



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université du 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Polycopié

Aléas et risques géotechniques

Élaboré par :

Dr. Mme Boutahir Née Bencheikh Messaouda

(Docteur en Génie Civil – Option Géotechnique)



Année
universitaire
2021-2022



« La seule façon d'éviter, autant que faire se peut, les catastrophes ou accidents graves, ou d'en limiter les effets, c'est de s'y préparer sans esprit catastrophique mais avec lucidité et détermination ». Haroun Tazieff

Depuis quelques années, les questions relatives au risque géotechnique, à la sécurité des ouvrages et les désordres imputables au sol constituent le poste le plus lourd de la sinistralité globale enregistrée dans le secteur de la construction et reviennent périodiquement à la une de l'actualité, le plus souvent à la suite d'accidents spectaculaires et catastrophiques qui interpellent les citoyens et les pouvoirs publics. Dans le même temps, l'ingénierie géotechnique connaît une évolution en termes d'organisation et de gestion de risques.

Pour cela, Ce polycopié destiné aux étudiants de Master I Géotechnique ainsi les étudiants de plusieurs spécialités telles que Voiries et ouvrages d'art et les travaux publics, a pour objet d'initier l'étudiant à la compréhension de certains risques géotechniques, à leur analyse et à leur évaluation afin de mieux gérer des situations de crise et de prendre les décisions adéquates.

La gestion du risque fait partie intégrante de la vie de l'ingénieur géotechnicien. Elle consiste à pouvoir identifier les risques, les quantifier et les contrôler. L'apprentissage proposé est acquis en éclairant le volet « risque » de différents problèmes géotechniques déjà maîtrisés dans le cursus géotechnique obligatoire, ainsi qu'en introduisant de nouveaux problèmes où l'aléa se situe au niveau de la sollicitation et du comportement particulier de sols.

Dans ce contexte, il représente un aide mémoire couvrant les chapitres du programme officiel à travers cinq chapitres.

«La gestion des risques est une façon de dissiper le brouillard d'incertitude dans lequel nous vivons. »
Felix Kloman, 2008

« Une cause très petite, et qui nous échappe, détermine un effet considérable que nous ne pouvons pas ne pas voir, et alors nous disons que cet effet est dû au hasard ».

Henri Poincaré, 1908.

Les ouvrages de génie civil, suivant leurs fonctionnalités, leurs localisations, leurs exploitations depuis leurs constructions et durant toutes leurs vie, peuvent être soumis aux des risques multiples pouvant influencer sa fiabilité et peuvent avoir un impact négatif sur son environnement. La géotechnique joue un rôle essentiel dans l'art de construire. Les missions géotechniques suivant la norme AFNOR NF P 94 500 dont l'objectif est de déterminer les propriétés du sol et de leurs incidences sur les ouvrages, définissent les différents types d'études. Le site de construction d'un ouvrage est soumis aux effets de phénomènes naturels ou anthropiques.

L'approche classique utilisée actuellement dans le domaine de dimensionnement des ouvrages géotechniques (telque le DTU 13.12, le DIN et le Fascicule), même si elle permet de minimiser les aléas et/ou la vulnérabilité, n'apporte pas toujours les résultats souhaités parce qu'elle ne tient pas compte, d'une part, le caractère aléatoires des paramètres géotechniques , de la complexité de l'environnement technique, administratif et réglementaire d'une opération publique de construction.

L'analyse et la gestion des risques traite toujours de la possibilité d'écarts négatifs ou indésirables et se rapporte à la perte de valeurs ou de biens existants. Une approche de gestion des risques est un outil de prise de décisions qui permet de concrétiser ce qui est souvent un processus intuitif. Le processus de gestion des risques comprend quatre étapes.

La probabilité d'occurrence d'un risque est particulièrement aléatoire par la diversité et la complexité des installations et structure. La prise en compte des risques lors de la faisabilité, de la conception, au stade de l'étude, et aux cours de la réalisation (aussi pendant l'exploitation) est le moyen de prévention contre les dommages liés aux risques.

L'identification des risques est faite après analyse du projet. L'évaluation des risques qui peut se faire sous différentes méthodes dont la méthode matricielle, l'analyse des modes de défaillances et de leurs effets/et leur criticité et la méthode des nœuds papillon. Le développement des stratégies de réponses permet de réduire les dommages possibles , les catastrophe et le contrôle des stratégies de réponse aux risques met en œuvre cette stratégie et modifie le plan en fonction des nouveaux risques.

*P*our mieux aborder l'objectif de ce polycopié, après l'introduction générale, les chapitres suivants sont détaillés :

- **Le chapitre 1** : introduction aux risques géotechniques;
- **Le chapitre 2** : s'articule autour de méthodologie générale d'analyse du risque ;
- **Le chapitre 3** : Télédétection appliquée au milieu naturel ;
- **Le chapitre 4** : Méthodologie d'analyse et de traitement des données ;
- **Le chapitre 5** : Systèmes d'alerte et de gestion des situations de crise ;

Table Des Matières

	Page
Avant Propos	i
Introduction générale	Ii
Table des matières	iii
Chapitre I : Introduction aux risques géotechniques	
I.1 Introduction	1
I.2. Glossaire de base des risques	1
I.3. Le risque.	3
I.3.1. Définition du risque (Défaillance ,rupture)	3
I.3.2. Classification des risques	3
I.3.2.1. Classification selon leur nature	4
I.3.2.2. Classification selon leur gravité et leur fréquence	5
I.4. Risques géotechniques	7
I.4.1. Les paramètres incertains en géotechnique	7
I.4.1.1. Origines et caractéristiques de la variabilité des sols superficielles	7
I.4.2. Erreurs et incertitudes sur les sols	8
I.4.2.1. Incertitude sur le modèle	8
I.4.2.2. Incertitudes sur les actions	8
I.4.2.3. Incertitudes sur les résistances	8
I.4.2.4. Les erreurs d'observation	8
I.4.2.5. Les erreurs d'enquête	9
I.4.2.6. L'erreur humaine	9
I.5. Différents types de risques géotechniques	9
I.5.1. Mouvements de terrains	9
I.5.1.1. Causes (directes ou indirectes) et facteurs favorisant	10
I.5.1.2. Les différentes manifestations	10
I.5.2. Chutes de blocs rocheux et les éboulements	11
I.5.2.1. Les causes probables des éboulements et chutes des pierres	11
I.5.2.2. Les différentes manifestations	12
I.5.3. Affaissements/Effondrements	12
I.5.3.1. Les causes probables des affaissements/ effondrements	13
I.5.3.2. Les différentes manifestations	13
I.5.4. Crues et Inondations	13
I.5.5. Coulées boueuses	14
I.5.5.1. Les causes probables des coulées boueuses.	15
I.5.5.2. Les différentes manifestations	15
I.5.6. Le retrait-gonflement des sols argileux	15
I.5.6.1. Les causes probables de retrait-gonflement	16
I.5.6.2. Manifestations du phénomène	16
I.6. Risques anthropiques	17
I.6.1. Terrassements	17
Mme Dr. Boutahir Bencheikh M	

I.6.1.1. Les déblais	18
I.6.1.2. Les remblais	18
I.6.2. Tassements	18
I.7. Conclusion	19

