de ruptures d'ouvrages et plus de 1 500 décès du fait d'accidents de chantier. Le coût direct ou indirect en est estimé à 14 milliards de dollars, soit environ 5 % du chiffre d'affaires annuel du secteur [Eldukair, 1991]. Des chiffres voisins pourraient être obtenus dans les différents pays occidentaux. Comme nous l'avons illustré au Chapitre précédent avec les exemples d'effondrements fréquents de bâtiments en Egypte, le degré d'acceptation du risque collectif est cependant plus fort dans d'autres environnements socio-économiques.

Pour les risques techniques, et en particulier ceux ayant trait aux constructions civiles, on peut aussi obtenir une estimation statistique en considérant les ouvrages comme les individus d'une population :

- pour les barrages, les observations conduisent à des nombres de l'ordre de $5 \cdot 10^{-4}$ par barrage et par an (soit à la défaillance d'un barrage sur cent en 20 ans), mais, concernant les grands barrages, Favre avance le nombre de $1.4 \cdot 10^{-5}$ par barrage et par an, soit 50 fois moins... [Favre, 1999]. En fait les résultats dépendent fortement de la population étudiée : les grands ouvrages sont beaucoup mieux surveillés et leur défaillance est plus rare. Cependant, les statistiques de défaillance des grands barrages masquent le fait que les ruptures de petits barrages causent dix fois plus de victimes que celles de grands barrages ! [Vogel, 2001],
- vingt-cinq ans de suivi des ponts autoroutiers français ont permis d'estimer le taux de défaillance à $3 \cdot 10^{-4}$ par ouvrage et par an, que la défaillance résulte de chocs, d'incendies ou de la dégradation progressive des matériaux [Trouillet, 2001]. Le chiffre de $1 \cdot 10^{-5}$ par an est régulièrement cité pour les ponts et les bâtiments.

G. L'évolution de la perception du risque et de son acceptation

1. Une demande croissante de maîtrise des risques

Pour la première fois, une enquête d'opinion (Mutualité Française-IFOP) publiée en octobre 2001 visait à cerner la façon dont les français appréhendent les risques quotidiens (Express, 2001). A la question « pour chacun des points suivants, estimez-vous que, là où vous vivez et de la façon dont vous vivez, il représente pour vous personnellement, un risque très grand, assez grand, faible ou nul ? », les réponses ont été les suivantes :

	Très grand	Assez grand	Faible	Nul
Vivre dans une résidence contenant de l'amiante	56%	25%	9%	10%
Vivre dans une atmosphère où la pollution est élevée	53%	34%	8%	5%
Résider à proximité d'un site industriel fabriquant des produits dangereux	50%	30%	12%	8%
Résider à côté d'une centrale nucléaire	45%	24%	19%	11%
Résider à proximité d'un aéroport	29%	35%	25%	11%
Faire tous les jours un trajet en voiture	19%	40%	35%	6%
Manger de la viande de bœuf	6%	18%	52%	24%

Tableau 11 : Tableau 3.14 : Appréciation du risque dans le grand public.

Les enquêteurs ont noté la généralisation du **sentiment d'exposition au risque**. Les chiffres permettent aussi de relativiser la phobie de la viande de bœuf que la « vache folle » aurait engendrée à l'époque de l'enquête chez les consommateurs. Les risques techniques révèlent une plus forte sensibilisation.

2. Une réponse politique : le principe de précaution

La Loi Barnier du 2 février 1995 a été rédigée à la suite de plusieurs catastrophes naturelles. Elle est relative au renforcement de la protection de l'environnement. Le principe de précaution²⁶ est traduit sous la forme suivante : « L'absence de certitudes, compte-tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement, à un coût économiquement acceptable ».

Ces dernières années, un certain nombre de dossiers dans les domaines des transports, de la santé publique et de l'alimentation (affaires du sang contaminé, de la vache folle, des hormones de croissance, culture des OGM, explosion de l'usine AZF, incendie du tunnel du Mont-Blanc...) ont conduit à poser et à formaliser le « principe de précaution²⁶ », en élargissant son champ d'application aux risques sanitaires et alimentaires (Kourilsky, 1999). Aujourd'hui, plus aucun champ d'activité ne peut être exclu de ce principe.



Définition : Précaution

La précaution qualifie une manière d'agir avec prudence, pour éviter un danger potentiel ou hypothétique ou en diminuer les effets. Au contraire la prévention, s'applique aux risques avérés.



Définition : Principe de précaution

Le principe de précaution définit l'attitude que doit observer toute personne (ou collectivité) qui prend une décision concernant une activité dont on peut

raisonnablement supposer qu'elle comporte un danger grave pour la santé ou la sécurité des populations et de leur environnement présents ou à venir.

Le principe de précaution doit faire prévaloir les impératifs de santé et de sécurité sur la liberté des échanges entre particuliers et entre États. Il commande de prendre toutes les dispositions permettant, pour un coût économiquement et socialement supportable, de détecter et d'évaluer le risque, de le réduire à un niveau acceptable et, si possible, de l'éliminer, d'en informer les personnes concernées et de recueillir leurs suggestions sur les mesures envisagées pour le traiter. Ce dispositif de précaution doit être proportionné à l'ampleur du risque et peut être à tout moment révisé.

Bien qu'il en existe plusieurs variantes dans le monde, le principe de précaution soutient généralement que, en présence d'une grande incertitude scientifique et d'une possibilité d'effets défavorables importants (mais possiblement imprévus), la prise de décisions administratives doit pécher par excès de prudence. Sa mise en œuvre concrète repose donc sur la nécessité de développer une culture du risque chez l'ensemble des acteurs, qui ne se réduise pas à la peur de l'incertain.

La Commission européenne, dans sa communication du 2 février 2000, sur le recours au principe de précaution, considère qu'il ne peut être invoqué que dans l'hypothèse d'un risque potentiel, il ne peut en aucun cas justifier une prise de décision arbitraire. Le recours au principe de précaution n'est donc justifié que lorsque trois conditions préalables sont remplies :

- l'identification des effets potentiellement négatifs,
- le caractère incomplet des données scientifiques disponibles,
- l'étendue de l'incertitude scientifique.

En février 2005, le Parlement français a inscrit dans la Constitution la Charte de l'environnement, installant par là-même le principe de précaution au niveau le plus élevé de la hiérarchie des normes juridiques :

« Lorsque la réalisation d'un dommage, bien qu'incertaine en l'état des connaissances scientifiques, pourrait affecter de manière grave et irréversible l'environnement, les autorités publiques veilleront, par application du principe de précaution, et dans leurs domaines d'attribution, à la mise en œuvre de procédures d'évaluation des risques et à l'adoption de mesures provisoires et proportionnées afin de parer à la réalisation du dommage » (article 5).

3. Comment concilier innovation et précaution ?

Le principe de précaution est le signe de la responsabilité face à de nouveaux risques. Il impose de nouveaux devoirs à un grand nombre d'acteurs : scientifiques, producteurs de biens et de services publics et privés, administrations, journalistes, politiques. Il implique la mise en place de dispositifs socio-techniques de définition et de gestion collectives de l'acceptabilité des risques, par exemple pour l'exposition aux rayonnements ou aux risques naturels.

Mis en pratique de manière non réfléchie, le principe de précaution est aussi potentiellement porteur de replis frileux. Comment le traduire en normes concrètes sans qu'il ne devienne un frein à l'action ou à l'innovation ? (Melacca, 2004).

Il n'est pas possible d'interpréter le principe de précaution de manière trop simpliste, telle que « si vous ne savez pas, ne faites pas ». Ainsi, par exemple, nous devons faire face aux problèmes de sécurité induits par le vieillissement d'ouvrages anciens (tunnels maçonnés du XIX^{ème} siècle, ponts...), avec des crédits limités. Les maîtres d'ouvrages doivent faire des choix, et les ingénieurs proposer des solutions techniques. La prise de risque est, dans un tel domaine, nécessaire.

Pour les constructions neuves, ou les procédés innovants, le frein potentiel existe aussi. Si dans d'autres industries le prix des prototypes est intégré dans les programmes de développement des produits, dans la construction, les prototypes sont souvent les grands ouvrages eux-mêmes. C'est leur construction qui, par l'emploi de nouveaux matériaux, de nouvelles solutions techniques, constitue le cœur de l'innovation.

Le principe de précaution ne doit pas signifier l'abandon de la volonté d'exploration. La vision libérale de l'économie considère que le principe de précaution constitue un carcan. Ainsi, les experts de la « Commission pour la libération de la croissance française », mise en place par le président N. Sarkozy et présidée par Jacques Attali ont rendu leur rapport en octobre 2007. Dans ce rapport ils recommandent l'abandon du principe de précaution, qui devrait être supprimé de la Constitution. Il faut au contraire reconquérir, par des formes démocratiques de gestion de la décision, notre capacité à transformer la menace en risque (Ewald, cité par (Reverchon, 2001)).

4. Le risque, objet de science ?

Se replaçant dans un contexte historique [Kervern, 2000] distingue de façon caricaturale trois époques dans l'approche du danger par les sociétés :

- l'âge du sang, où l'on sacrifiait humains et animaux pour s'assurer que le soleil se lèverait le lendemain,
- l'âge des larmes, celui des processions religieuses, où prières et expiation visaient à se prémunir des dangers,
- l'âge des neurones, au cours duquel le danger devient un objet de rationalisation .

Avec la multiplication de quelques catastrophes industrielles (Seveso, Bhopal, Tchernobyl, Challenger...), on a progressivement réalisé qu'il n'était plus suffisant d'invoquer le hasard ou la fatalité. En 1979, Patrick Lagadec a introduit le concept de risques technologiques majeurs. En 1987 s'est tenu à l'UNESCO le premier colloque international Cindynics, réunissant 1 475 participants issus de 30 secteurs industriels.

Progressivement le danger est ainsi devenu objet d'une étude rationnelle et la cyndinique s'est constituée en tant que discipline scientifique : la cyndinique est la science du danger. Elle étudie simultanément la perception du risque et des probabilités par les individus et les groupes et fait la critique de l'usage idéologique des modèles mathématiques utilisés pour fonder, expliquer et décrire la rationalité des comportements et des politiques. La cyndinique vient ainsi compléter la productique, la mercatique et toute la liste des '-iques' qui remplacent les '-ismes' des années 60, la pertinence et la richesse conceptuelle de ces disciplines nouvelles restant parfois à prouver [Dacunha-Castelle, 1998].

La cyndinique propose d'explorer le danger selon cinq dimensions : la base des faits (statistiques), les modèles (physique), les objectifs (politique, économique), les normes et recommandations (technique), les valeurs (éthique). Nous avons vu qu'il convient de ne pas oublier non plus les dimensions psychologiques ou sociologiques.

Nous avons vu que le regard que porte chacun sur les risques dépasse une dimension purement quantitative. La perception des risques est influencée par de nombreux facteurs, que l'on peut réduire à trois dimensions principales : la nature de la menace (difficile à prévenir ou à réduire, inéquitable, à caractère impersonnel...), la familiarité avec le problème (sa connaissance, l'immédiateté des conséquences, l'habitude...), le nombre de personnes exposées [Slovic, 2000, cité par Corotis, 2003].

Développer la culture du risque chez les ingénieurs, ce n'est pas se limiter à maîtriser le calcul des probabilités. L'ingénieur devra donc accepter qu'il n'existe rien que l'on puisse qualifier de « risque objectif » et adapter sa démarche et sa pratique quotidiennes à cette situation.

Comment assurer une sécurité optimale ?

IV

La recherche collective d'un degré de sécurité optimal	57
Approche économique de la sécurité.	59
Exercice 4.1 : Optimisation économique : Cas de la submersion d'un batardeau.	61
Exercice 4.2 : Rôle du contexte économique.	62
Limites du formalisme socio-économique	62
Choix du niveau de protection	66

La question du niveau de sécurité à viser pour les constructions et aménagements est une question clé. Nous montrerons que l'optimisation économique peut fournir un cadre utile à l'optimisation de la sécurité, même si elle connaît de nombreuses limites, tant sur le plan scientifique que sur le plan éthique : quel prix peut-on accorder à une vie sauvée ? Nous introduirons les **diagrammes fréquence-gravité** et nous illustrerons sur des exemples le choix de valeurs acceptables du degré de protection (l'indice de fiabilité, qui peut être relié simplement à la probabilité de défaillance, sera introduit.

A. La recherche collective d'un degré de sécurité optimal

Nous avons vu dans les chapitres précédents dans quelle mesure chacun peut être amené à supporter ou à accepter des risques. Dès lors, pour la puissance publique, la question à résoudre est celle de la définition du niveau de risque qu'il convient de viser pour chaque activité ou installation ^{10,10} ↴

On distinguera :

- la réflexion (et la décision) sur le niveau de risque jugé optimal : « Dans quelle mesure un niveau de sécurité est-il jugé suffisamment sûr ? »,
- l'ensemble des règles et procédures qui permettent effectivement de garantir le niveau de risque qui a été défini.

On dispose, pour répondre à la question du caractère optimal d'un niveau de sécurité, d'une gamme d'approches :

- le constat de la non intervention, qui repose sur des présupposés « libéraux » d'équilibre optimal : si aucune volonté ne se manifeste pour un changement de la situation, c'est que l'optimum est atteint,

- la mise en œuvre et le respect des normes professionnelles ou des règlements, rédigés à partir des expressions et des pratiques des « sachants », qui suppose qu'ils sont aptes à définir l'optimum pour l'ensemble de la société,
- les approches comparées, qui permettent d'exprimer des préférences (explicites ou implicites), et de faire des choix relatifs entre plusieurs situations, en simulant des alternatives, comme nous l'avons fait en introduisant la notion d'aversion au risque et de propension à payer,
- les analyses comparées des coûts et des bénéfices, qui reposent sur une formulation économique des problèmes,
- les préférences exprimées, reposant sur la perception publique des risques.

Chacune de ces méthodes repose sur des postulats discutables et leur emploi se heurte à des limites théoriques (capacité à formaliser), pratiques (difficulté de mise en œuvre), voire éthiques (déléguer à certaines catégories le pouvoir de décider, sans qu'ils soient aptes à prendre en compte les problèmes dans leur globalité). Nous allons préciser dans quelle mesure les risques et leur appréciation, en particulier en termes d'acceptabilité, relèvent d'une construction sociale.



Conseil

Le niveau de sûreté (d'une installation, d'un équipement) est donc, en phase de conception, un objectif du projet, au même titre que les spécifications techniques. Au prix de mesures de protection ou d'investissements supplémentaires, on peut atteindre en théorie n'importe quel degré de sécurité. Il convient donc de poser les questions suivantes :

1. est-il légitime de faire une analyse de risque ?
2. quel est le niveau de risque que l'on tolère ?
3. qui décide de ce niveau ?
4. comment déterminer le niveau de risque (ou le degré de sécurité) offert par un système donné ?
5. quel investissement est-on disposé à effectuer pour viser un niveau de risque ?
6. quelles dispositions techniques faut-il prendre pour obtenir effectivement ce niveau de risque ?

Répondre à ces questions requiert de couvrir des champs disciplinaires divers : socio-culturel et politique (1, 2), scientifique (3), économique et politique (4), juridique, technique, réglementaire (5). Nous privilégierons évidemment les regards scientifique, technique et réglementaire, mais l'expert en génie civil ne peut pas faire abstraction des autres dimensions de ce questionnement.

On distinguera naturellement :

- le niveau de protection que la société doit assurer pour les activités individuelle, qui dépend du caractère plus ou moins volontaire des activités (cf Chapitre précédent).
- le niveau de protection à assurer pour les risques collectifs, qui intègre une dimension humaine (risque accepté – risque tolérable – risque inacceptable) et une dimension économique : quel est le surcoût de la protection et quels sont les « bénéfices attendus » ?

Cette distinction soulève une question philosophique fondamentale [Seiler, 2001] :

- un point de vue idéaliste vise à protéger les droits des individus et à limiter les risques auxquels ils sont soumis, personne ne devant être exposé à un risque contre sa volonté,

- un point de vue utilitariste vise à maximiser le profit pour la société : il est prioritaire de réduire le risque collectif, même si le risque individuel subi par certains peut être élevé.

Dans une optique démocratique, la position légale se trouve entre ces deux extrêmes : chacun bénéficie de droits individuels et est protégé à ce titre, mais les droits individuels ne sont pas illimités et peuvent être réduits dans l'intérêt collectif. La société ne pouvant garantir un risque nul à chacun, elle doit cependant offrir à tous un degré de protection satisfaisant.

B. Approche économique de la sécurité.

1. Les raisons d'une approche économique.

(cf. chapitre précédent) Selon la théorie de l'utilité, les choix des agents économiques reposent sur la maximisation de la fonction d'utilité. Le formalisme de l'utilité permet d'attacher un équivalent monétaire à tout bien, matériel ou non et à toute ressource. Il peut donc être utilisé pour comparer différentes solutions. Dans le domaine de la santé, Weinstein [Weinstein, 1988] a montré que l'adoption de précautions par les individus dépend de :

- la susceptibilité perçue (l'occurrence estimée des événements défavorables),
- la sévérité perçue (le risque estimé, découlant de la vulnérabilité),
- l'effectivité perçue de la précaution (l'efficacité des parades),
- les coûts perçus de la précaution (en argent, en temps, en efforts requis...).