Chapitre II: Méthodologie générale d'analyse du risque

II.1 Introduction	21
II.2. Analyse de risque	21
II.3. Classification des méthodes d'analyse de risque	22
II.3.1. Approche déterministe	22
II.3.2. Approche probabiliste	22
II.4. Méthodes qualitatives et Méthodes quantitatives	22
II.4.1. Méthodes quantitatives	23
II.4.2. Méthodes qualitatives	24
II.4.2.1. Méthodes déductives	25
II.5. Panorama des méthodes d'analyse de risque	25
II.5.1. L'Analyse Préliminaire de Risque - APR / Analyse Préliminaire de Danger – APD (Preliminary Hazard Analysis –PHA)	25
II.5.2. Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets - AMDE /et de leur Criticité - AMDEC (Failure Modes, and Effects Analysis - FMEA / Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis – FMECA)	26
II.5.3. Hazard and Operability Study (HAZOP)	26
II.5.4. What-If Analysis	27
II.5.5. Analyse par Arbre de Défaillances, Arbre de Causes ou Arbre de Fautes (Fault Tree Analysis - FTA)	27
II.5.6. Modèle de danger MADS	28
II.5.7. La méthode MOSAR	29
II.6. Approches méthodologiques partielles d'étude des risques	30
II.7. Gérer les risques	31
II.7.1. Planifier la gestion des risques	31
II.7.2. Identifier les risques	32
II.7.3. Estimer les risques	32
II.7.3.1. Estimations du niveau de risque par matrice probabilité/gravité	32
II.7.3.2. Estimations quantitatives des risques	33
II.7.4. Maîtriser les risques	33
II.7.4.1. Quand arrêter la maîtrise des risques	33
II.7.5. Evaluer l'acceptabilité des risques résiduels	34
II.7.6. Informer/ Communiquer / Sensibiliser	34
II.7.7. Surveiller les risques	34
II.8. Critères de choix d'une méthode d'analyse de risque	34
II.9. Evaluation de la qualité d'une analyse de risque	35
II.9.1. Cohérence	35
II.9.2. Complétude	35
II.9.3. Exhaustivité	35
II.9.4. Intégrité	36

Mme Dr. Boutahir Bencheikh M

II.9.5. Traçabilité	36
II.10. Conclusion	36

Chapitre III : Télédétection appliquée au milieu naturel

III.1. Introduction	39
III.2. Historique de la télédétection	39
III.3. Principe de la télédétection	41
III.3.1. Le rayonnement électromagnétique (REM)	42
III.3.1.1. Bases physiques	42
III.3.1.2. Signatures spectrales des principales surfaces naturelles	45
III.3.2. Les vecteurs et les capteurs	46
III.3.2.1. Les capteurs	46
III.3.2.2. Les vecteurs ou plate-forme	48
III.3.3. Un système actif à radio fréquences : le radar	49
III.3.3.1. Composantes d'un système radar	50
III.3.4. Satellite de télédétection	51
III.3.4.1. Types de satellite	51
III.3.4.2. Satellites utilisés pour la télédétection	51
III.4. Les domaines d'application de la télédétection	52
III.4.1. Applications terrestres	52
III.4.1.1. Foresterie	52
III.4.1.2. L'agriculture	53
III.4.1.3. Couverture et utilisation du sol	53
III.4.1.4. Suivi des zones urbaines	53
III.4.1.5. Cartographie	54
III.4.1.6. Température de la surface terrestre	54
III.4.3. Applications militaires	54
III.4.4. Autres applications	54
III.4.5. Applications maritimes	54
III.5. Le système d'information géographique (SIG)	55
III.5.1. domaines d'application de SIG	55
III.5.2. Les composants d'un SIG	56
III.5.3. Quelques exemples	57
III.5.3.1. Carte d'occupation du sol	57
III.5.3.2. Carte de gestion des espaces verts d'une ville	57
III.5.3.3. Carte de gestion des espaces forestiers	58
III.5.3.4. Carte de gestion des risques géotechnique	58
III.5.3.5. Carte de gestion des risques géotechnique	60
III.5.3.6. Carte de gestion des risques géotechnique	60

Chapitre IV : Méthodologie d'analyse et de traitement des données

IV.1. Introduction	61
IV.2. Notion de base	61

Mme Dr. Boutahir Bencheikh M

IV.2.1. Notion de risque	61
IV.2.2. Définition mathématique du risque	61
IV.2.3. Notion de vulnérabilité	62
IV.2.4. Notion de criticité	62
IV.2.4.1. Guide de lecture de la grille	62
IV.3. Outils d'évaluation des risques	63
IV.3.1 Analyse des Modes de Défaillances (rupture) et de leurs Effets (AMDE)/ et de leur Criticité (AMDEC)	63
IV.3.2. La méthode matricielle ou criticité	64
IV.3.3 La méthode de simulation de Monte Carlo	66
IV.3.4. Nœud papillon ou la méthode du diagramme causes conséquences	66
IV.3.5. Méthode ALARP	68
IV.4. Probabilité de défaillance et réglementation de la construction	72
IV.4.1. Définition : Probabilité cible	73
IV.4.2. Définition : Règlements de construction	73
IV.5. Prévention et réduction des risques géotechniques	74
IV.5.1. Parades contre les glissements	74
IV.5.2. Parades contre les éboulements	75
IV.5.3. Parades contre les coulées de boue	77
IV.5.4. Parades contre les effondrements et affaissements	78
IV.5.5. Parades contre le retrait – gonflement	78
IV.6. Nouveaux outils pour une cartographie de terrain	80
IV.7. Conclusion	

Chapitre V : Systèmes d'alerte et de gestion des situations de crise.

V.1. Introduction à la gestion des catastrophes.	
V.2. Cycle de Gestion des Catastrophe	81
V.3. Plan de réduction des risques (Risk Management Plan-RMP).	81
V.4. Le plan de substitution	82
V.4.1. Le contrôle des stratégies de réponse aux risques.	83
V.5. Résilience.	84
V.5.1. La résilience comme outil de gestion des risques.	85
V.5.2. proposition d'une méthode de gestion globale des risques.	86
V.5.3. Le flux de danger.	86
V.5.4. Résilience des risques naturels.	87
V.5.4.1. Prévenir la survenue d'un événement à risque.	89
V.5.4.1.1. La cartographie.	91
V.5.4.1.2. La surveillance.	91
V.5.4.2. Minimiser les conséquences négatives d'un événement à risques.	91
V.5.4.2.1. Investigations géologiques et géotechniques.	92
V.5.4.2.2. Protections et mitigations.	92
V.6. Surmonter la survenue d'un événement à risques.	93
V.6.1. Réparations et renforcements.	93
V.6.2. Retour d'expérience.	93
V.6.3. Sensibilisation du public.	93

Mme Dr. Boutahir Bencheikh M

V.7. Difficulté de la gestion des catastrophes.	93
V.7. Conclusion générale	94
	94
Listes des figures	97
Listes des tableaux	99
Références Bibliographiques	100
Acronymes et abréviation	



Introduction aux risques

géotechniques

Introduction aux risques géotechniques

1.1. Introduction.

La phase identification des risques est cruciale dans tout processus de gestion d'un projet. Les projets de construction sont des opérations complexes, impliquant de nombreux acteurs, et pour lesquelles les facteurs de risque sont d'origines multiples. Cependant, les verrous demeurent nombreux, aussi bien sur le plan scientifiques (difficulté de formaliser la connaissance et de quantifier des savoirs disparates) que sur le plan opérationnel[40].

En effet, le site de construction d'un ouvrage est soumis aux effets de phénomènes naturels ou anthropiques qui modifient plus ou moins l'état du site et éventuellement de l'ouvrage. Dans un projet de construction, le risque géotechnique est l'un des risques majeurs, et qui a un impact sur les coûts, les délais et peut porter sur la pérennité des ouvrages. Les sols présentent toujours un risque pour tout projet de construction, donc une identification de ces risques est prioritaire pour le démarrage de projet.

Ce chapitre a pour but d'une part de décrire les concepts de base relatifs à la notion de risques, et d'autre part, d'identifier de manière générale les événements générateurs de risques géotechniques pour le projet routier qu'ils soient provoqués par des phénomènes naturels ou par des activités humaines ainsi que les solutions à envisager[34].

1.2. Glossaire de base des risques.

▶ **Sécurité** : Dans le langage usuel, la sécurité (du latin « **securus** ») possède un double sens. C'est à la fois[9]:

- 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. 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[9].

▶ **Sûreté** : un système est dit sûr s'il est apte à assurer les fonctions requises dans un contexte donné.

▶ **Danger**, menace : source potentielle de dommages; cause potentielle d'un incident non désiré. Le danger doit être régulièrement réévalué en fonction de l'expérience acquise.

Le 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 de mieux apprécier la réalité du danger et de l'objectiver. Le danger doit donc être régulièrement réévalué, en fonction de l'expérience acquise.

- ▶ **Aléa** : tout événement, phénomène ou activité humaine, imprévisible, susceptible de provoquer la perte de vies humaines, des blessures, des dommages au biens, des perturbations sociales ou économiques ou la dégradation de l'environnement.
- ▶ **Hasard** : cause fictive de ce qui arrive sans raison apparente ou explicable. Ce mot provient du mot arabe Az-zahr (bénéfique), en langue française le hasard est neutre (positif ou négatif), pour les anglo-saxons hazard qualifie les aléas (négatif).
- ▶ **Incertitude** : chose incertaine c-à-dire mal connu, qui prête au doute. Elle décrit la situation en l'absence de certitude qui résulte des variations naturelles et/ou de la compréhension imparfaite des phénomènes et des objets, soit par manque de connaissance, soit par manque d'information.
- ▶ **Défaillance** : altération ou cessation de l'aptitude d'un système à accomplir ses fonctions (dysfonctionnement, dégradation).
- ▶ **Enjeux**: ensemble des éléments (population, bâtiments, infrastructures, patrimoine environnemental, activités et organisations) pouvant être exposés au danger. Ils sont définis par leur valeur et leur vulnérabilité, dont la détermination constitue une étape de l'évaluation des risques.
- ▶ **Vulnérabilité** : susceptibilité d'un système d'enjeux à subir des dommages sous l'action d'un danger. Elle correspond au niveau des dommages prévisibles engendrés par l'aléa considéré. Elle est généralement exprimée sur une échelle de 0 (pas de perte) à 100% (perte complète).
- ▶ **Dommages**: conséquences d'un événement sur les enjeux (humaines, financiers, économiques, sociaux ou environnementaux).
- ▶ **Gravité** : mesure de l'intensité des conséquences susceptibles de résulter de l'occurrence d'un événement indésirable (aléa). Elle peut être utilisée en phase de prévision (évaluation probable du danger).
- ▶ **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.
- ▶ **Gestion des risques** : est un processus établi dans la société et l'économie pour le traitement des risques. Selon le contexte, la gestion des risques est structurée et organisée de manière diverse (éléments et pondérations).

- ▶ **Analyse des risques** : L'analyse des risques recense et décrit de manière systématique les risques dans un système donné. L'appréciation du niveau des risques, souvent sous forme d'une classification des scénarios considérés en fonction de leur fréquence et de l'ampleur des dommages envisagés en fait partie. L'analyse des risques traite de la question « que peut-il arriver? ».

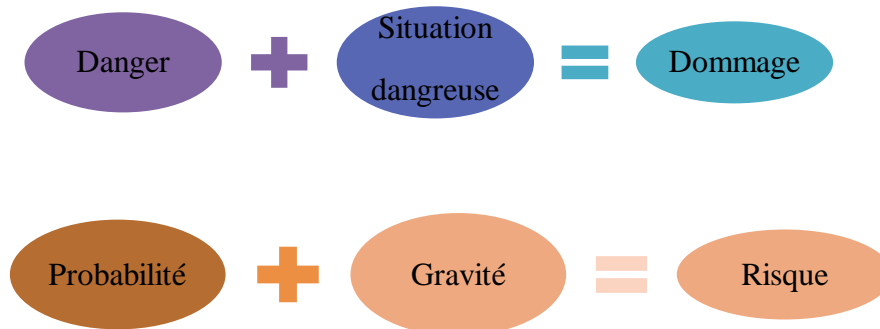
1.3. Le risque.

1.3.1 Définition du risque(Défaillance ,rupture)

La notion de risque est complexe et fait l'objet de nombreuses définitions. Il peut être défini comme suit :

- ▶ Dans le langage courant, le risque est « un danger éventuel plus ou moins prévisible » ou « un danger, inconvénient plus ou moins probable auquel on est exposé » [9].
- ▶ 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 [41].

Il est très difficile de trouver une définition générale. Cependant, on pourrait dire que le risque est la combinaison de l'aléa (probabilité d'occurrence d'un phénomène) et de la vulnérabilité (conséquences sur les personnes et les biens exposés ou la gravité d'un dommage) [39].



1.3.2. Classification des risques.

Les ouvrages de génie civil, suivant leur fonctionnalité, leur localisation, depuis leur construction et durant toute leur vie, peuvent être soumis aux deux catégories de risque, classiquement les risques naturels et les risques technologiques. Ils peuvent être uniquement réalisés pour protéger d'autres ouvrages à l'égard de ces risques. Ils peuvent également être générateurs de risque[4].

Les risques peuvent être classés en grandes familles:

- ▶ **Selon leur nature** : naturels et anthropogéniques.,

- ▶ Selon leur intensité (gravité) et leur fréquence : individuel ou majeur .

Tous les risques peuvent être classés en fonction de leur fréquence d'apparition et de leur gravité, ainsi que le montrent les travaux de l'anglais Farmer (1967). Le risque peut être latent (il n'est pas encore manifeste), apparent (il se manifeste) ou disparu (il ne peut plus se manifester) [4].

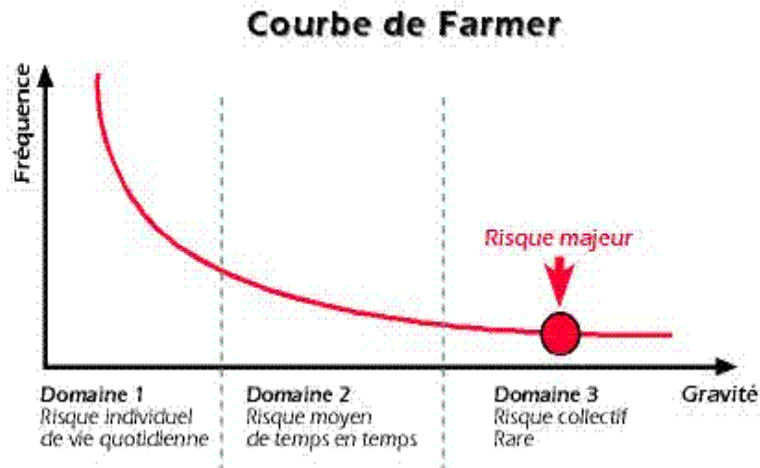


Figure I.1. Classification de Farmer [4].

I.3.2.1. Classification selon leur nature.

- ▶ **Risques naturels** est un événement dommageable, intégrant une certaine probabilité, conséquence d'un aléa naturel susceptible de survenir dans un milieu vulnérable. Selon la nature de l'aléa, les risques naturels sont d'origine : tellurique (volcanisme, séismes), climatique et météorologique (sécheresse, inondations, tempêtes et cyclones, etc.), géologique (mouvements de terrain), etc[44].
- ▶ **Risques anthropogéniques** : est le risque engendré par l'activité humaine. C'est la menace d'un événement indésirable engendré par la défaillance accidentelle d'un système potentiellement dangereux et dont on craint les conséquences graves, immédiates comme différées, pour l'homme et (ou) son environnement[4].

Le tableau I.1 ci-après présente une liste non exhaustive d'exemple de risques naturels et anthropiques[8].

Fréquence	Très élevée	Moyenne	Faible
Gravité	Faible	modérée	Extrême
Exemples	Accident de la circulation avec tôles froissées Chute de pierres sur une route de montagne Apparition de fissure sur un mur endommagement des constructions à cause du retrait-gonflement des sols argileux	Grave accident de la route Glissement de terrain affectant quelques maisons Chute de la charge d'une grue	Catastrophe des transports Glissement affectant une ville Effondrement d'un pont, tunnels, barrages, etc. Inondations Avalanches Feux de forêts/de broussailles

Tableau I.1. Classification des types de risques selon la gravité et la fréquence[22].

Les risques naturels plus ou moins violents, sont généralement irrépressibles, toujours dommageables, souvent destructeurs ; les pires peuvent être de véritables désastres écologiques à l'échelle de la Terre.

Quels qu'ils soient, où que ce soit, les risques naturels sont toujours susceptibles d'être dangereux ; ils ne se maîtrisent pas, mais la plupart de leurs effets dommages, accidents, catastrophes, peuvent être, sinon évités, du moins limités par l'étude prospective, les actions de prévention et de protection, et par la gestion de crise, reposant sur des études scientifiques sérieuses du phénomène naturel en cause, du bassin de risque et de la vulnérabilité des aménagements et ouvrages qui y sont construits[7].