Ainsi, inconsciemment, et sans formalisation, une démarche d'optimisation économique semble guider le comportement individuel face au risque ! L'idée est que la collectivité, comme l'individu, cherche à améliorer la sécurité si les conséquences des défaillances sont trop coûteuses. A l'inverse, si le coût des défaillances évitées est inférieur au coût de mesures de sécurité plus sévères, on jugera que la sécurité est suffisante. Ces coûts et le degré d'acceptabilité varient en fonction du contexte socio-économique et de l'aversion des acteurs.

Ainsi, dans le domaine des transports aériens, l'organisation de l'aviation civile internationale garantit un risque de l'ordre d'un accident pour 100 000 décollages. Il existe cependant des disparités selon les compagnies, car la sécurité a un coût. Ainsi, des statistiques établies sur un million de vols depuis 1970 révèlent l'absence d'accidents pour certaines compagnies (SAS, Qantas...) et des taux très élevés pour d'autres (AeroPeru, Cubana, China Airlines...) [Sciences et Avenir, 7-1998].

De telles disparités existent dans le domaine de la sécurité routière. L'analyse de données britanniques et belges¹¹ (ces données ne sont pas disponibles en France) montre que la probabilité de décéder des suites d'un accident dépend du modèle de véhicule utilisé. Un facteur 3 est relevé entre les modèles les moins sûrs (Citroën 2CV et Dyane, Fiat 126, Rover Mini, Fiat Panda) et les modèles les plus sûrs (Mercedes 200 et 300, Volvo 200 et 700, Peugeot 505). Nous reviendrons plus loin sur les considérations éthiques que de tels chiffres peuvent susciter.

¹¹ <http://securiteroutiere.info/autos.html>², page consultée le 18 mars 2008.

2. Les bases du formalisme économique

On peut formuler le problème de risque comme un problème de décision économique dans lequel on étudie la relation entre la probabilité d'accident et le coût de la solution.

Supposons que la variable soit la probabilité de défaillance pF du système (pF). Une faible probabilité correspond à un système sûr, et une forte probabilité à un système peu sûr. On peut exprimer le coût de conception et de construction du système $C1(pF)$: en considérant que plus le système est sûr, plus son coût sera élevé, $C1(pF)$ apparaît donc comme une fonction monotone croissante.

A ce coût de conception et de construction, il convient d'ajouter le coût résultant des défaillances : si la probabilité de défaillance est pF sur la durée d'étude et si le coût unitaire de la défaillance est S (coût des dommages résultant des défaillances), le coût des défaillances s'écrit $S pF$. Il décroît naturellement quand le degré de sûreté du système augmente.

Ainsi le coût total s'exprime

$$C = C1(pF) + A (S pF)$$

où A est un opérateur d'actualisation économique.

La solution optimale est obtenue en recherchant le minimum de cette fonction. Bien entendu, on peut enrichir l'expression des coûts, de façon à intégrer des coûts dérivés, comme le coût de maintenance (lui aussi fonction du degré de sûreté), ou préciser l'expression de la fonction S . Ainsi, on peut par exemple écrire S sous la forme :

$$S = So + pD/F. N . s$$

où So est le coût des dommages matériels, N l'effectif de la population affectée par la défaillance, s est la valeur économique que l'on attache à chaque individu et où pD/F est la probabilité pour qu'un individu soumis au danger soit en réellement touché.

Voir Exercice 4.1 ci-dessous.

3. Rôle du contexte économique

Reprenons l'exercice précédent pour voir comment le contexte économique peut conditionner la solution optimale :

Voir ci-dessous : Exercice 4.2 : Rôle du contexte économique.

4. Exemples d'application du formalisme économique à la sécurité des constructions





Exemple

Pour illustrer l'approche socio-économique des risques, on cite fréquemment l'exemple de l'aménagement des digues protégeant les Pays-Bas d'une submersion par les eaux de la Mer du Nord et des fleuves (Rhin et Escaut). A la suite d'inondations catastrophiques (1 863 morts et 9 000 bâtiments détruits le 1er février 1953), la volonté politique fut de rendre une future catastrophe impossible. Mais les ingénieurs démontrèrent que cet objectif était irréaliste et un compromis fut trouvé, le dimensionnement des ouvrages reposant sur le caractère explicite des critères de décision technico-politiques.

Le Delta Committee fut mis en place par le Ministère des Transports et des Voies Navigables pour réfléchir à un nouveau système de défense contre les inondations venant de la mer et des cours d'eau [Van Dantzig, 1954, Hubert, 1999]. Le choix

de l'optimum retenu correspondait aux hypothèses suivantes :

- période de retour choisie pour la crue dont on souhaite se protéger : 10 000 ans, ce qui correspond à un niveau des eaux supérieur de 5 m au niveau de la mer (résultant des effets astronomiques et des effets du vent) ⁷ , pour le centre du pays et 4 000 ans pour les régions au nord et au sud du pays ⁸ ,
- population affectée prévue : 50 000 décès en cas de défaillance,
- valeur de la vie humaine : valeur actualisée du PNB par habitant.

Les évaluations monétaires des dommages potentiels permettent d'estimer [Hubert, 1999, p. 88] :

- Les enjeux dans les zones à risque et les dommages engendrés par un événement d'intensité donné, ou correspondant à un coût annuel moyen des dommages.
- Ces mêmes coûts pour différentes variantes d'aménagement ou de solutions techniques.
- La réduction des coûts des dommages attendue d'un projet ou d'une politique de gestion.

En résumé, les évaluations monétaires peuvent servir de base au choix des niveaux de protection et faire en sorte que ces choix soient présentés de manière objective. L'approche économique du risque a de nombreuses applications, la plus répandue étant celle de l'assurance : c'est bien par la comparaison des risques encourus et des recettes attendues que sont estimées les possibilités de couverture financière des risques. Nous allons cependant voir que l'approche économique n'est pas une panacée et qu'elle se heurte à un certain nombre de limites.

C. Exercice 4.1 : Optimisation économique : Cas de la submersion d'un batardeau.

Durant les travaux de fondation en rivière d'une pile de pont, on construit un batardeau provisoire, de façon à effectuer les travaux à sec. Le coût de construction du batardeau augmente avec sa hauteur H au-dessus de la côte de référence de la rivière et s'exprime sous la forme :

$$C = C_{ref} + 1000H \quad (\text{unité monétaire})$$

Le batardeau peut être submergé à la suite d'une surcôte h de la rivière. La probabilité d'occurrence des surcôtes (pendant la durée des travaux) résulte d'une analyse statistique des données hydrologiques. Elle est fournie sous la forme d'une loi exponentielle :

$$p(h > H) = \exp(-H/2)$$

Cette probabilité est d'autant plus faible que H est élevée. Elle est égale à l'unité si $H = 0$, et tend vers zéro quand H tend vers l'infini.

En cas de submersion les coûts de pompage et de retard sont évalués à :

$$C_s = 10000 \quad (\text{unités monétaires})$$

On analysera aussi le cas où la submersion peut provoquer des victimes.

Question

[Solution n°4 p 94]

- Quelle est la valeur de H qui minimise le coût généralisé de l'ouvrage ?
- Que devient cette valeur optimale si la submersion risque de provoquer des victimes ? On étudiera le cas où la probabilité d'avoir des victimes en cas de submersion est de 10 % et le nombre moyen de victimes est de 5.

D. Exercice 4.2 : Rôle du contexte économique.

Comparons la construction de la solution optimale pour deux contextes macro-économiques, censés correspondre au cas d'un pays développé (cas A) et d'un pays en voie de développement (cas B), en les distinguant par la valeur de S. On reliera pour cela la valeur de S au PNB par habitant. Les aléas (expression de la probabilité de submersion) sont censés être identiques.

On fera les hypothèses suivantes :

Cas A	Cas B
$C = C_{ref} + 1\,000\,H$	Coûts techniques (construction, pompage...) divisés par 4 : $C = C_{ref} + 1\,000\,H$
$C_{vict} = 100\,000$	Coûts des victimes divisés par 10 : $C_{vict} = 10\,000$

Tableau 12 : Tableau 4.1

Question

[Solution n°5 p 96]

Comparer et analyser les solutions optimales.

E. Limites du formalisme socio-économique

Dès 1954, Van Dantzig a souligné les difficultés liées à un calcul économique dans le domaine des risques, aussi bien sur le plan de la physique que sur celui de l'économie [Van Dantzig, 1954].

Formulons le problème de décision ainsi : « compte-tenu du coût de construction, des pertes matérielles consécutives à la rupture de la digue et la distribution de fréquences des hauteurs de mer, déterminer la hauteur optimale des digues ».

Si la solution mathématique de ce problème est relativement aisée, comme on vient de l'illustrer sur les deux exercices précédents, les difficultés viennent de la prise en compte d'hypothèses réalistes, aussi bien sur un plan technique que sur un plan économique.

1. Limites liées aux modèles physiques

Le dimensionnement des digues doit intégrer le fait que pour des raisons d'ordre climatique et géologique, le niveau relatif de la mer s'élève : du fait de la fonte des pôles, mais aussi de mouvements tectoniques (les Pays-Bas ont plongé d'environ 100 m depuis 10 000 ans du fait que la Scandinavie, moins chargée de glaces, s'est relevée, et la surrection des Alpes a encore un effet). La vitesse de « plongement » estimée pour les Pays-Bas est de l'ordre de 20 cm par siècle, ce qui conduit à 20 mètres sur une période de 10 000 ans ! Une grande incertitude règne sur les

valeurs exactes de ces nombres, que l'on peut estimer à 70 cm par siècle. Enfin, le pompage continu de l'eau dans les polders contribue à l'affaissement des terres, évalué à 40 cm en 50 ans... Pour ne pas être amené à surdimensionner exagérément les digues, il faut donc admettre qu'on les rehaussera régulièrement.

2. Limites liées aux modèles économiques

Quel économiste peut faire des prévisions sur la valeur des taux d'intérêt à des échéances de l'ordre de plusieurs dizaines d'années ? Pour Dacunha-Castelle (1996), les limites des modèles mathématiques sont évidentes : « Les critères économiques étalent dans le temps l'importance des pertes dues à un accident en appliquant le trop fameux taux d'actualisation bancaire, les 5 % annuels. Celui-ci est le plus souvent sans rapport avec la question, il est cependant introduit presque systématiquement dans les rapports des experts ! [...] Même si rien n'oblige a priori à se placer dans un cadre monétaire, cela est devenu la règle ».

L'évaluation du coût des dommages est, elle aussi, difficile. Mais, comme le précise une étude récente [Gaume, 2000], « le calcul du coût des dommages vise bien évidemment à fournir des ordres de grandeur. Le coût des dommages potentiels, difficiles à répertorier, doit s'ajouter à celui des dommages évités. Par ailleurs les analyses reposent sur la situation d'urbanisation actuelle et sur des choix de scénarios possibles de développement ». Les études de cas dans le domaine des inondations contribuent sur le plan méthodologique à l'évaluation des coûts [Hubert, 1999, p. 31]. Parmi les pertes, on distingue les coûts directs (remplacement ou réparation des biens matériels touchés, dépenses engagées lors de la crise) et les coûts indirects (biens qui ne seront pas produits, services non fournis, activités empêchées...). Il ne faut pas non plus oublier dans le bilan les gains correspondant aux activités induites par la catastrophe. On peut procéder à une analyse sectorielle en distinguant la zone sinistrée proprement dite, une zone d'influence qui subit ou bénéficie économiquement des conséquences et une zone externe, qui intervient par le biais de relations financières institutionnalisées (banques, assurances, organismes publics...).

Corotis et Enarson (Corotis, 2004) approfondissent la réflexion sur la valeur des enjeux. Le degré de protection choisi sera plus important pour un ouvrage « sensible » que pour un bâtiment courant. Mais il convient, selon eux, d'intégrer d'autres dimensions à cette analyse. La valeur patrimoniale, voire symbolique, de certains enjeux devrait être prise en compte. Ainsi, certains bâtiments revêtent une valeur très importante pour une communauté et la notion de vulnérabilité sociale (collective) devrait être intégrée dans l'analyse.

3. Limites éthiques : le prix de la vie

Enfin, se pose le problème pratique et éthique de l'évaluation financière des vies humaines elles-mêmes, dont nous avons vu la forte influence sur le choix de la solution optimale. Les chercheurs en économie du Delta Committee ont attiré l'attention des décideurs sur l'importance des dommages indirects et des pertes intangibles (préjudices humains et désorganisation des activités économiques), tout en reconnaissant leur incapacité à les évaluer, faute de méthode disponible [Hubert, 1999]. La difficulté de placer sur le même plan des coûts matériels et les répercussions en termes de vies humaines se rapproche de celle de l'évaluation des coûts environnementaux (quel est le coût du bruit ? ou celui du silence ? quel est le coût de la pollution ?).

Dacunha-Castelle (1996) souligne les limites de l'approche économique et de la formalisation excessive des coûts : « ...mathématiser est toujours donner un prix à

des choses qui n'en ont pas : la vie, le confort, le plaisir, ou même la justice. Le citoyen doit donc être à même de percevoir le prix qui est fixé par l'institution et le critère sur lequel sont ou vont être fondées les décisions... Il n'y a pas d'éthique universelle pour savoir qui doit décider des prix à attribuer aux conséquences des divers événements, quel consensus on doit atteindre, quelle place donner à l'efficacité ou à l'équité. Qui dira la place du temps dans les bénéfices que l'homme doit attendre de son action, de ses efforts, de ses investissements ? ».

La « valeur de la vie » peut être estimée à l'échelle individuelle aussi bien qu'à l'échelle collective, par exemple dans le cadre de la théorie de l'utilité, mais répondre à la question : « quelle somme souhaitez-vous recevoir pour compenser une augmentation de votre probabilité de décès ? » reste purement théorique [Lutter et al, 1999]. La seule solution pratique consiste à analyser les pratiques individuelles d'un point de vue statistique et à en tirer des indications en comparant le coût des précautions et le gain en terme d'espérance de vie. A l'échelle collective, on peut aussi analyser les indemnités compensatrices pratiquées par les tribunaux ou par les assurances, ou travailler en utilisant le concept de « willingness-to-pay » (propension à payer), c'est-à-dire examiner les sommes engagées pour réduire la mortalité.

« Des victimes peu coûteuses... » : tel était le titre de coupures de presse quelques jours après le crash sur le quartier du Queen's d'un Airbus A300 qui assurait la liaison entre New-York et Saint-Domingue, le 12 septembre 2001 : « La catastrophe devrait coûter moins cher que prévu aux assureurs, vu la nationalité des passagers, pour la plupart des Dominicains... C'est horrible à dire mais [...] leur indemnisation coûtera moins cher que pour des Américains ». L'assureur qui transmettait cette information sous le couvert de l'anonymat expliquait que les critères d'indemnisation étaient calculés en fonction du revenu⁵.

⁵ Dans un rapport rédigé en 1996, l'Académie des Sciences (CADAS, 1996) reprenait le chiffre de 1,6 million de francs, soit environ 240 000 euros, utilisé par les sociétés d'assurance, pour estimer le coût d'une vie.

Dans une étude sur les transports, le Rapport Boiteux [Boiteux, 1994] a utilisé la notion de capital humain compensé (où l'on évalue la perte de production annualisée résultant du dommage) et est arrivé aux chiffres suivants : tué = 550 000 €, blessé grave = 56 000 €, blessé moyen = 30 000 €, blessé léger = 12 000 €. On peut ainsi, sinon rationaliser, du moins légitimer et arbitrer entre différentes solutions techniques, par exemple pour supprimer des points-noirs sur les routes.

On peut contourner la difficulté éthique de fixer la valeur d'une vie humaine en utilisant le concept de « valeur équitable de la vie sauvée », en comparant plusieurs stratégies permettant de sauver des vies :

- en réduisant les risques sur le problème étudié et en sauvant directement des vies,
- en dépensant la même somme globale pour sauver des vies dans un domaine comparable.

On parle aussi de « valeur de la vie statistique », dont la valeur médiane a été estimée en 1995 à 42 000 dollars [Tengs et al, 1995], mais la valeur de la vie statistique varie largement selon le domaine dans lequel la réglementation a été mise en œuvre, par exemple de 200 000 dollars pour la protection incendie dans les avions à 1.3 million de dollars pour les airbags latéraux des automobiles et à 89.3 millions de dollars pour la maîtrise de l'amiante dans les locaux [Lutter et al, 1999]. En fait, une telle évaluation en dit plus sur l'efficacité relative des réglementations que sur la valeur de la vie humaine.

Cette question a pris une importance particulière depuis 2001, dans la mesure où l'on peut s'interroger sur la nature, l'efficacité et le coût des mesures à prendre pour réduire la vulnérabilité des bâtiments à des explosions ou à des attaques

terroristes. Ces comparaisons ne sont cependant légitimes que si le périmètre de décision est constant, c'est-à-dire si les organismes concernés et maîtres des dépenses sont les mêmes. Ainsi, l'Etat ou une entreprise peut privilégier de renforcer la prévention dans tel ou tel domaine, en y affectant ses ressources de manière prioritaire, au détriment d'un domaine dans lequel la sécurité aura été jugée satisfaisante. En pratique, la plupart des « estimations raisonnables » de la valeur de la vie humaine se situent dans la fourchette de 3 à 7 millions de dollars (de 2 à 5 selon [Hammel et Corotis, 2007]).