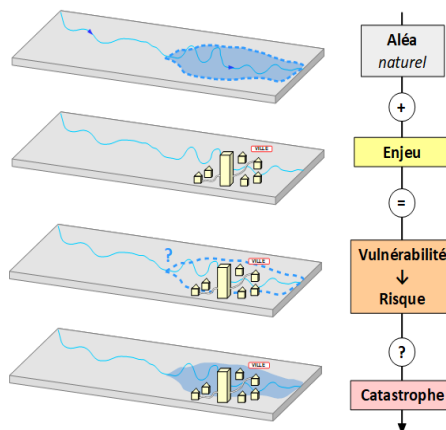


Figure I.2. Définition du risque naturel[5].

I.3.2.2. Classification selon leur gravité et leur fréquence.

- ▶ **Le risque environnemental** est le risque affectant les écosystèmes naturels relatifs à la beauté ou à la pérennité du milieu naturel du fait de la pollution par exemple[17].
- ▶ **Le risque technologique** : est le risque engendré par l'activité humaine. C'est la menace d'un événement indésirable engendré par la défaillance accidentelle d'un système potentiellement dangereux et dont on craint les conséquences graves, immédiates comme différées, pour l'homme et (ou) son environnement.
- ▶ **Risques individuel**: sont des accidents plus fréquents affectant peu d'individus. Ce sont les risques de la vie quotidienne: accidents domestiques, accidents de la route,etc..
- ▶ **Risques majeurs** : sont des événements imprévus susceptibles de mettre en danger une activité humaine ou avoir un impact socio-économique notable.

Echelles de risque individuel et majeur

Rowe 1977	
Classe	N ^{bre} victimes
Accident ordinaire	1 – 10
Accident catastrophique	10 – 100
Désastre collectif	100 – 1000
Désastre majeur	103 – 105
Catastrophe majeur	105 – 107
Super-catastrophe	107 – 109
Catastrophe universelle	> 109

Tableau I.2. Classification des risques selon Rowe[40].

MISE* (France) * Mission d'Inspection Spécialisée de l'environnement			
Classe		Dommages humains	Dommages matériels
0	Incident	aucun blessé	< 0,3 ME
1	Accident	1 ou plusieurs blessés	0,3 à 3 ME
2	accident grave	1 à 9 morts	3 à 30 ME
a	Accident très grave	10 à 100 morts	30 à 300 ME
4	catastrophe	100 à 999 morts	300 à 3 GE
5	catastrophe majeur	≥ 1000 morts	≥ 3 GE

Tableau I.3. Classification des risques selon MISE[40].

1.4. Risques géotechniques.

1.4.1. Les paramètres incertains en géotechnique.

1.4.1.1. Origines et caractéristiques de la variabilité des sols.

Plusieurs auteurs ont montré que la plupart des problèmes géotechniques sont liés à la variabilité des paramètres de sol et l'incertain en géotechnique. Une chose est certaine : le sol est un matériau hétérogène et anisotrope. Ses propriétés sont variables d'un point à un autre. L'incertitude dans la prévision des réponses mécanique ou hydraulique en géotechniques est un phénomène complexe résultant de plusieurs types de sources[35].

La variabilité dans les propriétés mesurées dans les couches de sol vient de différentes sources. Phoon et Kulhawy (1999) ont quantifié la variabilité inhérente (intrinsèque), les erreurs de mesure et l'incertitude de transformation (corrélation entre propriétés, modèle rhéologique, etc.) en tant que sources primaires d'incertitude géotechnique, comme illustré sur la figure I.1. L'origine de la variabilité spatiale inhérente est le processus de sédimentation géologiques qui a produit et modifie continuellement les couches de sol[35].

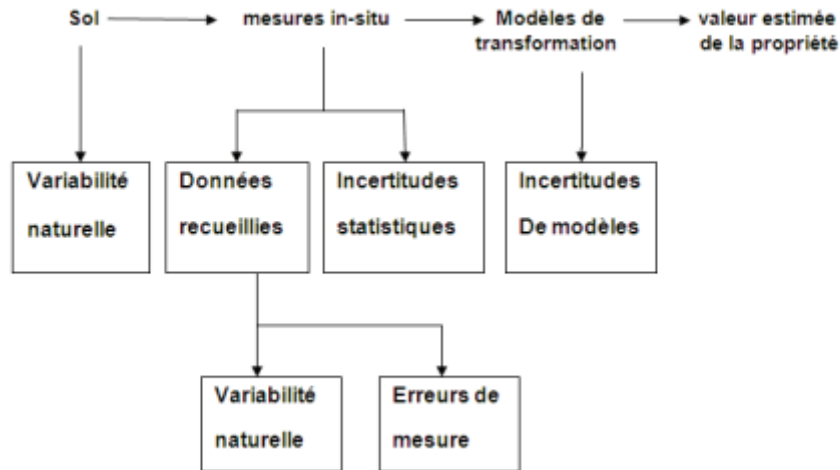


Figure I.3. Types des incertitudes des propriétés du sol[4].

La variabilité intrinsèque des propriétés de sol est la structure de corrélation, autrement-dit, ces propriétés ne changent pas aléatoirement dans l'espace, mais montrent de la concordance d'un point à un autre dans l'espace[23].

I.4.2. Erreurs et incertitudes sur les sols.

I.4.2.1. Incertitude sur le modèle.

Le fonctionnement de chaque élément est, sur le plan mécanique, étudié selon des hypothèses qui permettent l'utilisation de modèles plus ou plus représentatifs, l'erreur de modèle est déterministe, et qu'elle n'introduit qu'un biais systématique dans la prévision, et n'apparaît-elle pas dans la théorie de la fiabilité. Par contre elle est au premier plan dans l'analyse de sécurité.

I.4.2.2. Incertitudes sur les actions.

Les actions sont classées par les Eurocodes en actions permanentes, variables et accidentelles : cette classification souligne avant tout le caractère incertain dans le temps.

Nous ne prendrons pas en compte la variabilité temporelle, soit que nous prenions une action déterministe sous forme d'un seuil (probabilité de ruine sachant que l'action dépasse ce seuil) soit que nous prenions l'incertitude de l'action sur un an (probabilité annuelle) ou sur la durée de vie (probabilité totale). Par contre nous pourrions prendre en compte la variabilité spatiale de l'action tout comme la variabilité spatiale des résistances.

I.4.2.3. Incertitudes sur les résistances.

Les paramètres du sol dont nous cherchons le poids sur la sécurité des ouvrages géotechniques interviennent principalement du côté des résistances. Des études faites [23] ont montré que ces paramètres

présentent une variabilité naturelle spatiale forte devant leur variabilité temporelle qui peut souvent se modéliser par une tendance ou évolution déterministe.

I.4.2.4. Les erreurs d'observation.

On distingue trois types d'erreurs d'observation[8] :

- **Les erreurs de mesure proprement dites** : Elles sont liées à l'appareil de mesure et à l'opérateur. Avec les progrès de la métrologie, on a considérablement réduit les erreurs d'imprécision et avec l'acquisition automatique, les erreurs d'opérateur. Mais il reste les erreurs de reproductibilité liées au caractère destructif de la plupart des essais de géotechnique et les erreurs d'opérateur liées à la difficulté de certains essais (le triaxial, le pressiomètre : qualité du trou, etc.) [4].
- **Les erreurs de représentativité** : Elles proviennent de la transformation de la mesure physique. On ne mesure guère directement que des longueurs, des masses et des températures et la plupart des appareils sont basés sur des mesures de déplacement. Il faut donc transformer la mesure. On procède alors à un étalonnage de l'appareil et à son tarage[4].
- **Les erreurs de l'instant** : Elles proviennent de la variation de la propriété entre le moment où on la mesure et le moment où le matériau est mis en œuvre. Le cas typique est celui des propriétés du béton. Pour les sols, le remaniement relève de ce type d'erreur en particulier pour tous les essais mécaniques de laboratoire et pour l'essai pressiométrique.

I.4.2.5. Les erreurs d'enquête.