Une autre approche consiste à développer une approche macro-économique pour calculer le « manque à gagner » qui résulte pour la société du décès d'un individu, en termes de perte de production économique. L'indicateur LQI (« life quality index » ou « indicateur de la qualité de vie ») a été proposé à la fin des années 1990 [Rackwitz, 2003] pour mieux prendre en compte les aspects liés au niveau de vie des pays dans les procédures de recherche des niveaux optimaux de protection. Cet indicateur est défini sous la forme :

$$LQI = (g^{PNB})^q e / q$$

où e est l'espérance de vie à la naissance, PNB est le produit national brut par individu, et q est lié au temps passé à travailler ($q = \text{temps de travail} / \text{temps « pour profiter de la vie »}$, soit $q = w / (1 - w)$ si $w = \text{temps de travail} / e$). Le terme g provient de ce qu'on estime que, dans les pays développés, une fraction seulement (d'environ 60 %) du PNB est disponible, sous une forme ou une autre, pour procéder à des actions de réduction des risques, qui contribueront à améliorer la qualité et l'espérance de vie.

La recherche de l'optimum repose sur l'idée que les individus, en moyenne, travaillent juste assez pour pouvoir profiter, durant le temps libre qui leur reste, de l'argent supplémentaire qu'ils gagnent en travaillant. On montre que la recherche d'un optimum pour des projets de réduction de risque correspond à l'égalité :

$$d(\text{PNB}) / \text{PNB} + (1 / q) de / e = 0$$

Si l'expression est négative, les dépenses sont insuffisantes pour assurer la sécurité. Si l'expression est positive, les investissements pour augmenter la sécurité (ici en augmentant l'espérance de vie) sont superflus, au sens du critère socio-économique retenu. On dispose ainsi d'un critère qui prend en compte les attentes de la population, reliées à son niveau de développement économique. Par exemple, cette équation montre que si $q = 0.2$ (valeur courante), l'optimum pour gagner 1 % d'espérance de vie correspond à un investissement de 5 % du PNB.

Un tel formalisme permet d'évaluer indirectement la valeur des vies humaines, en calculant ce que la société est prête à dépenser pour sauvegarder un certain nombre de vies dans des cas similaires (prévention des accidents de la route ou du travail...).

Force est cependant de constater que la société ne procède pas toujours à une allocation optimale des ressources disponibles. Ainsi, par exemple, la somme des dépenses consacrées à l'amélioration de la sécurité aérienne va bien au-delà de celle qui serait justifiée sur la base d'une analyse probabiliste des blessures ou des victimes, si on la compare aux dépenses dans le domaine de la sécurité routière⁶.

⁶ Fernand Martin, économiste (Sciences et Avenir, août 2003), dénonce certaines sommes investies dans la sécurité, sans commune mesure avec les gains attendus. Ainsi, sur la base de 2,5 millions de dollars par victime, les 229 victimes du crash TWA 800 en juillet 1996 ont coûté 572 millions de dollars, mais les sommes dépensées pour améliorer la protection des réservoirs de carburant de l'ensemble de la flotte sont bien plus élevées.

Il en est de même dans l'industrie chimique, où les efforts faits pour réduire le

risque d'une catastrophe ponctuelle sont sans commune mesure avec les conséquences des impacts « diffus » tels que les pollutions chroniques ou les émissions de gaz à effet de serre [Corotis, 2003]. D'une manière générale, on a tendance à consacrer plus de moyens aux dangers qui sont plus spectaculaires à chaque occurrence (rappelons que l'aversion aux risques dépend du caractère spectaculaire de ces risques).

La population affectée par le danger fait partie des enjeux. Sur la base d'une évaluation économique de ces enjeux, on recherchera donc un degré de protection plus élevé si le nombre de victimes potentielles est plus élevé. Certains auteurs ont cependant fait remarquer que de tels critères de sécurité, tenant compte de la population soumise au risque, posent des problèmes éthiques dans une démocratie : « Pourquoi le degré de protection que l'on garantit à une personne devrait différer selon le nombre de ses voisins ? Pourquoi serait-il juste d'exposer les habitants de zones peu peuplées à des risques plus élevés que ceux des zones densément peuplées ? » [Milvy, 1987].

F. Choix du niveau de protection

1. Qui choisit ? Qui explique ?

La perception des risques par le grand public est très différente de celle des experts du problème concerné. Spangler a détaillé [Spangler, 1982] à quel point différent les critères d'acceptation, les méthodes d'évaluation (intuitive pour le public, quantitatives pour les experts), les sources d'information et, bien entendu, la connaissance des capacités techniques mobilisables. Il serait cependant simpliste de croire que le public serait subjectif, intuitif et irrationnel et les experts rationnels, justes et objectifs.

Les spécialistes des risques naturels plaident pour la transparence de l'affichage des risques. Les experts ont pour rôle d'éclairer les décideurs (pouvoirs publics, garants de la sécurité, aménageurs, maîtres d'ouvrages...) et, le cas échéant, de les aider dans l'explication et la justification de ces choix. Le niveau de risque visé doit être assumé. Ainsi la France a besoin d'une politique globale de gestion du risque⁷, qui soit clairement exposée à l'opinion : « Compte-tenu de ce que coûterait une protection absolue contre des crues exceptionnelles, les pouvoirs publics choisissent de soumettre les populations à un certain risque naturel. Qu'ils le disent »⁷.

⁷ B. Ledoux, in Le Nouvel Observateur, 9/2/1995.

La nécessité d'établir un consensus collectif est la même dans le domaine des risques sismiques : « Si dans l'absolu, il est aujourd'hui possible de mettre en œuvre des techniques de construction capables de limiter les dégâts d'un séisme, appliquer ces techniques à tous les bâtiments déjà construits et à construire est irréaliste et incompatible avec les possibilités d'une puissance économique, même très riche... Le problème est donc pour le législateur de définir ce niveau [de protection] et de le traduire en termes réglementaires. Ce choix relève obligatoirement d'un consensus national et traduit le compromis accepté par la société entre les exigences pour sa propre sécurité et la volonté d'y consacrer les moyens appropriés » [Cahiers, 1990].

Qu'il s'agisse de la protection de zones à risque, du dimensionnement d'une centrale nucléaire ou de la remise à niveau d'un ouvrage, le problème se pose donc de la même façon, en plusieurs étapes :

- choix d'un niveau de protection, à partir des estimations que peuvent fournir les experts techniques,

- traduction de ce niveau de protection en règles et recommandations,
- explication, par les responsables politiques, du niveau de protection et des conséquences de ces choix sur les coûts induits et les risques assumés.

2. Le choix du maître d'ouvrage

Dans le cadre des règles européennes de la construction (Eurocodes), il revient au maître d'ouvrage de définir le niveau de risque acceptable : il doit prendre des décisions explicites (et non plus implicites) sur les objectifs de niveau de service. Ces décisions conditionneront en fait le degré de sécurité et le dimensionnement des ouvrages. Il convient de conserver le sens du raisonnable et du relatif dans le choix des niveaux de protection visés : ainsi le vent peut détruire le Pont de Normandie, mais il faudrait un ouragan tel qu'une bonne partie de l'agglomération du Havre serait détruite avant [Bordes, 2003].

3. Evaluer les risques pour choisir : approches ALARP

Certaines industries fortement concernées par le risque (nucléaire, chimie) ont été amenées à définir des niveaux de risque acceptables sur la base des seules conséquences. C'est le principe des courbes de Farmer et de l'approche ALARP que nous allons exposer (pour plus de détails sur ces concepts voir l'étage 3).



Définition : Courbe de Farmer

Courbe (aussi appelée courbe F-N) exprimant la probabilité de défaillance annuelle – ou sa fréquence - en fonction de l'intensité ou de la gravité des conséquences, souvent exprimée en nombre de victimes (F = « fatalités » = nombre de victimes, N = nombre, ou fréquence, de défaillances).

Cette représentation permet de distinguer le domaine du risque majeur (de forte gravité mais très peu fréquent) de ceux du risque moyen et du risque « de la vie quotidienne » (ou risque banal).

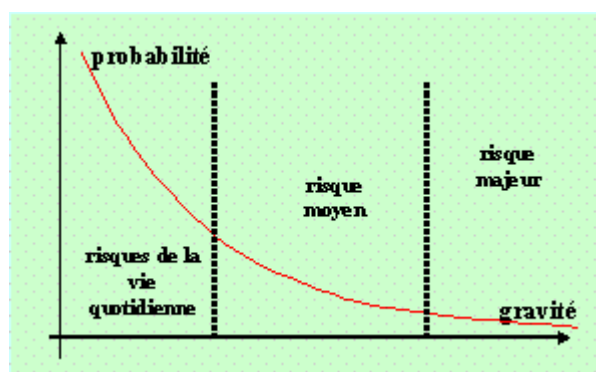


Figure 4.5. Diagramme de Farmer (gravité – probabilité).

Farmer [Farmer, 1967] a été le premier à proposer une telle représentation, qui permet d'exprimer les aspects sociaux et humains des risques, avec une application au domaine de la sécurité des installations nucléaires. Il a montré que les conséquences potentielles des défaillances nucléaires sont beaucoup moins sévères (de plusieurs ordres de grandeur) que celles résultant des accidents d'avion, des incendies, ou des ruptures de barrages).

Travailler dans le diagramme F (gravité) – N (probabilité – fréquence) permet de définir trois régions (figure 4.6.) :

- une région (A) dans laquelle le risque est jugé intolérable (fréquence trop élevée ou conséquences trop importantes),
- une région (C) dans laquelle il n'est plus perçu,
- et une région intermédiaire (B) dans laquelle il est jugé acceptable. Dans cette région, dite zone ALARP, le risque peut être ramené à un niveau aussi bas qu'il est raisonnable sans induire des coûts supplémentaires prohibitifs [Crémona, 2001].

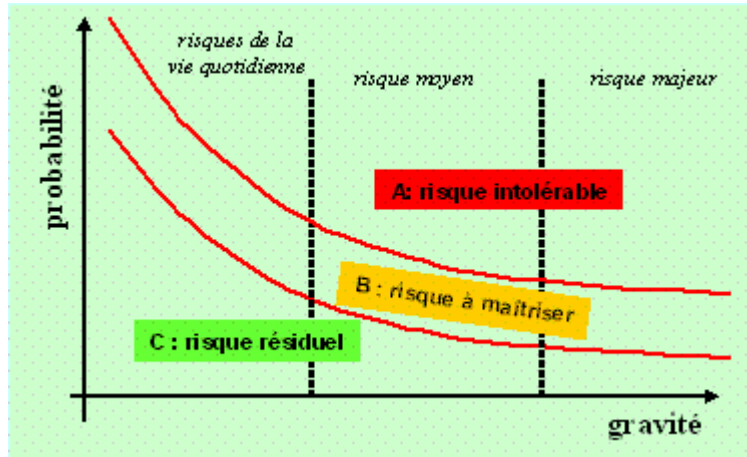


Figure 4.6. Principe de l'approche ALARP.



Définition : ALARP

(As Low As Reasonably Practicable = Aussi Faible Que Raisonnablement Réalisable). Principe utilisé pour définir un niveau de risque qui peut être effectivement obtenu pour le système considéré et qui est acceptable par tous ceux qui peuvent être affectés par la menace.

La figure 4.7. reproduit le même graphique avec des échelles logarithmiques, mieux adaptées à la représentation.

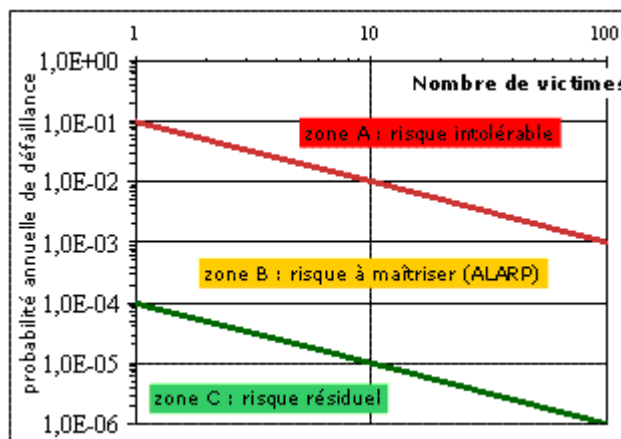


Figure 4.7. Exemple de diagramme ALARP, reliant la probabilité d'accident pour 1 km de tunnel au nombre de victimes, d'après Knoflacher, 2004

Dans la zone A, des actions immédiates sont nécessaires pour améliorer la sécurité. Dans la zone ALARP, elles peuvent être entreprises, en fonction des gains qu'elles procurent et des coûts des mesures de réduction du risque. Ce formalisme s'écarte du formalisme strictement économique puisque, si l'on est placé dans la zone de

risque intolérable, le but du projet est d'en sortir, quels que soient les coûts.

Les limites entre les domaines A, B et C sont souvent définies par des droites dans les graphiques bi-logarithmiques, soit par des relations de la forme

$$N = A F^{-k}$$

où k est d'autant plus élevé (donc la droite inclinée – fig 4.8) que l'aversion sociale aux désastres est élevée [Vrouwenvelder, 2001].

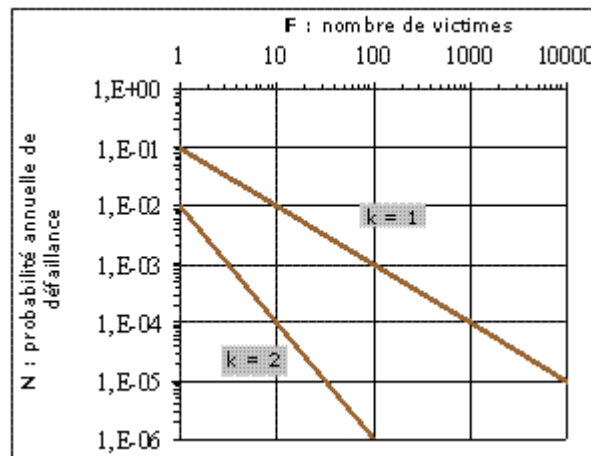


Figure 4.8. Limites ALARP : influence de l'aversion au risque.

L'approche ALARP permet de montrer qu'une amélioration notable de la sécurité peut s'accompagner d'un faible surcoût ou, au contraire, qu'un faible accroissement de la sécurité peut parfois demander un investissement supplémentaire conséquent. En fait, il est difficile de fixer des limites supérieures de « tolérabilité » pour les événements catastrophiques, puisque, à nombre égal de victimes, la société accorde beaucoup plus d'importance aux accidents catastrophiques provoquant un grand nombre de victimes qu'aux risques diffus dont l'effet cumulé est identique. Les choix des limites ALARP relèvent de la politique collective de la sécurité, par exemple des choix nationaux pour des installations telles que les installations nucléaires. Dans le domaine de la construction, les Eurocodes reposent sur la notion de fiabilité cible, qui correspond, pour des défaillances de gravité variée à une probabilité différente de défaillance. Le choix par les experts des valeurs précises de fiabilité cible à assurer relève de choix nationaux.

En pratique, le risque ne peut être calculé effectivement et comparé au niveau de risque visé que dans des cas particuliers. Les analyses a posteriori montrent que le risque réel excède souvent d'un ou deux ordres de grandeur le niveau calculé a priori, car il est difficile de tenir compte dans les modèles des effets des erreurs humaines, difficiles à prévoir et à modéliser. Le plus souvent, le risque quantifié est cependant un élément de communication entre les ingénieurs et le client (ou le législateur). Le calcul permet d'exprimer le degré de risque et de comparer plusieurs solutions (Whitman, 1984, Whitman, 2000).

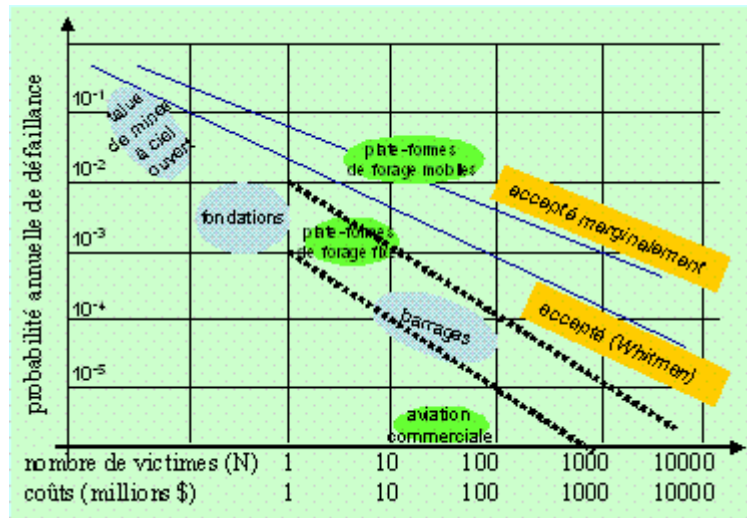


Figure 4.9. Graphique ALARP quantifiant le niveau de risque dans différents secteurs industriels (droites en pointillés pour les critères recommandés par l'Association Canadienne de Sécurité pour les Barrages) (d'après Whitman).

4. Des niveaux de sécurité visés dans les projets

Les décideurs doivent, à partir de l'évaluation des risques et du choix des niveaux acceptables, prendre les mesures nécessaires. Pour de grands projets de construction ou d'aménagement, le choix du niveau de probabilité acceptable est parfois explicité.