- **Les erreurs d'enquête proprement dit** : Ce sont les erreurs liées à une mauvaise conduite des reconnaissances. Les mesures effectuées ne sont pas représentatives du problème, par exemple, ne pas reconnaître un remblai récent au droit de chaque appui qui le sollicite, un remblai ancien en biseau pouvant exister sous certains appuis, ou bien reconnaître à moins de 1,5 à 2 fois sa largeur sous une fondation, ignorant ainsi une couche faible qui peut piloter les tassements.
- **Les erreurs d'échantillonnage** : le plan de sondage et la méthode d'estimation, la taille d'échantillon ainsi que la variabilité de chaque caractéristique sont des facteurs déterminants de l'erreur d'échantillonnage. Les caractéristiques qui sont rares ou qui sont distribuées de façon très différente dans la population auront une erreur d'échantillonnage plus grande que les caractéristiques qu'on observe plus fréquemment ou qui sont plus homogènes dans la population[4].

I.4.2.5. L'erreur humaine.

En France, une étude sur les sinistres de construction expertisés par le bureau Veritas (société de services d'évaluation, de conformité et de certification appliqués aux domaines de la qualité), 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[4].

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) [22].

1.5. Différents types de risques géotechniques.

1.5.1. Mouvements de terrains.

Un **glissement de terrain** est un phénomène d'origine sismique, géologique et géophysique où une masse de terre descend sur une pente, autrement dit un plan de glissement, qui peut être plus ou moins continu, et plus ou moins incurvé. L'**impact de ces glissements** peuvent être considérable, incluant des pertes en vie humaines, la destruction des infrastructures, des dommages causés aux terres et la perte des ressources naturelles[39].



Figure I.4. Glissements de versants instables[39].

1.5.1.1. Causes (directes ou indirectes) et facteurs favorisant.

Les causes des glissements de terrain sont généralement liées à des instabilités des pentes. Mais ils ont rarement une cause unique, c'est le plus souvent l'action conjointe de plusieurs facteurs négatifs qui sont [4]:

- ▶ Diminution des résistances du sol et sous-sol : le cas le plus fréquent est la diminution de l'angle de frottement interne des argiles sous l'effet de l'eau.
- ▶ Des paramètres hydrologiques sont très souvent en cause dans les glissements de terrains.
- ▶ Augmentation des charges en amont, comme la construction d'un ouvrage.

- ▶ Diminution des appuis en pied de pente, comme un terrassement mal pensé et trop raide, ou à une échelle différente le retrait d'un glacier.
- ▶ Plus rarement, un facteur déclenchant anthropique peut intervenir, comme une vibration de machine, une explosion, un séisme induit, la déforestation de pente, etc.
- ▶ Séisme en cours.
- ▶ Séquelles d'un séisme passé ; des séquelles « structurelles » peuvent rendre le sol et sous-sol plus vulnérable à un glissement de terrain. Ce dernier peut être induit par un nouveau séisme ou simplement par de fortes pluies (en ayant réorganisé les écoulements d'eaux souterraines), même plusieurs décennies après le séisme en cause.
- ▶ Augmentation de la chaleur : le sol d'une pente desséchée peut s'effriter, ce qui peut provoquer un « glissement sec », ou ensuite induit par de fortes pluies.
- ▶ Hydro-climatologie et Hydrogéologie de la zone. En raison du réchauffement global, les glaciers de montagne fondent anormalement vite, en libérant d'importantes masses d'eau, alors que dans le même temps des pergélisols ou des glaces qui maintenaient la cohérence de certaines pentes ou roches se délitent, provoquant des avalanches de roches.

I.5.1.2. Les différentes manifestations.

Les glissements de terrain se manifestent généralement par[44] :

- ▶ Dans sa partie amont, par des niches d'arrachement ou crevasses, principales et latérales, avec brusque rupture de pente (pente concave) ;
- ▶ Dans sa partie aval, par un bourrelet de pied (ou frontal) à pente convexe. La poussée exercée par le bourrelet de pied se marque fréquemment par un tracé anormal des cours d'eau en aval;
- ▶ Des fissures en crête de talus perpendiculaires à la direction générale du mouvement. Sur un profil, on observe une dépression vers le haut et un bombement vers le pied ;
- ▶ Le déplacement d'une masse de matériau le long d'une surface de rupture ;
- ▶ Une surface topographique bosselée (ondulations, dissémination de blocs de forte taille,...):
- ▶ Effondrements d'un pan de falaise vertical ;
- ▶ Déformation du réseau routier traversant le glissement ;
- ▶ Des arbres basculés.

I.5.2. Chutes de blocs rocheux et les éboulements.

Ce sont des mouvements rapides, discontinus et brutaux résultant de l'action de la pesanteur et affectant des matériaux rigides et fracturés tels que calcaires, grès, roches cristallines, etc. Ces chutes sont caractérisées par une zone de départ, une zone de propagation et une zone d'épandage. Les blocs décrochés suivent généralement la ligne de plus grande pente. Les distances parcourues sont fonction de

la position de la zone de départ dans le versant, de la pente du versant, de la taille, de la forme et du volume des blocs éboulés, de la nature de la couverture superficielle, de la végétation[4].



Figure 1.5. Chutes de pierres[40].

1.5.2.1. Les causes probables des éboulements et chutes des pierres.

Les principales causes d'éboulement sont [41] :

- La nature des terrains et les conditions hydrogéologiques et géologiques ;
- Fluage des assises sous-jacentes ;
- La croissance de la végétation ou au contraire sa disparition ;
- Les pressions hydrostatiques dues à la pluviométrie et à la fonte des neiges ;
- L'affouillement ou le sapement du pied de la falaise ;
- Écroulement de la falaise qui limite un massif de roche fissuré ;
- Variations de températures (ex: en montagne, les alternances de gel/dégel fragilisent davantage la roche) ;
- Les séismes représentent un facteur aggravant (ex : une secousse sismique peut provoquer la remobilisation de blocs déjà éboulés et stoppés dans les zones à forte pentes de l'aire de réception) ;
- Eau : plusieurs types de circulation d'eau affectent les formations de la falaise :
 - ❖ l'érosion en surface par les eaux de pluie ;
 - ❖ L'action souterraine des eaux de pluie infiltrées (processus plus ou moins lents de dissolution ou d'érosion interne augmentant les fissurations ; remontées de nappes) ;
 - ❖ Erosion par les eaux de ruissellement du talus argileux de la base de la falaise.

1.5.2.2. Les différentes manifestations.

Les éboulements se manifestent généralement par [44] :

- ❖ Les chutes de pierres ou de blocs ;

- ❖ Les éboulements en masse ;
- ❖ Eroulements ou éboulement en grande masse.
- ❖ Certains éboulements de grande ampleur peuvent mobiliser des volumes de matériaux atteignant plusieurs dizaines de millions de m³ et semblent obéir à des lois de propagation faisant intervenir des mécanismes complexes.

1.5.3. Affaissements/Effondrements.

Ce sont des mouvements verticaux de terrains qui abaissent lentement ou rapidement. Ils résultent soit d'un fléchissement de la surface, sans rupture visible, soit des ruptures brusques de toits de cavités naturelles. La plupart résultent d'un processus naturel[43].



Figure I.6. Affaissement de chaussée.



Figure I.7. Affaissement de terrain.



Figure 1.8. Effondrement à Saint-Pierre-les- par Martigues[43].

I.5.3.1. Les causes probables des affaissements/ effondrements.

Les affaissements sont généralement provoqués par [4]:

- ❖ Les infiltrations d'eau (eaux usées, eaux pluviales, eaux de drainage) ;
- ❖ La consolidation progressive de sédiments subactuels plus ou moins organiques ;
- ❖ L'extraction de matériau du sous-sol, eau souterraine, hydrocarbures, minerais ;
- ❖ Évolution de cavités souterraines ou des vides naturels par dissolution de roches solubles, calcaires, gypses, etc. ;
- ❖ Le dégel ou la sécheresse.

I.5.3.2. Les différentes manifestations.

Les affaissements et les effondrements se manifestent par [44] :

- La dislocation et la chute du toit ou des parements des cavités ;
- Effondrement en bloc de l'ensemble des terrains compris entre le fond et la surface ;
- Les terrains s'éboulent en blocs de tailles et de formes variables qui s'entassent aléatoirement en laissant entre eux des vides résiduels ;
- La formation des cuvettes parfois très vastes ;
- Des dépressions, des avens, des gouffres ou des fontis en surface ;
- Déformation de la surface du sol ;
- Des fissures importantes sur les infrastructures routières.

I.5.4. Crues et Inondations.