La procédure ALARP permet aussi, en explicitant les risques, de mieux analyser les objectifs de sécurité et de penser à des améliorations possibles de la conception. Ainsi, la catastrophe d'Eschede en Allemagne (100 victimes en juin 1998 lorsqu'un train percuta une pile de pont en béton armé à 200 km/h), a conduit à réfléchir sur la conception des ouvrages ferroviaires susceptibles d'être percutés par des trains [Schlatter, 2001]. On a par exemple évoqué la possibilité de piles de ponts « fusibles », moins résistantes au choc. En s'endommageant sous l'effet du choc, de telles piles provoqueraient certes des dégâts dans le pont, mais les effets catastrophiques sur les trains pourraient être réduits. Par ailleurs, tous les individus concernés par la défaillance n'ont pas le même niveau de tolérance au risque : le degré de risque tolérable diffère pour l'employé des chemins de fer (2 10⁻⁴/an), pour le passager (2 10⁻⁵/an) ou pour l'utilisateur du pont (2 10⁻⁶/an). On retrouve ici le poids du caractère plus ou moins volontaire de l'activité.

5. Probabilité de défaillance et réglementation de la construction

Le choix d'un niveau de protection par les décideurs (y compris par les pouvoirs publics instaurant une réglementation) pose aussi la question de leur propre aversion au risque. Les pouvoirs publics devraient, dans l'idéal, être neutres face au risque. Dans la réalité, si l'aversion au risque résulte de facteurs psychologiques pour l'individu, elle résulte de facteurs socio-politiques pour les décideurs. L'évolution des exigences en termes de prévention des risques, la mise en œuvre du principe de précaution, en sont la traduction.

Les experts qui rédigent la réglementation traduisent dans les textes la volonté des pouvoirs publics en termes de sécurité. Nous verrons que les Règlements de Construction n'expriment pas directement les probabilités visées (on parle de « probabilités cibles »), c'est à dire les probabilités de défaillance théoriques que

devraient connaître les ouvrages conçus et construits en respectant ces Règlements. En fait, ces probabilités ont bien été :

1. choisies par consensus, traduisant dans les textes la volonté politique, et tenant compte du contexte socio-économique,
2. effacées des textes, pour faire place à un jeu de coefficients, dont la prise en compte permettra d'assurer cette probabilité,
3. vérifiées, sur un certain nombre d'exemple théoriques, par les experts, qui ont testé et validé le choix des valeurs des coefficients.



Définition : Probabilité cible

Valeur de la probabilité de défaillance en dessous de laquelle on souhaite que se trouve le système dont on veut garantir la sécurité. La probabilité cible est fixée en fonction des moyens dont on dispose et du degré d'acceptabilité des risques.



Définition : Règlements de construction

Textes (règles, normes, recommandations techniques) contrôlant la conception, la construction, la fabrication et l'usage des ouvrages de construction.

La valeur de la probabilité cible p dépend à la fois des enjeux (type d'ouvrage concerné) et du mode de défaillance (qui peut-être plus ou moins sévère et avoir des conséquences plus ou moins immédiates). Plutôt que de parler en termes de probabilités (qui conduit à utiliser des nombres très petits), les spécialistes préfèrent utiliser un coefficient β , dénommé « indice de fiabilité », qui peut être facilement relié à la valeur de la probabilité, comme l'illustre la figure 4.11. Nous reviendrons à l'étage 3 sur la définition précise de cet indice.

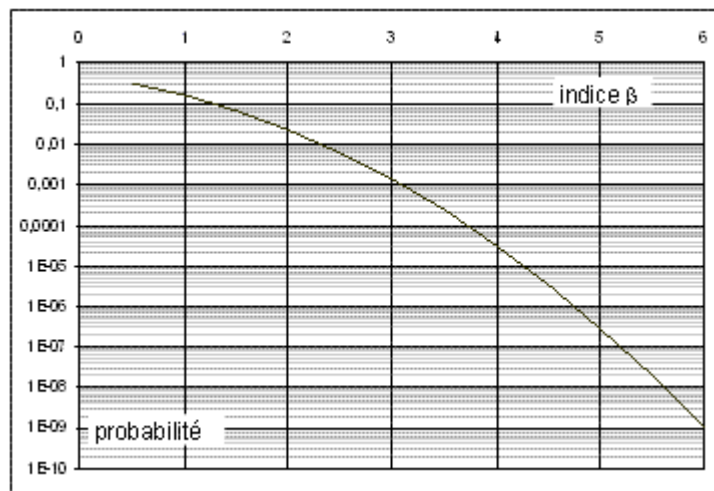


Figure 4.11 Graphique reliant la probabilité à la valeur de l'indice de fiabilité β .

Le tableau suivant regroupe des valeurs proposées pour l'indice de fiabilité β et donc pour la valeur de la probabilité cible correspondante [Crémona, 2003]. La probabilité cible y est adaptée à la nature de l'ouvrage, et donc à la valeur des enjeux.

	type de défaillance			
	service	rupture ductile de systèmes redondants avec réserve de résistance	rupture ductile sans réserve de résistance	rupture fragile de systèmes non redondants
conséquences				
faibles (confort)	01/01/00	01/05/08	01/02/00	02/05/08
mineures (pas de risque de décès ou d'accident) ex : structures agricoles	01/05/08	01/02/00	02/05/08	01/03/00
limitées ex : immeubles de bureau	01/02/00	01/03/00	03/05/08	01/04/00
importantes ex : ponts, théâtres	02/05/08	01/05/00	04/05/08	01/05/00
majeures ex : centrales, barrages	01/03/00	01/04/00	01/05/00	01/06/00

Tableau 13 : Tableau 4.3 : Valeurs de l'indice de fiabilité en fonction du mode de défaillance et de la nature des enjeux.

La réglementation parasismique est un parfait exemple de la prise en compte de l'importance des enjeux dans l'approche du niveau de protection : répartit les ouvrages courants en 4 classes, selon les conséquences éventuelles d'un accident. Ces ouvrages font l'objet de règles de protection statistique, reposant sur la notion de probabilité assumée de défaillance. On adopte une démarche particulière pour les ouvrages dits « à risque spécial ».

6. Assurer la sécurité des ouvrages existants

Fixer le niveau de sécurité pose aussi parfois des questions difficiles à résoudre sur un plan scientifique. Ainsi, le choix de la valeur cible pose problème lors du changement de réglementation : il semble difficilement acceptable que de nouveaux règlements conduisent à moins de sécurité que les anciens. Comme il est cependant difficile d'estimer précisément les valeurs de la sécurité dans la réalité, les experts contournent la difficulté, par exemple en faisant en sorte que le nouveau règlement ne conduise pas à des dimensionnements d'ouvrages trop différents de l'ancien, si celui-ci a globalement donné satisfaction.

Une autre difficulté concerne les ouvrages en service, quand il s'agit de maintenir en service des ouvrages dégradés (quelle sécurité assurent-ils ? est-elle acceptable ?), ou de solliciter davantage (ou plus longtemps) des ouvrages existants, même en bon état. S'il est déjà difficile de définir un niveau de risque maximal acceptable en phase de conception, ce choix est encore plus complexe pour les ouvrages en service, pour lesquels toute décision peut avoir des conséquences économiques et humaines importantes.

Les maîtres d'ouvrage auront besoin de critères objectifs de décision pour réparer, maintenir le trafic ou cesser d'exploiter un ouvrage. La rénovation de la suspente métallique du Pont d'Aquitaine offre un bel exemple d'une telle situation. La corrosion des câbles ayant provoqué des ruptures de fils et de torons de ce pont suspendu, l'Etat, maître d'ouvrage, a dû décider de procéder au changement de la suspente. Les coûts directs induits par cette décision ont été mis en balance avec les coûts indirects (milliers d'heures de transports perdues par les usagers, fermeture provisoire pendant certaines phases de travaux) et les risques de défaillance, qu'il était difficile d'apprécier, du fait de la limitation des connaissances théoriques.

La question de la responsabilité



V

La recherche de responsables	75
Responsabilité juridique	76
Les missions de l'ingénieur et ses responsabilités	77
Le partage des responsabilités	78

Quand une défaillance survient, au-delà des explications techniques, on cherche à savoir qui en porte la responsabilité. Cette responsabilité peut être juridique, technique, politique... Nous verrons dans ce chapitre quel rôle joue chaque acteur et, en particulier, quelles sont les missions des pouvoirs publics et de l'ingénieur face aux risques dans la construction.

François Ewald, cité par [Melacca, 2004], distingue l'évolution du principe de prudence :

- le Code Civil a installé au cours du XIXème siècle le dispositif de responsabilité, basé sur la faute,
- le XXème siècle a vu le développement du dispositif de solidarité fondé sur le risque,
- nous assisterions actuellement à l'avènement du dispositif de sécurité, avec le principe de précaution, qui conduit à reformuler la problématique de la responsabilité.

Les citoyens refusent de plus en plus que l'on évoque la fatalité après une défaillance. La recherche des explications, puis des responsables, fait partie de la démarche de maîtrise des risques. Elle permet de réduire le risque de nouvelles défaillances, en éliminant les causes, et en sensibilisant les personnes chargées d'assurer la sécurité.

A. La recherche de responsables

1. La diversité des causes et des intervenants

Dans le domaine technique, le niveau d'acceptation du risque structurel est plus faible que celui du risque naturel, et ce d'autant plus que le risque apparaît subi, de manière involontaire, par la victime (Chap. § 3.2.1.). On recherche un responsable dans le premier cas (le maître d'ouvrage ? l'ingénieur ? le maçon ?) quand la fatalité peut être invoquée dans le second.

Les ouvrages de génie civil sont exposés aux risques aux différentes phases de leur vie. Les mécanismes de défaillance et les responsabilités changent lors de ces

phases [Lemoine, 2000] :

- pendant la période de conception-construction, des risques importants sont assumés par les maîtres d'œuvre et les constructeurs, tant pour l'ouvrage que pour le personnel impliqué. Le public n'est concerné qu'indirectement. Dans cette période, les aléas peuvent être élevés du fait du caractère évolutif de l'ouvrage et de l'existence de phases provisoires,
- la période d'exploitation est placée à la fois sous la garantie légale des constructeurs et sous la garantie de fait du propriétaire,
- au delà, pendant la période de vieillissement, le maître d'ouvrage porte seul le risque. Se pose alors la question du maintien des fonctions et de la sécurité : jusqu'à quel niveau doit-on engager des travaux de sécurité ?

Les intervenants dans les projets de construction sont nombreux, et l'identification des causes, puis des responsables n'est pas toujours aisée.

2. Faut-il toujours un responsable ?

Les pouvoirs publics, voire les gouvernements, peuvent être mis en cause après les accidents et les catastrophes, fussent-elles d'origine naturelle.

L'expertise de plus de 300 dossiers de dommages aux immeubles relatifs aux mouvements de sol a révélé que le second facteur mis en cause, après les mouvements liés à la dessiccation et au gonflement des argiles, étaient les vibrations provoquées par des interventions extérieures (travaux dans le voisinage, explosions minières...). En fait, l'analyse approfondie a révélé que ces facteurs ne pouvaient pas provoquer les dommages constatés. La dimension psychologique du dossier est manifeste : les occupants ressentent un inconfort lié au bruit, aux nuisances, aux vibrations, et ont tendance à attribuer à ces causes la responsabilité de l'endommagement du bâtiment qu'elles ne sauraient provoquer [Wesseldine, 2001].

B. Responsabilité juridique

En droit, il convient de distinguer trois types de responsabilité [Gomez-Varona, 2000] :

- la **responsabilité administrative**, qui peut incomber à une personne de droit public pour les dommages causés aux particuliers ou sociétés dans le cadre de l'exécution d'un contrat, par exemple pour un marché public. Le contentieux relève alors du Tribunal administratif;
- la **responsabilité pénale**, qui vise à sanctionner des infractions (manquements aux règles de droit). Elle n'est engagée que s'il y a commission d'un acte expressément interdit par la loi. Ainsi, l'Article 221-6 du Code Pénal prévoit des sanctions pour les homicides ou coups et blessures : « Le fait de causer, par maladresse, imprudence, inattention, négligence ou manquement à une obligation de sécurité ou de prudence imposée par la loi ou les règlements, la mort d'autrui, constitue un homicide involontaire puni de trois ans d'emprisonnement et de 300 000 F d'amende ». L'action au pénal peut mettre en cause l'ensemble des intervenants d'un projet : services administratifs, architectes, bureaux d'étude, constructeurs, contrôleurs, exploitants. Par exemple, dans la catastrophe du Grand-Bornand, causée par une crue subite du Borne, on a examiné l'historique des crues depuis un siècle et conclu qu'avec des études plus approfondies, l'implantation du camping dévasté aurait dû être jugée dangereuse et interdite. Il y avait donc eu négligence et mise en danger de la vie d'autrui,

sanctionnable au pénal jusqu'à l'échelon préfectoral [Lemoine, 2000];

- la **responsabilité civile**, obligation qui incombe à une personne de réparer le dommage causé à autrui. Elle relève du domaine des risques assurables. La charge de la preuve incombe à la victime, qui doit démontrer la faute (violation d'une règle de droit, d'un règlement...), le caractère direct et certain du dommage, et le lien de causalité entre la faute et le dommage.

Deux notions récentes élargissent considérablement le champ des responsabilités : la mise en danger de la vie d'autrui, et le principe de précaution (cf. chapitre 3). Désormais, « ...une faute, même non intentionnelle [...] est de nature à engager la responsabilité pénale de celui qui est l'origine du dommage, mais également de ceux qui, à des degrés divers, de près ou de loin, y ont contribué ». Dès lors, comment apprécier si une décision peut se trouver à l'origine d'un accident ? L'existence d'un risque résiduel, quelles que soient les décisions prises, laisse au juge un pouvoir d'appréciation considérable. Les acteurs du génie civil, qu'ils soient maîtres de l'ouvrage, concepteurs, architectes, exécutants ou contrôleurs, doivent exercer la plus grande vigilance, sauf à mettre leur responsabilité en jeu [Lemoine, 2000]. P. Habib s'inquiète des répercussions du « principe de précaution » sur la mise en cause potentielle, y compris juridique, de l'ingénieur, en particulier en géotechnique où les décisions sont très souvent prises alors que le contexte n'est que partiellement et imparfaitement connu [Habib, 2001].

A terme, le développement et la diffusion d'une « culture de la précaution » pourrait avoir pour conséquence de faire évoluer les notions de responsabilité civile et pénale. Kourilsky souligne que « [...] le législateur, l'autorité réglementaire et le juge peuvent faire du principe de précaution le meilleur ou le pire des usages. Le meilleur, s'ils adoptent des mesures qui améliorent véritablement la sécurité des citoyens, le pire s'ils en font un carcan dépourvu de souplesse, un frein à l'innovation et au progrès » [Kourilsky, 1999].

C. Les missions de l'ingénieur et ses responsabilités

Dans le domaine de la construction, en constante innovation, Habib [Habib, 2001] se demande si un document officiel périmé est toujours applicable ou si l'ingénieur, homme de l'art, doit être au courant de ce qui se dit dans les instances qui préparent un nouveau règlement.

Une enquête a été menée auprès des ingénieurs de structures de Californie pour qu'ils expriment quel devait être, selon eux, le rôle (et donc la responsabilité en cas de défaillance) de l'ingénieur [Cardon, 2000]. Le Tableau 5.1 rassemble les appréciations moyennes issues de l'enquête, définies sur une échelle de 1 (pas du tout d'accord) à 7 (tout à fait d'accord).

<i>Pour pratiquer conformément aux règles de l'art, un ingénieur des structures doit...</i>	<i>appréciation moyenne</i>
produire des calculs et des dessins clairs et conformes aux besoins identifiés	6.5
demeurer informé de l'état de l'art de la discipline	5.7
satisfaire un niveau minimum de compétences	4.7
faire ce que font la majorité des ingénieurs	4.7
faire ce que fait l'ingénieur moyen	3.7
ne pas faire d'erreur	2

Tableau 14 : Tableau 5.1 : Les compétences attendues d'un ingénieur.

Les ingénieurs admettent ainsi ne pas être infaillibles. A une autre question, ils désapprouvent fortement l'argument selon lequel les Règles de l'Art seraient définies par les juristes (note = 1.3) ou par les Règlements de Calcul (note = 2.8) et reconnaissent que c'est une « cible mobile ». L'expertise de l'ingénieur, non réductible à des textes techniques fait ainsi preuve de sa richesse. Elle rend dès lors complexe la définition des responsabilités en cas de défaillance.

L'ingénieur d'études se situe en position intermédiaire entre les décideurs (qui sont quelquefois des ingénieurs de formation, mais plus souvent des financiers) et les utilisateurs. Il peut ainsi être conduit à choisir une solution technique non pleinement satisfaisante du fait des contraintes économiques [Harouimi, 2000].

Le CNISF¹ a édicté en mai 2001 une Charte d'Ethique de l'Ingénieur, qui définit la place de l'ingénieur dans la société, ses compétences, son métier et ses missions. Face aux risques, la mission de l'ingénieur est celle d'une attitude rationnelle et ouverte : « l'ingénieur intègre dans ses analyses et ses décisions l'ensemble des intérêts légitimes dont il a la charge, ainsi que les conséquences de toute nature sur les personnes et sur les biens. Il anticipe les risques et les aléas ; il s'efforce d'en tirer parti et d'en éliminer les effets négatifs ».

¹ Conseil National des Ingénieurs et Scientifiques de France.

D. Le partage des responsabilités

1. Acteurs techniques et non techniques

Lors d'un projet d'aménagement ou de construction, l'attitude de nombreux acteurs contribue à augmenter ou à réduire les risques. Le maître d'ouvrage, public ou privé, par sa décision de « faire » est le créateur du risque ou le réducteur s'il s'agit d'une défense. Les ingénieurs d'études et les entreprises agissent pour maîtriser ces risques, même si certaines de leurs décisions peuvent être source de danger. Tous agissent dans un cadre de sécurité défini collectivement par les pouvoirs publics. Des organismes de contrôle sont en outre chargés de garantir que les règles sont respectées. Il n'est dès lors pas toujours aisé, en cas de défaillance, de préciser les responsabilités de chacun.

Le maître d'ouvrage est le seul qui puisse mettre en place les investissements

nécessaires pour prévenir les risques. S'il doit être informé pour cela par ses constructeurs, il a ce rôle primordial de définition du programme et de commande des études. Il a de plus une obligation de coordination de sécurité et de protection de la santé. Son rôle dans la loi MOP (Maîtrise d'ouvrage Publique) est très bien défini : « Il doit définir dans le programme les objectifs de l'opération et les besoins qu'elle doit satisfaire ainsi que les contraintes et exigences de qualité sociale, urbanistique, architectural, fonctionnelle, technique et économique, d'insertion dans le paysage et de protection de l'environnement, relatives à la réalisation et à l'utilisation de l'ouvrage ». Cette définition extrêmement large permet donc à un juge administratif de sanctionner un maître d'ouvrage public qui n'a pas rempli correctement son rôle [Carrière, 2006].

2. Les élus locaux



Texte légal

La législation précise les responsabilités des élus locaux. Les lois d'aménagement et d'urbanisme codifiées par le code de l'urbanisme (en particulier la Loi « Littoral » du 3 janvier 1986 et la Loi « de Modernisation de la Sécurité Civile » du 13 août 2004) précisent les obligations des collectivités publiques en matière de protection du littoral et de prise en compte des risques dans le droit des sols. Les responsabilités de la puissance publique sont susceptibles d'être engagées du fait de ces obligations, sauf en cas de force majeure [Toulemont, 1995].

Dans ce cadre de ses pouvoirs de police, le maire a la responsabilité de prendre les mesures nécessaires pour alerter les habitants et de « faire cesser les accidents et fléaux, tels que les incendies, les inondations, les éboulements de terre, les pollutions diverses... ». Il doit satisfaire à deux obligations qui se traduisent par deux catégories de responsabilité pour la commune :

- une obligation générale de sécurité vis-à-vis des dangers dus aux agents naturels, qui couvre des aspects de prévision et d'information d'une part et de protection d'autre part. Le Code des Communes (articles L 131.2 et suivants) précise que le maire est « responsable de la sécurité et de la protection des populations » et fixe le cadre général de responsabilité des élus. Sauf cas d'espèce, la commune n'est cependant pas tenue d'entreprendre des travaux de défense ou d'en financer l'entretien ou la réparation. Un arrêt du Conseil d'Etat du 6 janvier 1971 (« Dame Louvet contre la ville de Biarritz ») a confirmé l'absence de responsabilité de la commune qui n'avait pas procédé à l'exécution de travaux de protection d'une propriété riveraine. Cependant, les collectivités territoriales sont habilitées (art. 31 de la Loi sur l'eau du 3.1.1992) à prendre la maîtrise d'ouvrage de tels travaux, s'ils présentent un caractère d'intérêt général ou d'urgence, leur responsabilité peut alors être retenue;
- une obligation spéciale en cas de danger grave ou imminent, satisfaite en général par le recours à des mesures de mise en sécurité non structurelles (interdiction de circulation, évacuation). Des mesures structurelles telles que des travaux confortatifs d'urgence demeurent à la charge de la commune, même si elles sont effectuées dans le domaine privé.

Enfin, en tant qu'administration compétente en matière d'urbanisme et d'occupation des sols, la commune a, depuis la Loi de juillet 1987 sur l'Organisation de la Sécurité Civile, l'obligation de prendre en compte les risques naturels et technologiques dans les documents d'urbanisme. Elle peut ainsi refuser le permis de construire ou de lotir, ou l'accorder sous réserve de prescriptions spéciales.

Pour apporter une réponse de proximité à la crise, la loi de modernisation de sécurité civile de 2004 (article 13) a instauré le plan communal de sauvegarde (PCS). Le PCS est l'outil opérationnel à la disposition du maire pour l'exercice de

son pouvoir de police en cas d'événement de sécurité civile. Il est obligatoire dans les communes identifiées comme soumises à un risque majeur et recommandé dans toutes les autres car aucune n'est à l'abri :

- de phénomènes climatiques extrêmes (tempête, orage, neige , canicule ...),
- de perturbations de la vie collective (interruption durable de l'alimentation en eau potable ou en énergie, ...),
- de problèmes sanitaires (épidémie, canicule ...),
- d'accidents de toute nature (transport, incendie...)...

Afin de concrétiser le lien indispensable entre l'information préventive des populations sur les risques et l'organisation de la commune face aux risques, le plan communal de sauvegarde regroupe l'ensemble des documents communaux d'information préventive. Il détermine les mesures immédiates de sauvegarde et de protection, fixe les modalités de diffusion de l'alerte et des consignes de sécurité. Cette préparation de la commune doit lui permettre de définir les mesures d'accompagnement et de soutien de la population face aux risques.

Une difficulté vient du fait des connaissances ou informations limitées disponibles. Par exemple, il est difficile pour une commune de connaître exactement l'emplacement et l'étendue des zones sous-minées (présence de cavités, carrières ou marnières dans le sous-sol), la mémoire des anciennes exploitations pouvant avoir été perdue.

3. L'Etat et son administration



Texte légal

La responsabilité de l'Etat a été consacrée en 1873 par l'arrêt Blanco, pris suite à la plainte du père d'une enfant renversée par un wagonnet dans une manufacture de tabac régie par l'Etat. Cet arrêt mettait fin à une longue tradition d'irresponsabilité.

Le rôle actif de l'Etat dans le cadre de la prévention a évolué progressivement : loi de 1982 sur les catastrophes naturelles, loi Barnier en 1995, loi du 30 juillet 2003 sur la prévention des risques naturels et technologiques. Cette évolution législative s'est souvent faite en réaction après des accidents ou des catastrophes (AAA regroupe les principaux textes législatifs relatifs aux différents aspects des risques).

L'Etat est aujourd'hui fondé à intervenir à tous les stades de traitement du risque, depuis la prévention et l'information jusqu'à la réparation, par le biais des déclarations de catastrophe naturelle (Chap XX. 3.6.2), condition préalable nécessaire à la mise en jeu des garanties d'assurance. C'est lui qui a la charge d'établir et de faire respecter les textes régissant la maîtrise de la sécurité, dans le domaine de la construction comme dans celui des risques naturels et technologiques.

Enjeux et vocabulaire de la maîtrise des risques.

VI

Généralités

81

Les principes régissant la logique de la gestion et de la maîtrise des risques sont identiques, qu'il s'agisse de risques d'origine naturelle ou technologique. La maîtrise des risques suit un processus cyclique, dont nous allons passer les étapes en revue : analyse des risques, passant par leur identification puis leur évaluation, réduction des risques, puis surveillance.

A. Généralités

Evoquer la notion de risque est une attitude de plus en plus fréquente dans les sociétés occidentales. Les acteurs politiques ou socio-économiques doivent traquer le risque, auquel le citoyen ou l'utilisateur est devenu allergique. Chacun de nos actes (manger, conduire, respirer...) est susceptible d'induire des effets néfastes, qu'il faut réduire ou, mieux, prévenir... La perte de mémoire des populations face à la récurrence des catastrophes naturelles et le manque de culture du risque dans nos sociétés est une constante relevée après chaque catastrophe. La disparition de repères historiques explique les parties de bras de fer qui peuvent se jouer entre les élus locaux et l'administration pour la mise en place des outils de prévention. Si, au siècle dernier, les maisons construites en bord de fleuve possédaient un étage où les habitants se réfugiaient en cas de crue, les constructions récentes répondent à d'autres impératifs esthétiques ou techniques et la population n'accepte plus l'inondation des lieux de vie.

Dans ce contexte, le technicien et l'ingénieur sont des experts dont le savoir et les compétences apparaissent bienvenues. Chaque semaine, chaque mois apporte son lot de catastrophes naturelles (avalanches, séismes, inondations...) pour lesquelles le savoir technique des constructeurs est sollicité.

Mais le Génie Civil, artisan de la protection d'un côté, revêt un double visage : il est aussi parfois source de risques. L'immeuble qui s'effondre sur ses occupants, le barrage qui pourrait se rompre, la centrale nucléaire... sont identifiés comme autant de menaces par la population. La réalité est plus nuancée. Certains risques ne sont ni totalement naturels, ni entièrement technologiques¹. Des exemples récents montrent que les inondations catastrophiques ou les glissements de terrain peuvent être amplifiés, voire causés par des constructions ou des aménagements

mal maîtrisés. Dans d'autres situations, il peut être difficile de trancher entre le caractère bénéfique et maléfique des aménagements : les ouvrages portuaires peuvent modifier le transit littoral par l'accumulation de sédiments à l'amont et à l'aval, stabilisant le rivage d'un côté mais augmentant l'érosion de l'autre.

¹ Le vocabulaire spécifique au risque est supposé connu du lecteur, qui trouvera les définitions utiles dans d'autres communications du colloque.

Nous allons nous efforcer de tracer les grandes lignes de la chaîne de prévention et de gestion des risques, en soulignant les similitudes entre les risques naturels et les risques technologiques, et en identifiant le rôle essentiel revêtu par les acteurs du Génie Civil. Ce rôle dépend avant tout, comme nous le verrons, des capacités techniques à agir sur les sources de danger, soit dès l'amont (en réduisant ou annihilant les aléas), soit en diminuant les effets d'une menace inévitable.

La distinction entre ces familles de risques peut sembler arbitraire. En fait, sont qualifiés de technico-naturels les risques pour lesquels l'aléa d'origine naturelle peut être transformé du fait de l'action humaine. Ainsi, à une cause météorologique naturelle (de fortes précipitations) succède une crue catastrophique, dont l'ampleur dépend des conditions d'aménagement du territoire, des modes d'occupation des sols... On peut en dire de même pour les mouvements de terrain ou les phénomènes d'érosion littorale. A l'inverse, nous qualifions de risques naturels ceux pour lesquels l'homme a peu d'influence sur la nature et l'intensité de l'aléa et doit donc adapter ses réponses.

On abordera aussi brièvement certains aspects des risques économiques liés à la gestion patrimoniale des ouvrages, dont les aspects sécurité ne sont pas absents, mais qui relèvent d'enjeux multicritères (contraintes d'utilisation, impacts, aspects financiers...).

Les enjeux attachés à ces dangers potentiels sont très disparates, tout comme les moyens d'action techniques ou les échelles de temps concernées. Il en découle que les stratégies mises en œuvre, au-delà d'une grande cohérence, s'adapteront selon le contexte spécifique.

Enfin, une des caractéristiques des ouvrages de génie civil, si on les compare à d'autres types de produits de l'ingénierie, est leur durée de vie longue (plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines d'années), au cours de laquelle leurs conditions d'exploitation peuvent être modifiées. Ainsi les risques relatifs aux ouvrages de génie civil peuvent relever de trois registres, selon la phase au cours de laquelle se manifestent les menaces [Perret F., cité par Bordes F., 2003] :

- les risques ayant pour origine les caractéristiques spécifiques congénitales de l'ouvrage, indépendamment de son utilisation (risques de conception, risques d'exécution),
- les risques ayant pour origine les règles de gestion et d'exploitation de l'ouvrage (il s'agit alors avant tout de défauts de cohérence dans le système conception – gestion – exploitation),
- les risques liés aux actions sur l'ouvrage exercées par son environnement, tout au long de sa durée de service.

La prise en compte de cette dimension temporelle sera indispensable.

Le caractère rationnel de la maîtrise des risques a accompagné celui de leur perception. Les documents historiques nous fournissent une première analyse de la prise de risque au cinquième siècle avant notre ère (Lannoy, 2008). Ainsi, Périclès s'exprime lors de la guerre du Péloponnèse, en 431 av. J.C. : « C'est par nous-mêmes que nous décidons des affaires, que nous nous en faisons un compte exact pour nous, la parole n'est pas nuisible à l'action, ce qui l'est, c'est de ne pas se renseigner par la parole avant de se lancer dans l'action. Voici donc en quoi nous

nous distinguons : nous savons à la fois apporter de l'audace et de la réflexion dans nos entreprises. Les autres, l'ignorance les rend hardis, la réflexion indécis. Or ceux-là doivent être jugés les plus valeureux ceux qui, tout en connaissant exactement les difficultés et les agréments de la vie, ne se détournent pas des dangers ». On notera dans cette citation les composantes de la maîtrise des risques que nous allons détailler ci-dessous : l'acquisition de connaissances, la réflexion et la décision.

Dans de nombreux domaines techniques se sont développées des logiques de gestion du risque[Ⓐ]. Dans le secteur de la construction, ces logiques se sont développées de manière plus empirique, avec un retard certain par rapport à d'autres secteurs industriels (génie chimique, génie nucléaire, ingénierie pétrolière...) dans lesquels, progressivement, des normes ont été mises en place, y compris relatives au vocabulaire de la gestion des risques. Parallèlement, les spécialistes des risques naturels ont, eux aussi, développé des logiques propres à leur domaine. Avant d'aller plus loin, il nous semble essentiel, dans un souci de rigueur, de préciser ce que recouvrent termes que nous serons amenés à employer par la suite.

Commençons par préciser ce que l'on entend par maîtrise des risques et gestion des risques.



Définition : Maîtrise des risques

Processus d'application de la politique de l'organisme permettant la mise en œuvre itérative et continue de l'analyse et de la gestion des risques d'un projet [AFNOR - FD X50-117]. La maîtrise des risques est le résultat normal de la mise en place d'une procédure de gestion des risques.

Dans cette définition normalisée, le terme de « projet » provient du contexte industriel à l'origine de la définition (le projet de conception d'un nouvel avion par exemple). Il peut être étendu sans difficulté au domaine de la construction et de l'aménagement.



Définition : Gestion du risque

Procédure globale regroupant l'appréciation du risque, la décision (définition de la stratégie d'action), le traitement du risque et sa surveillance[Ⓐ].

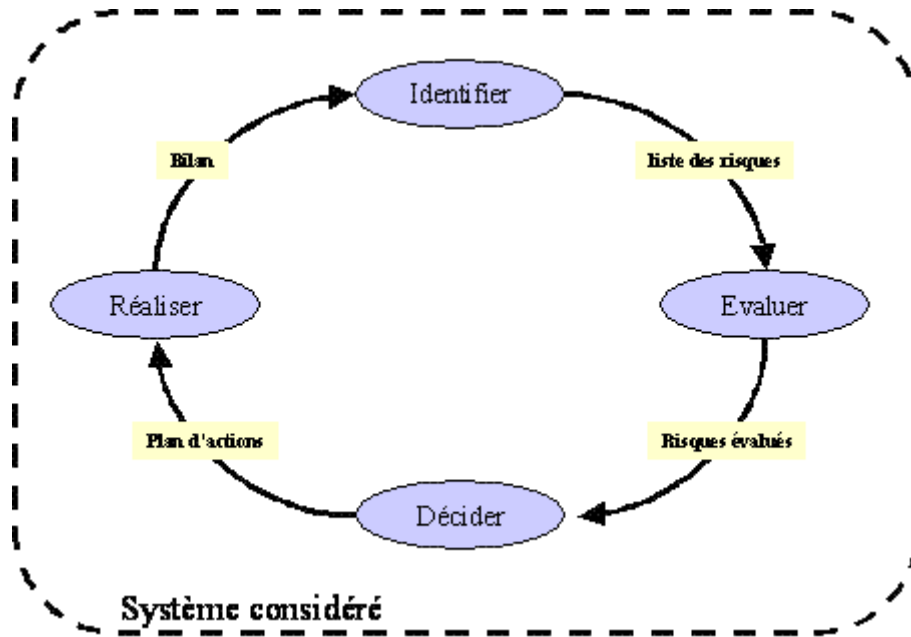


Méthode

Les étapes de la gestion des risques sont détaillées sur le schéma simplifié suivant :

- identifier : identification et analyse des risques[Ⓐ],
- évaluer : évaluation des risques,
- décider : définir la politique de mitigation/réduction,
- réaliser : traiter les risques et surveiller.

Le schéma ci-après traduit une démarche cyclique, itérative : à l'issue de la quatrième étape, un bilan permet de savoir si les objectifs sont atteints, en comparant le risque résiduel[Ⓐ] au risque acceptable[Ⓐ]. On peut, si le risque demeure trop élevé, relancer le processus, pour parvenir à maîtriser les risques, c'est-à-dire à les réduire à un niveau acceptable. On emploie aussi parfois le terme anglo-saxon de « risk management » pour parler de gestion des risques.



Représentation cyclique de la gestion et maîtrise des risques.

La gestion des risques s'appuie d'une part sur la mise au point et l'utilisation d'un ensemble de techniques (procédures, équipements, automatismes, mesures...) visant à réduire la probabilité d'occurrence des aléas et leurs conséquences, constituant l'ingénierie du risque, d'autre part sur des structures organisationnelles, vérifiant que les mesures techniques restent opérationnelles (contrôle régulier).