Les inondations sont des submersions, rapides ou lentes, des zones habituellement hors d'eau. En région PACA. En région PACA, si l'on exclut les inondations liées à la rupture de digues ou de barrage (risque technologique), les inondations peuvent se manifester sous différentes formes répertoriées en cinq grandes catégories [39]:

- **Les inondations lentes ou crues de plaine** qui sont des inondations à cinétique lente et concernent majoritairement les grands cours d'eau de la région.
- **Les inondations rapides ou crues torrentielles** qui sont générées par des épisodes pluvieux intenses se produisant sur des bassins versants où les eaux de ruissellement se concentrent rapidement dans le cours d'eau, elles concernent notamment les affluents des grands cours d'eau ou les fleuves côtiers tels que l'Ouvèze (crue de Vaison-la-Romaine en 1992), le Lez (Pertuis en 1993), le Guil ou encore la Siagne (1994) [42].
- **Le ruissellement ;**
- **Les submersions marines,**
- **Les tsunamis.**



Figure I. 9. Inondations de bab el oued (Alger) en 2001, 800 morts[41].

1.5.5. Coulées boueuses.

Les coulées boueuses sont des phénomènes très rapides affectant des masses de matériaux remaniés, soumis à de forte concentration en eau, sur de faibles épaisseurs généralement (0-5 m). Ce type de phénomène est caractérisé par un fort remaniement des masses déplacées, une cinématique rapide et une propagation importante.

La coulée de boue est le plus rapide (jusqu'à 90 km/h) et le plus fluide des différents types de mouvements de terrain. Son comportement est intermédiaire entre celui d'un solide et d'un liquide, et régi par les lois des domaines à la fois de l'hydraulique et de la mécanique des solides, ce qui en fait un phénomène particulier dans la famille des mouvements de terrain[42].



Figure I.10. Coulée de boue[42].

1.5.5.1. Les causes probables des coulées boueuses.

Les coulées boueuses ou coulées de boue sont déclenchées souvent sur des versants après de très fortes pluies (pluies torrentielle) ou fonte de neige. L'eau est la cause principale de ce phénomène.

Les coulées apparaissent dans des matériaux meubles lorsque leur teneur en eau augmente de manière importante. La mise en mouvement de ces matériaux a pour origine une perte brutale de cohésion. Ces coulées peuvent se produire à la suite d'un glissement ou d'une perte de la couverture végétale. L'eau peut pénétrer au sein des matériaux par infiltration avant le déclenchement de la coulée ou au moment de la rupture par concentration des eaux de ruissellement[4].

I.5.5.2. Les différentes manifestations

Le phénomène de coulée boueuse se manifeste presque toujours par [43]:

- Une zone supérieure élargie (rassemblement de matériaux par exemple au pied d'un glissement, zone de départ de la coulée) ;
- un chenal d'écoulement beaucoup plus étroit et de longueur extrêmement variable (zone de transfert) ;
- Un lobe terminal (zone d'accumulation) élargi en une sorte de cône de déjection mais de profil convexe ;
- Solifluxion de matériaux boueux sur les versants.

I.5.6. Le retrait-gonflement des sols argileux.

Le retrait-gonflement des argiles est lié aux variations de teneur en eau des terrains argileux : ils gonflent avec l'humidité et se rétractent avec la sécheresse. Ces variations de volume induisent des tassements plus ou moins uniformes et dont l'amplitude varie suivant la configuration et l'ampleur du phénomène. Sous une habitation, le sol est protégé de l'évapotranspiration, et sa teneur en eau varie peu dans l'année. De fortes différences de teneur en eau vont donc apparaître dans le sol au droit des façades.

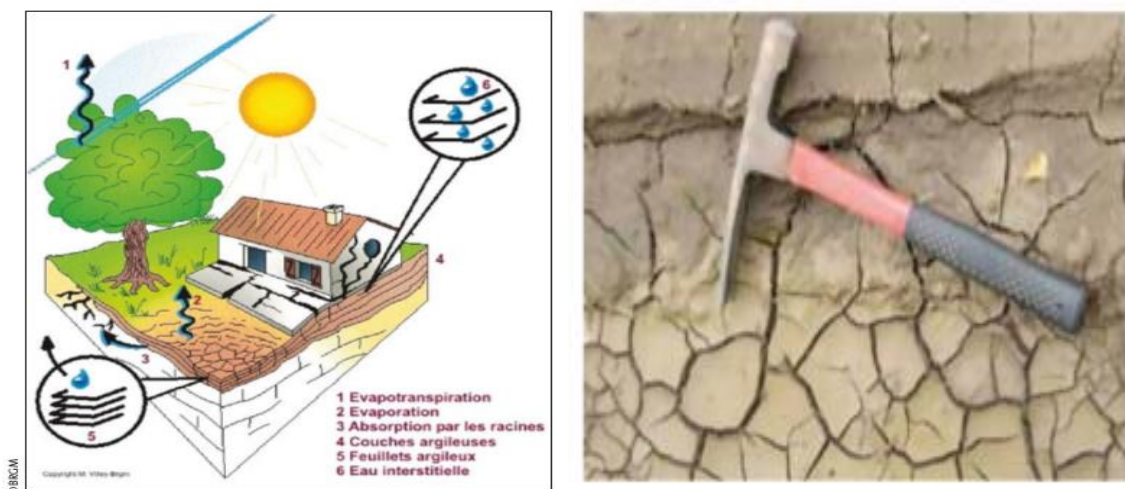


Figure I.11. Phénomène de retrait-gonflement[44].

I.5.6.1. Les causes probables de retrait-gonflement.

Les facteurs qui interviennent dans le retrait-gonflement sont:

- ❖ Caractéristiques du sol : nature, hétérogénéité ;
- ❖ La topographie de surface: elle constitue un facteur permanent de prédisposition et d'environnement qui peut conditionner la répartition spatiale du phénomène de retrait-gonflement;
- ❖ Variations climatologiques : durée des périodes de pluie et des périodes de sécheresse;
- ❖ Modifications de l'équilibre hydrique créées par imperméabilisation, drainage, concentration de rejet d'eau pluviale ;
- ❖ La présence de végétation : phénomène accentué par la présence importante d'arbres à proximité, qui accentuent considérablement l'ampleur du phénomène en augmentant l'épaisseur de sol asséché.

I.5.6.2. Manifestations du phénomène .

Le phénomène se manifeste par des tassements différentiels provoquant des dommages dans les constructions si les fondations et la structure ne sont pas assez rigides. Ces dommages peuvent prendre plusieurs formes : fissurations en façade, décolllements entre éléments jointifs (garages, perrons, terrasses), distorsion des portes et fenêtres, dislocation des dallages et des cloisons et, parfois, rupture de canalisations enterrées[39].

Les maisons individuelles sont les principales victimes de ce phénomène du fait de leur structure (légère et peu rigide, fondations superficielles).



Figure I.12. Fissuration due au retrait-gonflement[39].

1.6. Risques anthropiques.

Le risque anthropique se caractérise par un accident lié à une activité humaine (exemples : site industriel, canalisations de transport de matières dangereuses...) et pouvant entraîner des conséquences graves pour le personnel, les populations, les biens, l'environnement ou le milieu naturel[4].

Il peut s'agir [4]:

- Des terrassements en déblais ou remblais qui modifient la topographie initiale et les équilibres de masse (compactage, cohésion, drainage des eaux, etc.) ;
- La création de fossés avec une concentration des écoulements et s'ils sont profonds, modification des pentes naturelles ;
- La création de surcharges en sommet d'un talus ou d'un versant déjà instable, décharge en pied supprimant une butée stabilisatrice ;
- La modification de la pente du versant, les fouilles et affouillements au pied du versant, le déboisement du site, etc ;
- La modification de la répartition des écoulements superficiels et souterrains de l'eau ;
- Le rejet ponctuel d'eau ;
- Arrosage et irrigation: modifie la teneur en eau du sol ;

1.6.1. Terrassements.

Les terrassements constituent les mouvements de terre servant de déblais ou de remblais. Ces mouvements créent des modifications des niveaux du sol et modifie ainsi la configuration du sol. Les problèmes rencontrés dans le domaine des terrassements routiers sont liés au caractère empirique des méthodes de dimensionnement en vigueur, au non-respect des études géotechniques préalables et le mode de mise en œuvre[17].