La première partie du travail s'inscrit dans une démarche analytique : on parle d'analyse de risques.



Définition : Analyse de risques

Démarche dont la finalité consiste à identifier la mise en danger (les sources potentielles de dommage) pour estimer les risques. Elle consiste à utiliser l'information disponible pour établir des scénarios résultant de l'occurrence d'un aléa, et déterminer la probabilité et l'amplitude de ses conséquences sur les individus et la population, les biens matériels et l'environnement, du fait des aléas.



Méthode

L'analyse de risques est une activité qui consiste à répondre aux trois questions suivantes :

- Qu'est-ce qui peut conduire à des situations de danger ?
- Quelles sont les conséquences potentielles de ces situations ?
- Quelles sont les chances que ces situations et ces conséquences se produisent ?

Cette démarche est conforme à la définition usuelle du vocable « analyse », c'est-à-dire un examen détaillé d'un phénomène complexe de manière à en comprendre la nature ou à déterminer les caractéristiques essentielles. L'analyse de risque repose en général sur les étapes suivantes :

- la définition et l'analyse du système (fonctions remplies par chaque composant, interactions entre composants et avec l'environnement),
- l'identification des dangers, en liaison avec les données : environnement naturel, humain, technologique...,
- l'estimation de la vulnérabilité des enjeux,
- l'identification des conséquences.

Une fois cette phase achevée, on peut dire que les risques sont identifiés.



Définition : Identification des risques

Le processus permettant de trouver, lister et caractériser les éléments du risque. Le processus d'identification des risques considère le système à étudier, ses limites et son environnement. Cela consiste à prendre en compte les fonctions à satisfaire, les menaces et les vulnérabilités comme point de départ pour une analyse plus en profondeur [norme ISO/IEC 13335-1 (11/2001)].

Vient alors la phase d'évaluation.



Définition : Evaluation des risques

Etape du processus général de gestion du risque, succédant à l'étape d'analyse de risque, au cours de laquelle des valeurs et des jugements intègrent le processus de décision, de manière explicite ou implicite, en prenant en considération l'importance des risques estimés et des conséquences sociales, environnementales et économiques qui leur sont associées.

On distingue parfois l'évaluation[☹] et l'estimation des risques[☹], au cours de laquelle on se borne à quantifier des valeurs de probabilité d'occurrence des conséquences, sans attacher de valeur à ces conséquences.

Une fois les risques identifiés et quantifiés, la comparaison aux valeurs souhaitées permet de définir puis de mettre en œuvre un programme de réduction des risques.



Définition : Réduction des risques

L'application choisie de techniques appropriées et de principes de gestion pour réduire soit la probabilité d'occurrence d'un aléa, soit celle de ses conséquences, soit les deux.

On emploie aussi parfois le terme de mitigation des risques.



Définition : Mitigation des risques

Dans le domaine de la gestion des risques, la mitigation consiste à réduire les dommages afin de les rendre supportables - économiquement du moins - par la société.

En matière de prévention de certains risques naturels, et à la différence des risques technologiques, on verra qu'on ne peut empêcher certains phénomènes de se produire. La mitigation de ces risques est donc l'action qui conduit à réduire l'intensité de certains aléas (inondations, coulées de boue, avalanches...) et la vulnérabilité des enjeux pour faire en sorte que le coût des dommages liés à la survenue de phénomènes climatologiques ou géologiques soit supportable par notre société.

Il reste à mettre en œuvre des moyens pour s'assurer que les risques ne franchiront pas à l'avenir les niveaux jugés acceptables. Il s'agit de la surveillance.



Définition : Surveillance

Ensemble de moyens mis en œuvre pour suivre le fonctionnement d'un système.

En gestion de risques, la surveillance permet de s'assurer du bon fonctionnement d'un système, de repérer des évolutions précoces, de détecter des phénomènes imprévus ou le franchissement de seuils d'alerte prédéfinis. La surveillance peut

être visuelle, ou reposer sur des moyens métrologiques plus sophistiqués (par exemple le suivi du mouvement d'un versant naturel instable, le suivi des déformations d'un ouvrage d'art, la mesure en continu des hauteurs de crue...).

L'objectif de tout plan de maîtrise des risques est de réduire les risques au niveau qui sera jugé acceptable par les responsables décideurs, en mettant en œuvre les mesures de réduction définies après l'analyse et l'évaluation. Le choix des actions à entreprendre en priorité résultera de considérations technico-économiques relatives au coût, à la faisabilité et à l'efficacité de chaque action. Le plan mis en œuvre, on pourra identifier les risques résiduels et définir des mesures complémentaires.

Solution des exercices de TD



> Solution n°1 (exercice p. 38)

Considérons trois individus, dotés chacun d'une fonction d'utilité :

	Individu 1	Individu 2	Individu 3
Comportement face au risque	Indifférent	Réticent	Chercheur de risque
Forme de la fonction d'utilité	Linéaire $u(x) = a x$	Exponentielle $u(x) = k (1 - \exp(-\lambda x))$	Puissance $u(x) = a + b x^a$
Expression de la fonction d'utilité	Linéaire $u(x) = x$	Exponentielle $u(x) = 254.15 (1 - \exp(0,005 x))$	Puissance $u(x) = 0.1 x^{1.5}$

Tableau 15 : Tableau 3.2 : Fonctions d'utilité de trois individus, traduisant un comportement différent face au risque.

Les valeurs numériques des trois fonctions sont ajustées de manière à ce que $u(100)$ soit égal à 100 pour les trois fonctions. Calculons les caractéristiques des trois loteries :

	Loterie 1	Loterie 2	Loterie 3
Proba de gain p_1 Gain G $x_1 = 100 + G$	1/3 200 300	1/6 500 600	2/3 50 150
Proba de perte $p_2 = (1 - p_1)$ Perte P $x_2 = 100 - P$	2/3 100 0	5/6 100 0	1/3 100 0
Espérance $E = p_1 x_1 + p_2 x_2$ Variance $V = p_1 G^2 - p_2 100^2$	100 20000	100 50000	100 5000

Tableau 16 : Tableau 3.3 : Espérance et variance des gains pour les trois loteries.

L'espérance de la richesse finale est égale à la richesse initiale. Les trois loteries sont bien à espérance de gain nulle. L'utilité de l'espérance $u(E(x))$ est donc la même pour les trois loteries.

Calculons maintenant l'espérance de l'utilité $E(u(x))$ pour chaque loterie, en prenant les valeurs de l'application numérique.

		Individu 1	Individu 2	Individu 3
Comportement face au risque		Indifférent	Réticent	Chercheur de risque
	Fonction d'utilité	Linéaire	Exponentielle	Puissance
Loterie 1				
	$u(100 + G)$	300	197.4	519.6
	$u(100 - P)$	0	0	0
	$E_{L_1}(u) = p_1 u(100 + G) - p_2 u(100 - P)$	100	65.8	173.2
Loterie 2				
	$u(100 + G)$	600	241.5	1469
	$u(100 - P)$	0	0	0
	$E_{L_2}(u) = p_1 u(100 + G) - p_2 u(100 - P)$	100	40.2	244.9
Loterie 3				
	$u(100 + G)$	150	134.1	183.7
	$u(100 - P)$	0	0	0
	$E_{L_3}(u) = p_1 u(100 + G) - p_2 u(100 - P)$	100	89.4	122.5
		$E_{L_1}(u) =$ $E_{L_2}(u) =$ $E_{L_3}(u)$	$E_{L_3}(u) > E_{L_1}(u) > E_{L_2}(u)$	$E_{L_2}(u) > E_{L_1}(u) > E_{L_3}(u)$

Tableau 17 : Tableau 3.4 : Espérance de l'utilité pour les trois loteries et les trois individus.

La préférence de l'individu 2 va à la loterie 3 (celle à plus faible variance) et celle de l'individu 3 à la loterie 2 (celle à plus forte variance).

✓ Solution n°2 (exercice p. 39)

Formalisons le problème sous la forme d'un jeu :

- En cas de destruction du bien, la personne non assurée le perd, la personne assurée a payé sa prime mais est indemnisée de la valeur du bien.

- S'il n'y a pas destruction, la personne assurée a payé la prime, l'autre n'a rien payé.

	Jeu 1 Sujet assuré	Jeu 2 Sujet non assuré
Cas de la <u>destruction du bien</u> : Probabilité p_1	0.04	0.04
Issue x_1 Richesse finale $w_1 = 100 + x_1$	- 2 – 50 + 50 98	-50 50
Cas de la <u>non destruction</u> : Probabilité $1 - p_1$	0.96	0.96
Issue x_2 Richesse finale $w_2 = 100 + x_2$	-2 98	0 100
<u>Espérance</u> $E(w) = p_1 w_1 + (1 - p_1) w_2$	98	98

Tableau 18 : Tableau 3.6

On vérifie que le jeu est bien équilibré (à espérance de gain ou de perte nulle). Appliquons la théorie de l'utilité avec la fonction $u_1(w) = w$, où w est égal à la richesse initiale (100) à laquelle il faut ajouter le gain G ou retrancher la perte P .

	Jeu 1 Sujet assuré	Jeu 2 Sujet non assuré
$u_1(w_1)$	$u_1(98) = 98$	$u_1(50) = 50$
$u_1(w_2)$	$u_1(98) = 98$	$u_1(100) = 100$
$E(u) =$ $p_1 u_1(w_1) - (1 - p_1) u_1(w_2)$	$0.04 \times 98 + 0.96 \times 98 = 98$	$0.04 \times 50 + 0.96 \times 100 = 98$

Tableau 19 : Tableau 3.7

Pour cette fonction d'utilité linéaire $u_1(w)$, l'espérance de l'utilité est identique pour les deux jeux : le sujet est donc indifférent au risque ; il n'a aucune préférence pour l'une ou l'autre des solutions. Le même calcul peut être fait pour chacune des quatre fonctions d'utilité. Le tableau suivant regroupe les valeurs obtenues pour les deux jeux :

	Jeu 1 Sujet assuré	Jeu 2 Sujet non assuré	Différence Jeu 1- jeu 2
Linéaire $u_1(w)$	$E(u_1(w)) = 98$	$E(u_1(w)) = 98$	0
Neutre face au risque			
Logarithmique $u_2(w)$	$E(u_2(w)) = 99.56$	$E(u_2(w)) = 99.40$	0.16
Averse au risque			
Exponentielle $u_3(w)$	$E(u_3(w)) = 98.45$	$E(u_3(w)) = 98.25$	0.20
Averse au risque			
Puissance $u_4(w)$	$E(u_4(w)) = 97.02$	$E(u_4(w)) = 97.41$	- 0.39
Chercheur de risque			

Tableau 20 : Tableau 3.8 : Comparaison des comportements, selon l'expression de la fonction d'utilité.

Le jeu préféré est celui qui fournit la valeur la plus forte de l'espérance de l'utilité (donc le plus fort « équivalent certain » w^* , tel que $u(w^*) = E(u(w))$). Le Jeu 1 est préféré pour les fonctions d'utilité logarithmique et exponentielle. Dans ce cas, la personne préfère s'assurer, pour maximiser sa fonction d'utilité. Dans le cas contraire (fonction puissance), la personne préfère ne pas s'assurer (choix du Jeu 2), ce qui maximise sa propre fonction d'utilité.

> **Solution n°3** (exercice p. 40)

	Jeu 1 Sujet assuré	Jeu 2 Sujet non assuré
<u>Cas de la destruction du bien :</u> Probabilité p_1	p_1	p_1
Issue x_1 Richesse finale $w_1 = 100 + x_1$	- PR – 100 + 100 100 - PR	-100 0
<u>Cas de la non destruction :</u> Probabilité $1 - p_1$	$1 - p_1$	$1 - p_1$
Issue x_2 Richesse finale $w_2 = 100 + x_2$	- PR 100 - PR	0 100
<u>Espérance de l'utilité</u>	$E(u(w)) = p_1 u(w_1) + (1 - p_1) u(w_2)$	

Tableau 21 : Tableau 3.9

Calculons l'espérance de l'utilité dans les deux situations :

- Sujet assuré :

$$E(u(w)) = p_1 u(w_1) + (1 - p_1) u(w_2) = p_1 u(w_1) + (1 - p_1) u(w_1) = u(w_1) = k(1 - e^{-\lambda(100 - PR)})$$

- Sujet non assuré :

$$E(u(w)) = p_1 u(w_1) + (1 - p_1) u(w_2) = p_1 k(1 - e^{-0\lambda}) + (1 - p_1) k(1 - e^{-100\lambda}) = (1 - p_1) k(1 - e^{-100\lambda})$$

Après simplifications et réécriture, il vient :

$$PR = 100 - \frac{1}{\lambda} \ln(1 - (1 - p_1)(1 - e^{-100\lambda}))$$

On peut donc tracer la variation de la prime de risque pour différentes valeurs de risque (p_1) en fonction du coefficient d'aversion λ , comme sur la figure 3.5.

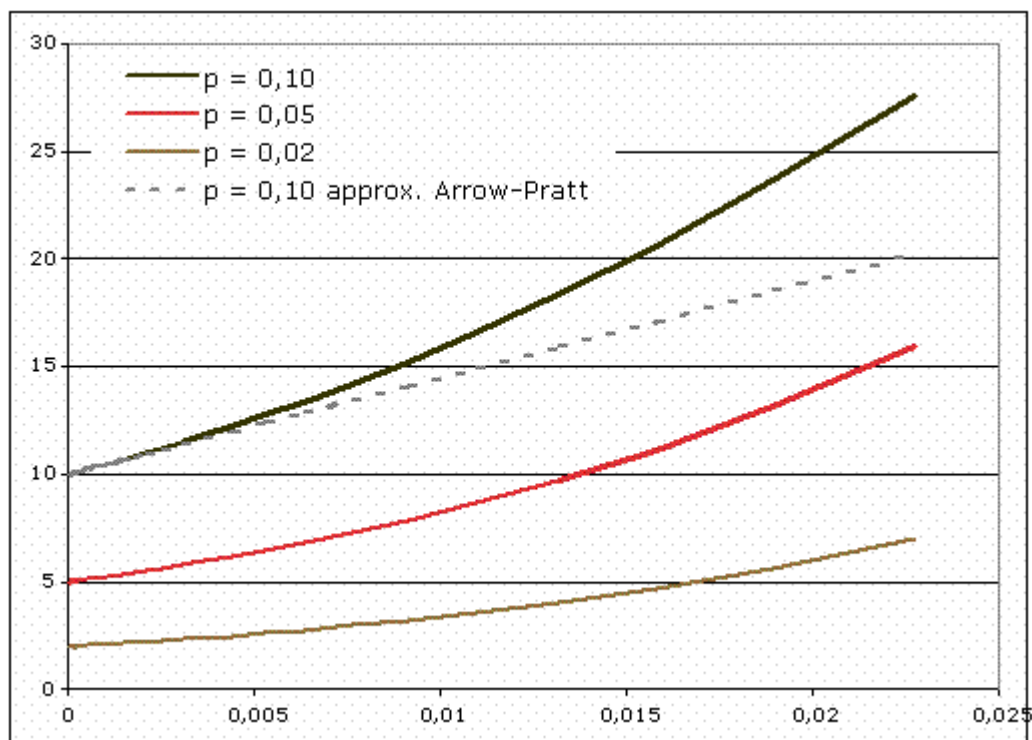


Figure 3.5 : Variation de la prime de risque pour différents niveaux d'aversion, et différents degrés de risque.

Les trois courbes correspondent à des niveaux respectifs du risque p_1 de 2 %, 5 % et 10 %. Si le coefficient d'aversion est nul, la personne est indifférente au risque, et la prime de risque est simplement égale à l'espérance de perte (soit respectivement 2 %, 5 % et 10 % de la valeur du bien).

Si le coefficient d'aversion augmente, la personne est de plus en plus encline à payer pour se protéger, pour compenser la perte d'utilité résultant du Jeu 2. Ainsi, pour une probabilité de 5 % et un $\lambda = 0,014$, la prime est de 10, soit deux fois plus élevée que l'espérance de perte. C'est sur ce principe que les compagnies d'assurances s'appuient pour établir leur tarification.

Sur le graphique, nous avons aussi représenté une droite en pointillés, qui correspond à une approximation de la prime de risque, valide pour les faibles valeurs de λ . Cette droite provient de l'approximation de Arrow et Pratt, qui ont montré, à partir de développements limités, que l'on peut écrire :

$$PR \approx A.V/2$$

où A est le coefficient d'aversion au risque ($= \lambda$ pour la fonction exponentielle) qui ne dépend que du sujet, et où V est la dispersion de l'expérience aléatoire que

constitue le jeu. A relève de la psychologie du joueur quand V ne dépend que des éléments caractéristiques objectifs du jeu.

Dans l'exercice, si l'on considère que le Jeu 2 est une loterie, on a :

$$E(w) = p_1 w_1 + (1 - p_1) w_2$$

$$V(w) = p_1 (E(w) - w_1)^2 + (1 - p_1) (E(w) - w_2)^2$$

Soit, avec $w_1 = 0$ et $w_2 = 100$:

$$E(w) = 100(1 - p_1) \text{ et } V(w) = 100^2 p_1 (1 - p_1)$$

Il vient donc, par l'approximation de Arrow et Pratt :

$$PR \approx \frac{\lambda}{2} 100^2 p_1 (1 - p_1)$$

La figure illustre bien que cette approximation fournit une valeur très voisine de la valeur vraie quand le coefficient d'aversion est faible.

> Solution n°4 (exercice p. 61)

Les événements associés aux coûts généralisés sont :

- La construction de l'ouvrage, certaine, de coût $C = C_{ref} + 1000H$ (unité monétaire)
- La submersion, de probabilité $p(H) = \exp(-H/2)$ et de coût $C_s = 10000$ (unités monétaires)

L'espérance du coût total s'écrit alors :

$$C_g(H) = C_{ref} + 1000H + 10000 \exp(-H/2)$$

La dérivée s'exprime :

$$C'_g(H) = 1000 - 5000 \exp(-H/2)$$

Le minimum du coût est obtenu pour la valeur de H qui annule la dérivée, soit :

$\exp(-H/2) = 0.2$, soit $H = 3.22$,

et correspond à une probabilité de submersion $p(h > 3.22) = 0.20$

Si l'événement peut provoquer des victimes, le coût de la submersion doit le prendre en compte, sous la forme :

$$C_s = 10000 + p_{vict} N_{vict} C_{vict}$$

où p_{vict} , N_{vict} et C_{vict} sont respectivement la probabilité que l'événement engendre des victimes, le nombre moyen de victimes prévisibles et la valeur attribuée à chaque victime.

Par exemple, en prenant $p_{vict} = 10\%$ et $N_{vict} = 5$, on obtient :

$$C_g(H) = C_{ref} + 1000H + (10000 + 0,5C_{vict})\exp(-H/2)$$

$$\text{Soit : } C'_g(H) = 1000 - (5000 + 0,25C_{vict})\exp(-H/2)$$

La solution optimale annule la dérivée, soit :

$$H = -2\ln(1000 / (5000 + 0,25C_{vict}))$$

Les figures suivantes montrent comment varient, selon la valeur attribuée aux victimes, la hauteur optimale du batardeau, la probabilité de submersion et la part des coûts humains dans les coûts totaux.

On voit clairement dans quelle mesure la prise en compte des coûts humains modifie la solution optimale, vers une probabilité plus faible de défaillance, et donc vers des coûts plus élevés. Ces figures illustrent combien les hypothèses faites, en particulier celles relatives aux coûts immatériels, conditionnent le choix de la solution optimale.

On observe sur l'exemple que le choix de l'optimum économique conditionne directement le degré de sûreté du système. Au-delà du caractère cynique d'une telle démarche, on en perçoit clairement les potentialités, sous réserve que l'on soit capable d'exprimer de telles fonctions.

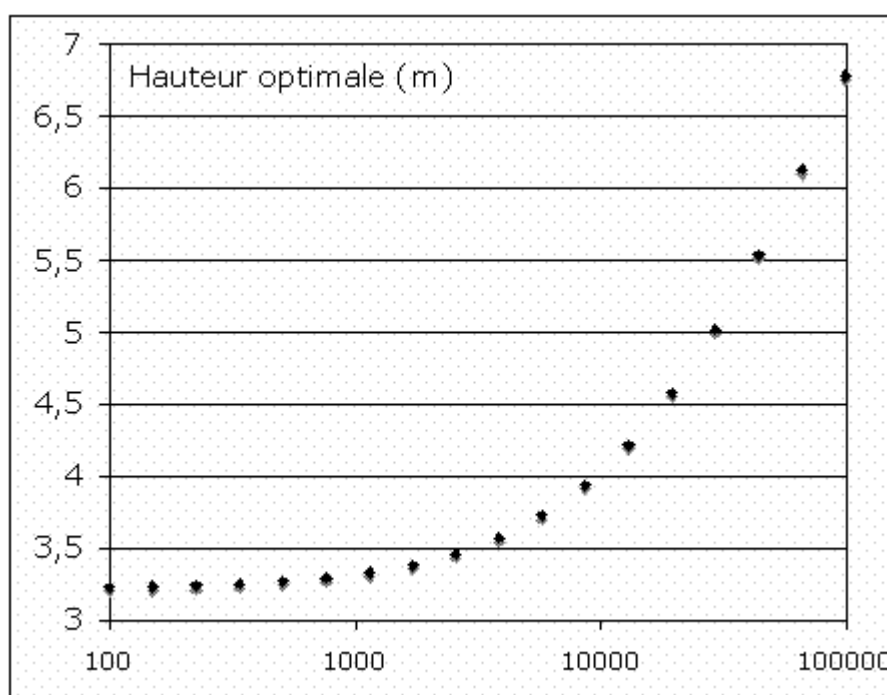


Figure 4.1 : Influence du coût des victimes sur la hauteur optimale.

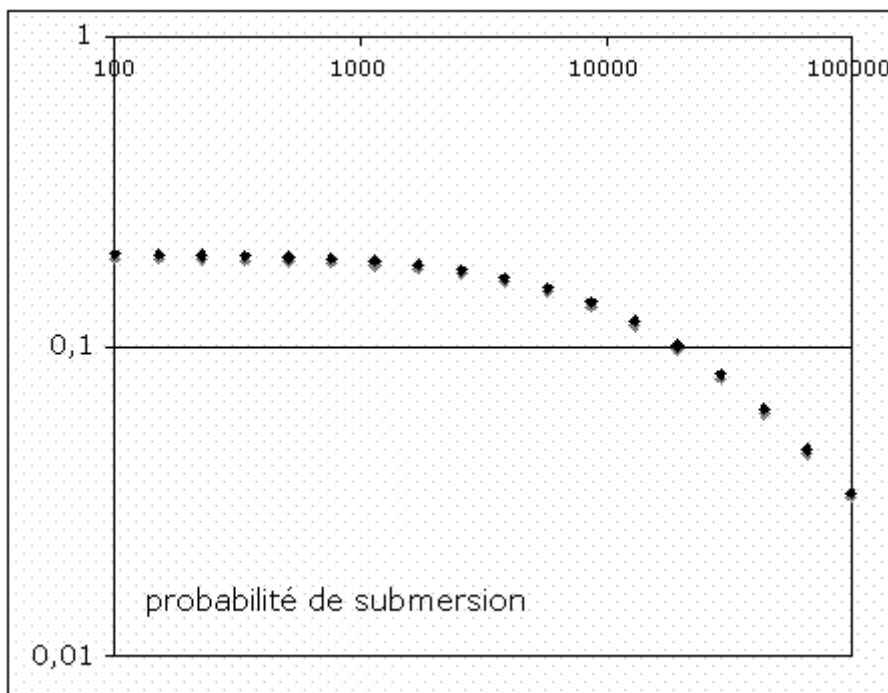


Figure 4.2 : Influence du coût des victimes sur la probabilité optimale.

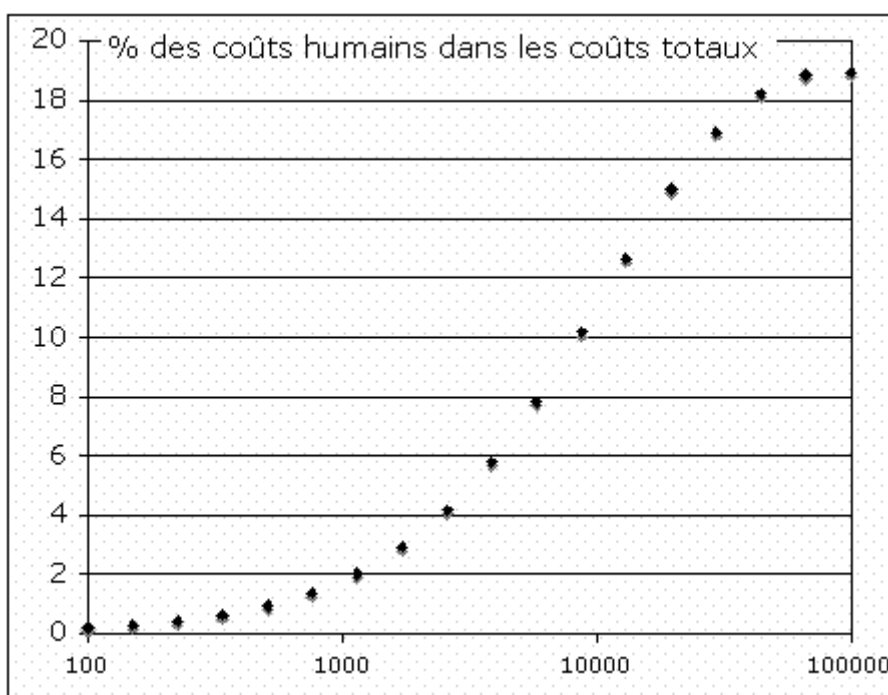


Figure 4.3 : Pourcentage des coûts humains dans le coût global, selon le coût d'une victime.

> **Solution n°5** (exercice p. 62)

En reprenant l'analyse de l'Exercice 4.1, on peut écrire :

Cas A	Cas B
$C_g(H) = C_{ref} + 1\,000 H$ $+ (10\,000 + 0.5 C_{vict}) \exp(-H/2)$	$C_g(H) = C_{ref}/4 + 250 H$ $+ (2\,500 + 0.05 C_{vict}) \exp(-H/2)$
$H_{opt} = -2 \ln[1\,000 / (5\,000 + 0.25 C_{vict})]$	$H_{opt} = -2 \ln[250 / (1\,250 + 0.025 C_{vict})]$

Tableau 22 : Tableau 4.2

On peut en déduire les probabilités de submersion pour les deux solutions optimales, et tracer le rapport de ces probabilités :

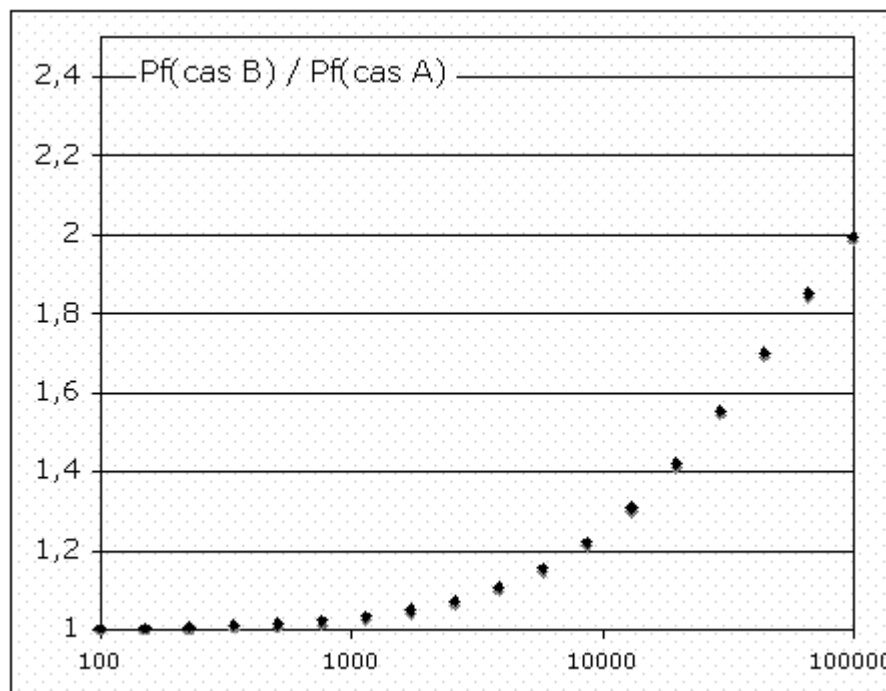


Figure 4.4 : Influence du contexte économique sur le degré de sécurité de la solution, pour différentes valeurs du coût des victimes.

Les coûts sont globalement plus faibles dans le Cas B que dans le Cas A (avec un rapport de l'ordre de 4 à 5) mais, ils s'accompagnent aussi d'un degré de sécurité plus faible dans le Cas A, du fait du moindre coût considéré pour les victimes. La sécurité est moindre dans le Cas B, mais elle correspond cependant à l'optimum pour les hypothèses correspondantes.

Evitons toute conclusion trop générale sur ce sujet, mais le simple constat des dégâts comparés de cataclysmes naturels (tornades, inondations, ...) dans des pays à différents niveaux de développement démontre assurément que, même si la démarche n'est pas, dans la réalité, totalement formalisée, la structure des chaînes de décision nationales est telle que de tels optimums sont effectivement trouvés dans ces différents contextes.

Glossaire

Accident majeur

un événement tel qu'une émission, un incendie ou une explosion d'importance majeure résultant de développements incontrôlés survenus au cours de l'exploitation, entraînant pour la santé humaine ou pour l'environnement, à l'intérieur ou à l'extérieur de l'établissement, un danger grave, immédiat ou différé, et faisant intervenir une ou plusieurs substances ou des préparations dangereuses.

Action

Qualifie toute source, tout phénomène pouvant s'exercer sur un ouvrage et y engendrer des sollicitations dont il convient d'analyser les conséquences. Les actions sont les forces, pressions, couples dus aux charges et aux déformations imposées à la construction. On distingue :

- Les actions directes, qui s'appliquent directement sur l'ouvrage : charges permanentes telles que le poids propre et les autres charges fixes, charges d'exploitation (trafic, surcharges sur des planchers)... , charges climatiques (neige et vent), charges sismiques ;
- Les actions indirectes : effets thermiques et de variations de température, précontraintes, déplacements imposés, tassements différentiels d'appuis, étaitements provisoires...

On distingue aussi les actions en fonction de leur variation dans le temps :

- Actions permanentes, par exemple poids propre des structures, équipements fixes et revêtements de chaussée, ainsi que les actions indirectes provoquées par le retrait et des tassements différentiels;
- Actions variables, par exemple les charges d'exploitation sur planchers, poutres et toits de bâtiments, les actions du vent ou les charges de neige;
- Actions accidentelles, par exemple les explosions ou les chocs de véhicules.

ALARP

(As Low As Reasonably Practicable = Aussi Faible Que Raisonnablement Réalisable) principe utilisé pour définir un niveau de risque qui peut être obtenu pour le système considéré et qui est acceptable par tous ceux qui peuvent être affecté par la menace.

En conséquence, il résulte de ce principe que des risques supérieurs au niveau seuil d'acceptabilité ne sont tolérables que si leur réduction est impossible ou d'un coût disproportionné par rapport aux bénéfices qui en résultent [Ref-TC32].

Aléa

Qualifie tout événement, phénomène imprévisible ou activité humaine qui peut provoquer la perte de vies humaines, des blessures, des dommages aux biens, des perturbations sociales ou économiques ou la dégradation de l'environnement.

Aléa naturel (« natural hazard »)

Qualifie tout aléa d'origine naturelle, source potentielle de dommages.

Aléa technologique

Par opposition à l'aléa naturel, qualifie tout aléa d'origine anthropique ou technologique.

Aléatoire (« random »)

Qualificatif décrivant un processus dont le résultat varie même si l'ensemble des données d'entrée reste identique [Ref-TC32]. En latin, « aleator » était le joueur de dé. On qualifie d'« expérience aléatoire » une épreuve dans laquelle la répétition d'un même protocole conduit à différents résultats . Un exemple simple est celui du lancer d'un dé.

Analyse de risque (« risk analysis »)

Exploitation systématique des informations disponibles pour identifier la mise en danger (sources potentielles de dommage) et pour estimer les risques.

L'analyse de risque consiste à utiliser l'information disponible pour établir des scénarios résultant de l'occurrence d'un aléa, et déterminer la probabilité et l'amplitude de ses conséquences sur les individus et la population, les biens matériels et l'environnement, du fait des aléas.

Cette démarche est conforme à la définition usuelle du vocable « analyse », c'est-à-dire un examen détaillé d'un phénomène complexe de manière à en comprendre la nature ou à déterminer les caractéristiques essentielles. L'analyse de risque requiert la décomposition du système et des sources de risques à l'échelle de leurs constituants élémentaires [Ref-TC32].

L'analyse de risque repose en général sur les étapes suivantes :

- définition du périmètre traité,
- l'identification des dangers, en liaison avec les données : environnement naturel, humain, technologique...
- les scénarios de défaillance, en liaison avec les bases de données et les typologies d'ouvrages,
- le recours aux modèles de représentation des défaillances, et les questions relatives à leur qualité,
- estimation des probabilités d'occurrence des aléas et des scénarios,
- l'estimation de la vulnérabilité des enjeux,
- l'identification des conséquences et l'évaluation des risques.

Catastrophe

Perturbation profonde du fonctionnement d'une collectivité ou d'une société, causant des pertes humaines, matérielles, économiques ou environnementales de grande ampleur, qui surpasse les capacités de la collectivité ou de la société affectée à les surmonter par ses propres moyens [Ref-TC32].

Conséquences

Voir impact.

Danger, menace (« danger, threat »)

Dans le langage usuel, le danger est ce qui menace ou compromet la sûreté, l'existence d'une personne ou d'une chose (Robert).

L'AFNOR le définit comme une source potentielle de dommages. Pour l'ISO, la

menace est une cause potentielle d'un incident non désiré qui peut résulter dans des dommages à un système ou une organisation [ISO/IEC 13335-1:2004] [ISO/IEC 17799:2000].

Défaillance (« failure »)

Altération ou cessation de l'aptitude d'un système, à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques (norme AFNOR NF X60-010).

Déterministe

Qualificatif décrivant un processus ou une expérience dont le résultat est toujours identique pour un jeu fixe de données d'entrée [Ref-TC32].

Dommmages

Conséquences d'un événement sur les biens, les personnes et les fonctions d'un système. Les dommages peuvent être exprimés en termes humains, financiers, économiques, sociaux ou environnementaux.