1.6.1.1. Les déblais.

Les risques dus aux terrassements en déblais sont nombreux. Il s'agit d'éboulement ou de glissement de talus, d'éboulements de parois, déplacements ou fissurations de murs de soutènement dus à une sous-estimation de la poussée hydrostatique ou de la poussée des terres, à une surestimation de la butée en pied ou de la traction des ancrages, la décompression ou le gonflement du sous-sol, les vibrations produites par les compactages, etc[39].

Les dégradations des talus peuvent être de différentes natures [39]:

Nature géologique : la reconnaissance de la nature géologique du terrain, et les accidents affectant les formations géologiques (failles,...) est primordiales pour le dimensionnement des pentes de talus et la définition des mesures de confortement convenable ;

Nature hydrologique/hydraulique: les infiltrations des eaux entraînent d'une part, une désorganisation des matériaux et un changement de leurs caractéristiques intrinsèques, d'autre part elles exercent une pression interstitielle dans la formation géologique entraînant une dégradation des caractéristiques géotechniques ;

Nature géométrique: l'inadaptation de la pente avec les caractéristiques géotechniques et l'excavation des butées naturelles ou artificielles en pied.

I.6.1.2. Les remblais.

Les terrassements en remblais sont souvent confrontés à des anomalies de stabilité et des déformations. Les risques dus aux terrassements en remblais sont entre autre les glissements ou tassements excessifs à la suite d'un mauvais choix de matériau ou à la mise en œuvre vicieuse (compactage ou traitement du sol insuffisant), ou bien en raison de la faible résistance ou de la forte compressibilité du sous-sol d'assise, les défauts d'ancrages et de drainage à flanc de coteaux. La surcharge de hauts remblais peut provoquer le soulèvement d'ouvrages mitoyens[44].

I.6.2. Tassements.

L'action des charges de fondation sur le géomatériau d'assise modifie son état initial. Cela peut y produire des déformations subverticales, les tassements, dont la répartition, l'amplitude, et les effets dépendront de la position de l'ouvrage dans le site, de ses dimensions, de sa forme et de sa masse, de la rigidité de sa structure ainsi que des caractéristiques de ses fondations. Si le matériau est relativement homogène et les charges régulièrement réparties et d'intensité modérée, le tassement est uniforme et n'affecte presque pas l'équilibre de l'ouvrage et l'état des contraintes dans sa structure ; mais dans la plupart des cas, en raison de l'hétérogénéité du matériau et/ou des charges, de la dissymétrie géométrique et/ou mécanique de la structure, le tassement diffère selon le point d'appui, ce qui affecte plus ou moins l'équilibre et/ou l'état des contraintes dans le matériau et provoque une certaine distorsion de la structure[44].

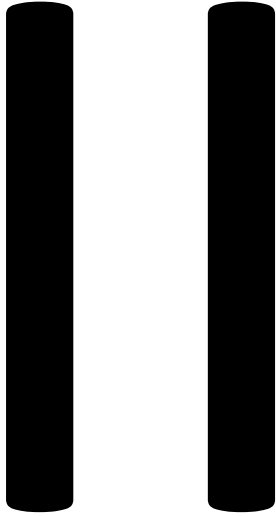
I.7. Conclusion.

Dans ce chapitre, plusieurs modèles de classification ont été proposés. Ils ne sont pas exhaustifs, ces classifications intègrent plusieurs types de risques qui n'ont pas été tous détaillés et hiérarchisés (Criticité du risque, Risque Planning, Risque technologique, Risque financier, Risque législatif, Risque humain, Risque accidentel, Risque conjoncturel).

La majorité des terrains est concernée par le risque de mouvement de terrain, avec des fréquences variables. Leur répartition spatiale est guidée par la topographie et par la géologie mais aussi par les eaux souterraines, qui ont une influence majeure sur le comportement des ouvrages

géotechniques. Leur occurrence est très marquée par les variations climatiques mais peut aussi être liée à des secousses sismiques ou encore être induite par les actions anthropiques.

Donc vu l'impact des risques géotechnique sur les projets, L'importance de obligations réglementaires, régulièrement modifiées nécessite une veille attentive pour partager la connaissance, capitaliser l'information, fédérer tous les acteurs de la sécurité, et faciliter les mises à jour. Toutefois, légitimement, on peut s'interroger sur l'établissement de classification des risques et des effets sur l'assurance.



Méthodologie générale

d'analyse du risque

Méthodologie générale d'analyse du risque

II.1. Introduction.

Le risque constitue aujourd'hui un thème central dans nos sociétés [4], car il représente une préoccupation majeure des citoyens et des pouvoirs publics. Il est présent partout : en économie, en finance, dans le champ social, en droit bien sûr, mais aussi en médecine, dans le milieu militaire, etc. Selon l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), en 2007, le définit comme : « La combinaison de la probabilité de dommage et de la gravité de ce dommage. » c.à.d que le risque nous ne pouvons pas le mesurer directement à l'aide d'un instrument, mais nous pouvons mesurer l'ampleur du phénomène. Il est nécessaire de présenter les différentes méthodes de l'étude de risque [22].

II.2. Analyse de risque.

C'est l'étude minutieuse, précise faite pour dégager les éléments qui constituent un ensemble, pour l'expliquer, l'éclairer: Faire l'analyse de la situation. L'utilisation systématique d'informations pour identifier les facteurs de risque et pour estimer le risque d'utilisation des informations disponibles pour identifier les phénomènes dangereux et estimer les risques[4].

L'analyse d'un risque géotechnique nécessite les étapes suivantes, illustrées ci-après [45]:

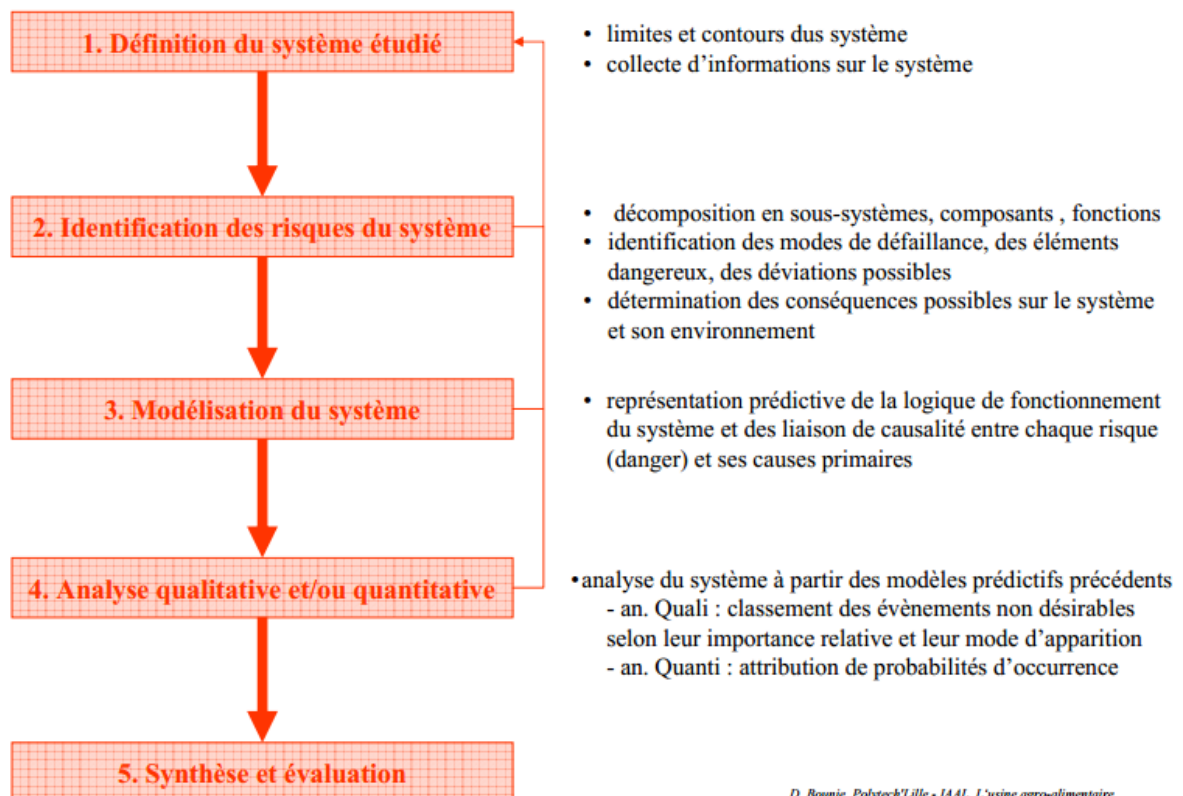


Figure II.1. Méthodologie générale : étape d'une analyse de risque[45].