Enjeux (« elements at risk »)

Ensemble des éléments (population, bâtiments, infrastructures, patrimoine environnemental, activités et organisations) pouvant être exposés au danger [Ref-TC32].

Les enjeux sont susceptibles de subir des dommages ou des préjudices sous l'effet d'un danger. Les enjeux sont définis par leur valeur et leur vulnérabilité, ce qui constitue une étape de l'évaluation des risques.

Erreur

Dans le langage courant, le terme désigne une faute évitable, p. ex. erreurs de lecture de plan, erreur de calcul, erreur de mesure... En statistique, c'est la différence entre le résultat d'un calcul, d'une estimation ou d'une mesure et la valeur "vraie" ou la valeur "probable". Elle n'est pas alors reliée à la notion de faute, mais à celle d'incertitude (aléatoire ou épistémique).

Estimation des risques

Procédure pour déterminer des valeurs pour la probabilité de la survenance d'un risque et des conséquences possibles*. C'est une phase de l'analyse de risque, postérieure à l'identification des risques et antérieure à leur évaluation, qui consiste à quantifier les phénomènes (probabilité, intensité, gravité).

Evaluation du risque (« risk assessment »)

Etape de l'analyse des risques au cours de laquelle des valeurs et des jugements intègrent le processus de décision, de manière explicite ou implicite, en prenant en considération l'importance des risques estimés et des conséquences sociales, environnementales et économiques qui leur sont associées, de façon à identifier un ensemble de possibilités en termes de gestion des risques [Ref-TC32].

Sur le plan normatif et réglementaire, la procédure de l'évaluation du risque est basée sur des critères de risque qui n'ont jusqu'à maintenant pas encore été normalisés sur le plan international.

Exposition au risque

Qualifie la situation dans laquelle les enjeux sont soumis au danger. On l'utilise souvent en épidémiologie, pour qualifier les situations dans lesquelles les individus se trouvent dans un environnement (par exemple du fait de leurs activités) susceptible de causer des dommages.

Facteurs de risque

Les éléments de nature collective ou individuelle qui interfèrent de telle façon sur le danger qu'ils augmentent ou réduisent la probabilité d'occurrence des effets néfastes ainsi que leur ampleur. L'identification des risques repose sur une identification de ces facteurs, et de leur influence sur les risques.

(voir analyse de sensibilité).

Facteurs humains

Ensemble des facteurs relatifs aux individus (psychologie, degré de préparation, vigilance...) et à leur organisation collective (organisation du travail, aspect sociaux...) qui peuvent influencer les comportements et la réponse du système d'une manière telle qu'elle peut affecter la sécurité [Ref-TC32].

Fiabilité

Définition selon le sens général :

Prise dans son sens général, la fiabilité d'un système, d'un ouvrage, d'un équipement est son aptitude à répondre aux objectifs de sa conception (aux exigences) pendant une durée spécifiée, dans les conditions d'environnement auxquelles elle est soumise [AFNOR NF X50-120].

On mesure le degré de vraisemblance d'un fonctionnement satisfaisant. Parmi les objectifs de la fiabilité figure celui de ne pas compromettre la sécurité des personnes et des biens.

Définition selon le sens mathématique :

La théorie de la fiabilité est l'ensemble des méthodes reposant sur l'emploi des probabilités et utilisées pour évaluer cette fiabilité. Mathématiquement, la fiabilité est le complément à l'unité de la probabilité de défaillance.

(voir sûreté, sécurité).

Fréquence

Une mesure de vraisemblance exprimée comme le nombre d'occurrences d'un événement de nature et d'intensité données pendant une certaine durée (par exemple fréquence annuelle) ou rapporté à un nombre donné de tirages [Ref-TC32].

Gestion du risque

Procédure globale regroupant l'appréciation du risque, la décision, le traitement du risque et sa surveillance.

Les différentes phases de la gestion du risque :

- Appréciation du risque.
- Analyse de risque.
- Identification de la mise en danger => Estimation du risque => Evaluation du risque => Décision => Traitement du risque et Surveillance.

Cette procédure consiste en l'application de décisions administratives, de choix relatifs à l'organisation, de compétences et savoir-faire, qui permettent de mettre en oeuvre des politiques, des procédures et des pratiques de gestion qui influent sur l'ensemble de la chaîne de risque, depuis l'identification des risques jusqu'à leur réduction et leur contrôle [Ref-TC32].

La gestion des risques comprend toutes les formes d'activités, y compris les mesures structurelles et non structurelles pour éviter (prévention) ou limiter (réduction, préparation) les conséquences néfastes des aléas.

Gravité

Mesure de l'intensité des conséquences de la défaillance (ou de l'accident), lorsqu'elle se produit. La gravité peut aussi être utilisée en phase de prévision : c'est alors une évaluation de l'impact probable du danger.

Hasard

Cause fictive de ce qui arrive sans raison apparente ou explicable (Petit Robert).

Impact

Conséquences de l'événement affectant les enjeux. Il dépend de l'intensité de l'aléa et de la vulnérabilité des enjeux. Dans le domaine des risques, l'impact est en général négatif.

Voir gravité.

Incertain

Caractérise un ensemble d'issues possibles d'une situation donnée. Le résultat d'une expérience aléatoire est incertain : il n'est pas connu à l'avance.

Incertitude

État de ce qui est incertain, Chose incertaine, mal connue, qui prête au doute, ou encore (Petit Robert).

L'incertitude décrit toute situation en l'absence de certitude, que cette absence résulte des variations naturelles et/ou de la compréhension imparfaite que l'on a des phénomènes et des objets, soit par manque de connaissance, soit par manque d'information.

Intensité

Expression de l'amplitude du phénomène menaçant, évaluée ou mesurée par ses paramètres physiques. Elle intervient dans l'évaluation de l'aléa (intensité de l'aléa sismique, intensité du choc d'un véhicule sur un ouvrage...).

Lorsqu'il n'est pas possible d'évaluer ces paramètres physiques (par exemple dans le cas de phénomènes très rares ou très intenses), on peut recourir à des méthodes indirectes, basées sur l'importance de leurs conséquences potentielles en termes d'endommagement ou de dangerosité ou de l'importance des parades théoriquement nécessaires pour annuler le risque.

Maîtrise des risques (« risk management »)

Processus d'application de la politique de l'organisme permettant la mise en œuvre itérative et continue de l'analyse et de la gestion des risques d'un projet [AFNOR - FD X50-117].

Elle repose sur un ensemble de règles et d'actions mises en œuvre pour maintenir le risque dans des limites tolérables. Elle s'appuie d'une part sur la mise au point et l'utilisation d'un ensemble de techniques (procédures, équipements, automatismes, mesures...) visant à réduire la probabilité d'occurrence des aléas et leurs conséquences, constituant l'ingénierie du risque, d'autre part sur des structures organisationnelles, vérifiant que les mesures techniques restent opérationnelles (contrôle régulier).

Mécanisme de défaillance

Processus physique à l'issue duquel les performances exigées d'un système ne sont satisfaites. La description du mécanisme de défaillance repose sur la modélisation de la succession causale des états qui conduit à la perte de performance.

(voir arbre des défaillances, arbre des événements).

Parades (« countermeasures »)

Toutes les mesures protectrices prises pour réduire ou contrer un aléa ou les conséquences d'un aléa. La mise en oeuvre de parades est à la base de toute stratégie de réduction des risques. Les parades relèvent souvent de mesures d'ingénierie (structurelles), mais elles peuvent aussi intégrer des mesures non structurelles (législatives, financières, sociales...) et des outils conçus et employés pour éviter ou limiter les effets négatifs des aléas [Ref-TC32].

On distingue les parades actives, qui visent à réduire les aléas, des parades passives, qui visent à réduire les impacts (en réduisant la vulnérabilité). On peut aussi distinguer les parades individuelles et les parades collectives, ou en fonction de leur nature : technologique, réglementaire, financière...

Période de retour

Intervalle de temps T permettant de caractériser la durée moyenne entre deux occurrences successives d'un phénomène aléatoire d'une intensité donnée. L'estimation de la période de retour repose sur l'analyse de chroniques statistiques des phénomènes (précipitations, crues, séismes, accidents...).

La définition mathématique stricte de la période de retour correspond à une probabilité de dépassement de 63,2 % de l'intensité de l'action correspondante sur une durée d'étude égale à la période de retour (exemple : une crue décennale a 63,2 chances sur 100 de se produire au moins une fois sur une période de 10 ans).

Une approximation permet, si l'on considère des périodes d'études courtes par rapport à la période de retour de quantifier la probabilité de dépassement sous la forme $p = 1/T$ (par exemple, une crue centennale a approximativement une chance de 1 % de survenir chaque année).

Prévention

Mesures visant à supprimer ou à réduire un risque avéré, soit en supprimant ou modifiant le danger initiateur du risque, soit en diminuant la probabilité d'occurrence ou la gravité de ses conséquences.

Quatre grands principes régissent toute démarche de prévention : tout d'abord l'évaluation du risque, dans la mesure du possible son élimination, sinon la mise en place de parades collectives et en dernier ressort, la parade individuelle. La prévention doit être intégrée le plus en amont possible, en passant par des mesures d'organisation, d'information et de formation (source INRS).

Principe de précaution

La précaution qualifie une manière d'agir avec prudence, pour éviter un danger ou en diminuer les effets. Au contraire de la prévention, qui s'applique aux risques avérés, la précaution s'applique aux risques potentiels (qui peuvent d'ailleurs être nuls).

Le principe de précaution définit l'attitude que doit observer toute personne qui prend une décision concernant une activité dont on peut raisonnablement supposer qu'elle comporte un danger grave pour la santé ou la sécurité des générations doivent faire prévaloir les impératifs de santé et de sécurité sur la liberté des échanges entre particuliers et entre États. Il commande de prendre toutes les dispositions permettant, pour un coût économiquement et socialement supportable, de détecter et d'évaluer le risque, de le réduire à un niveau acceptable et, si possible, de l'éliminer, d'en informer les personnes concernées et de recueillir leurs suggestions sur les mesures envisagées pour le traiter. Ce dispositif de précaution doit être proportionné à l'ampleur du risque et peut être à tout moment révisé.

Bien qu'il en existe plusieurs variantes dans le monde, le principe de précaution

soutient généralement que, en présence d'une grande incertitude scientifique et d'une possibilité d'effets défavorables importants (mais possiblement imprévus), la prise de décisions administratives doit pécher par excès de prudence.

Probabilité

Concept statistique qui peut soit exprimer un degré de croyance ou une mesure de l'incertain (probabilité subjective), soit être pris comme la limite de la fréquence relative dans une série infinie (probabilité statistique).

Probabilité cible (« target probability »)

Valeur de la probabilité de défaillance en dessous de laquelle on souhaite que se trouve le système dont on veut garantir la sécurité. La probabilité cible est fixée en fonction des moyens dont on dispose et du degré d'acceptabilité des risques .

Dans le domaine de la sécurité des ouvrages, les règlements de construction (Eurocodes) sont conçus et rédigés de manière à ce que des probabilités cibles (qui dépendent de la nature des états-limites concernés) soient respectées pour des ouvrages correctement conçus et réalisés.

(voir ALARP).

Probabilité de défaillance

Complément à l'unité de la fiabilité.

Risque

Dans le langage courant, le risque est « un danger éventuel plus ou moins prévisible » (Petit Robert, 1996) ou « un danger, inconvenient plus ou moins probable auquel on est exposé » (Petit Larousse, 1997).

Définition scientifique :

- La définition scientifique du risque inclut une double dimension : celle des aléas et celle des pertes, toutes deux probabilisées. En conséquence, un risque se caractérise par deux composantes : le niveau de danger (probabilité d'occurrence d'un événement donné et intensité de l'aléa); et la gravité des effets ou des conséquences de l'événement supposé pouvoir se produire sur les enjeux.

On trouve cependant deux définitions assez différentes dans la normalisation internationale des risques :

1. « la combinaison de la probabilité d'un événement et de ses conséquences » ;
2. « la combinaison de la probabilité d'un dommage et de sa gravité ».

Risque acceptable (« tolerable risk »)

Le niveau de perte qu'un individu, une communauté ou une société considère comme acceptable, étant données les conditions sur les plans social, économique, politique, culturel, technique et environnemental.

En ingénierie, le « risque acceptable » est utilisé pour définir les mesures structurelles et non structurelles à mettre en oeuvre pour réduire les dommages probables à un niveau de référence. C'est cette notion qui est utilisée, par exemple, pour définir les probabilités cibles des règlements de calcul.

Le choix de la valeur acceptable peut résulter d'un accord entre toutes les parties concernées (créateurs de risque, populations soumises au risque, experts, politiques...). La notion d'arbitrage collectif repose sur le postulat d'un partage éclairé des informations disponibles entre les individus concernés.

Risque naturel

Événement dommageable, intégrant une certaine probabilité, conséquence d'un aléa naturel survenant dans un milieu vulnérable.

Risque naturel

Événement dommageable, intégrant une certaine probabilité, conséquence d'un aléa naturel survenant dans un milieu vulnérable.

Risque résiduel

Niveau de risque qui reste à tout moment, avant, pendant et après la mise en œuvre d'un programme de traitement des risques [Ref-TC32].

Risque résiduel

Niveau de risque qui reste à tout moment, avant, pendant et après la mise en œuvre d'un programme de traitement des risques [Ref-TC32].

Risque technologique

Le risque industriel se caractérise par un accident se produisant sur un système technique et pouvant entraîner des conséquences graves pour le personnel, les populations, les biens, l'environnement ou le milieu naturel. On parle de risque industriel quand c'est une installation industrielle qui est affectée (usine chimique, centrale de production d'énergie).

Scénario

Une combinaison unique d'états des composants du système. Le scénario définit une suite de circonstances pertinentes pour la phase d'estimation des risques, par exemple des scénarios de chargement ou de défaillance [Ref-TC32].

Sécurité

Dans le langage usuel, la sécurité (du latin securus) possède un double sens. C'est à la fois (Robert) :

- l'état d'esprit confiant et tranquille de celui qui se croît à l'abri du danger
- la situation, l'état tranquille qui résulte de l'absence réelle de danger.

Ces deux définitions font référence au danger, mais dans un cas, il s'agit d'une situation assurée, dans l'autre la sécurité résulte d'une perception, qui peut ne pas correspondre à la réalité ("se croît").

Dans le langage technique, un système est dit en sécurité s'il est dans un état tel qu'il ne puisse pas porter atteinte à l'homme, aux biens ou à l'environnement*.
(voir sûreté, fiabilité) .

Surveillance

Ensemble de moyens pouvant être utilisés en gestion de risques pour s'assurer du bon fonctionnement d'un système, repérer des évolutions précoces, détecter des phénomènes imprévus. La surveillance peut être visuelle, ou reposer sur des moyens métrologiques plus sophistiqués.

(voir les différentes phases de la procédure globale de gestion des risques).

Système

Ensemble de composants (ou d'éléments) en interaction [Ref-TC32].

Tolérable

(voir Risque acceptable).

Vulnérabilité

Susceptibilité d'un système d'enjeux à subir des dommages sous l'action d'un danger.

Références



- [1] A. Villemeur, Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels, Eyrolles, 1988.
- [10] Un des premiers objectifs quantifiés de risque a été proposé juste avant la seconde guerre mondiale par Sir Alfred Grenville Pugsley, dans le domaine de la fiabilité des avions, en demandant que, « en considérant toutes les causes de pannes susceptibles d'entraîner un accident », le taux d'accident ne puisse dépasser 10⁻⁵ par heure, dont 10⁻⁵ par heure pour des causes liées à la structure de l'avion (Lannoy, 2008).
- [2] Terminology: basic terms of disaster risk reduction, ibid.
- [3] Guide 73 de l'ISO/IEC ibid.
- [4] Guide 51 de l'ISO/IEC « Aspects de sécurité – Directives pour leur inclusion dans des normes », 1999.
- [7] Le choix de la période de retour des actions a été fixée par la Loi, ce qui ne manque pas de poser aujourd'hui de nouveaux problèmes. Les progrès des recherches menées depuis les années 50 révèlent qu'en fait, les probabilités ne sont pas identiques pour toutes les régions des Pays-Bas et que certains citoyens sont donc soumis à un risque plus élevé que d'autres. Il faut donc convaincre les parlementaires de modifier les textes de loi pour harmoniser la sécurité effective [Van Gelder et al., 1999].
- [8] A partir de 1977 d'autres commissions furent chargées de repréciser les risques d'inondations liés aux crues du Rhin. Une période de retour de 1 250 ans fut choisie. Le niveau de sécurité est défini dans une loi (flood protection act), dans laquelle sont données, pour chacune des 53 régions géographiques, les fréquences de submersion des digues (plus faciles à estimer mathématiquement que les fréquences d'inondation). Les niveaux de sécurité définis dans les premiers textes imposaient des travaux d'aménagement et de surveillance que la population a fini par juger trop contraignants. Le niveau de sécurité recherché dut alors être revu à la baisse, l'approche purement économique ne suffisant pas [Wind, 1999].
- [9] On pourrait faire la même réflexion à propos des accidents

routiers. Une culture du risque doit être à la base d'une politique de prévention routière : l'accident ne peut être considéré comme un épiphénomène isolé, imprévisible. Il faut au contraire en analyser les causes, les scénarios, de manière à en réduire la fréquence, la gravité.