II.3. Classification des méthodes d'analyse de risque.

Une analyse de risques est utilisée comme première étape d'un processus d'évaluation des risques. Des niveaux de risque préliminaires peuvent être fournis dans l'analyse des dangers. La validation, la prédiction plus précise (vérification) et l'acceptation du risque sont déterminées dans l'analyse du risque. L'objectif principal de l'un et de l'autre est de fournir la meilleure sélection de moyens permettant de contrôler ou d'éliminer le risque. Le terme est utilisé dans plusieurs spécialités de l'ingénierie, notamment la sécurité des processus chimiques, la sécurité, la fiabilité.

Il faut savoir que l'analyse de risque en général est une démarche récente (datant de la fin du xx^e siècle) qui n'a connu à ce jour aucun consensus normatif, seulement des démarches et des guides de recommandations (spécifiques à des secteurs d'activité).

Les principales méthodes d'analyse de risque sont :

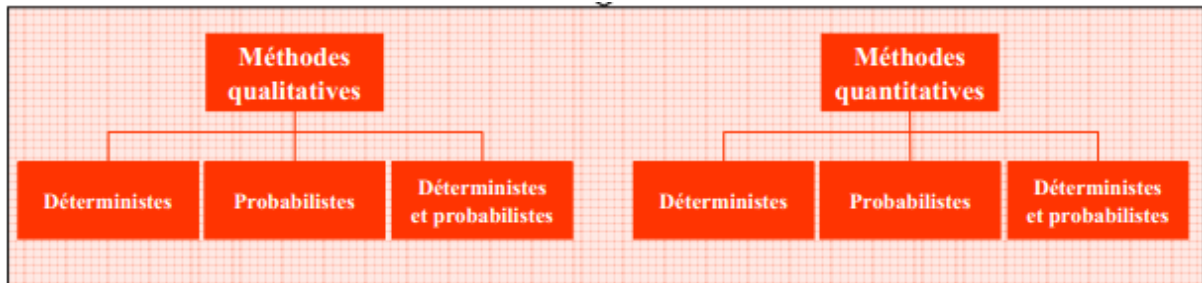


Figure II.2. Approches d'analyse de risque.

II.3.1. Approche déterministe.

L'approche déterministe a généralement été adoptée dans les domaines à haut risque tels que nucléaire, militaire, transports guidés, où le moindre risque significatifs est traqué et réduit à la source. Elle consiste à recenser les événements pouvant conduire à un scénario d'accident en recherchant le pire cas possible (*The Worst Case*) et en affectant une gravité extrême à ses conséquences potentielles. Par conséquent, les sous systèmes critiques (systèmes de sauvegarde, de protection et de prévention) sont dimensionnés pour éviter toute défaillance dangereuse et organisés rigoureusement selon une stratégie de défense en profondeur.

II.3.2. Approche probabiliste.

L'approche probabiliste fait intervenir le calcul de probabilités relatives à l'occurrence d'événements faisant partie du processus de matérialisation d'un scénario d'accident donné.

Il s'agit d'une approche complémentaire qui permet d'analyser le dispositif de défense en profondeur décidé à l'issue d'une approche purement déterministe, ceci a été le cas dans le domaine nucléaire où les techniques probabilistes viennent appuyer l'approche déterministe.

II.4. Méthodes qualitatives et Méthodes quantitatives.

Dans un travail de recherche, les études qualitatives et les études quantitatives représentent des approches complémentaires. Il s'agit pour son auteur de bien distinguer la première de la seconde.

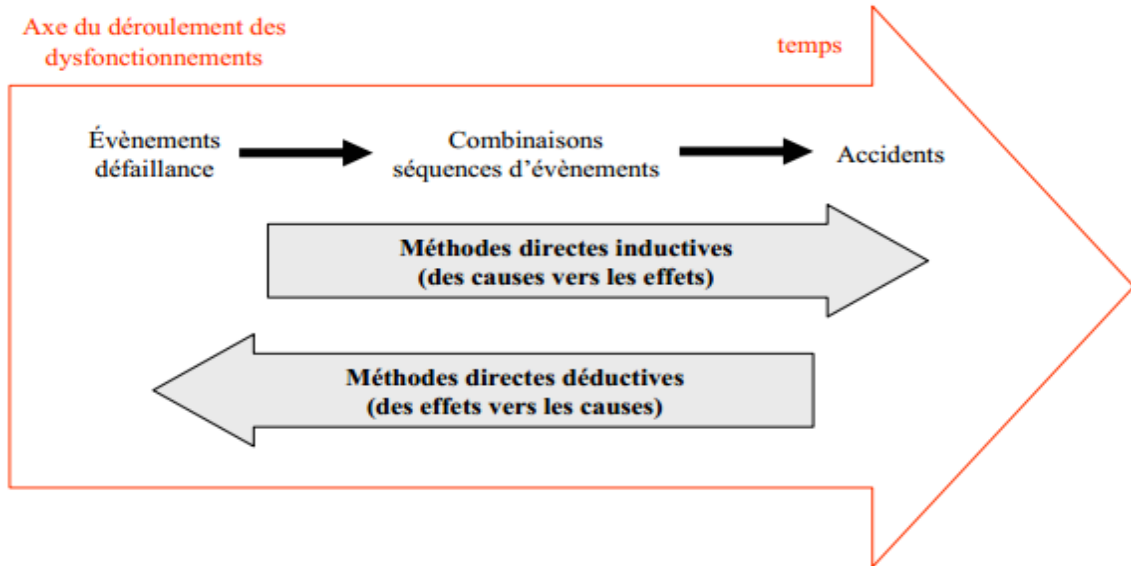


Figure II.3. Typologie des méthodes d'analyse de risque.

II.4.1. Méthodes quantitatives.

Les analyses quantitatives sont supportées par des outils mathématiques ayant pour but d'évaluer la sûreté de fonctionnement et entre autres la sécurité. Cette évaluation peut se faire par des calculs de probabilités (par exemple lors de l'estimation quantitative de la probabilité d'occurrence d'un événement redouté) ou bien par recours aux modèles différentiels probabilistes tels que les Chaines de Markov, les réseaux de pétri, les automates d'états finis, etc.

Les analyses quantitatives ont de nombreux avantages car elles permettent:

- D'évaluer la probabilité des composantes de la sûreté de fonctionnement.
- De fixer des objectifs de sécurité.
- De juger de l'acceptabilité des risques en intégrant les notions de périodicité des contrôles, la durée des situations dangereuses, la nature d'exposition, etc.
- D'apporter une aide précieuse pour mieux juger du besoin d'améliorer la sécurité.
- De hiérarchiser les risques.
- De comparer et ensuite ordonner les actions à entreprendre en engageant d'abord celles permettant de réduire significativement les risques.
- De chercher de meilleures coordination et concertation en matière de sécurité entre différents opérateurs (sous systèmes interagissant) ou équipes (exploitation, maintenance, etc.)

Quoique l'utilité des méthodes quantitatives soit indiscutable, ces dernières présentent tout de même un certain investissement en temps, en efforts et également en moyens (logiciels, matériels, financiers, etc.). Il peut s'avérer que cet investissement soit disproportionné par rapport à l'utilité des résultats attendus, le cas échéant l'analyse quantitative est court-circuitée pour laisser la place aux approximations qualitatives (statistiques, retour d'expérience, jugement d'expert, etc.).

Un point très important mérite d'être clarifié, c'est que les résultats de l'analyse quantitative ne sont pas des mesures absolues, mais plutôt des moyens indispensables d'aide au choix des actions pour la maîtrise des risques. Nous citons par exemple l'évaluation par des techniques floues/possibilistes de la subjectivité des experts humains, ou la priorisation de certaines actions de maîtrise par rapport à d'autres par une analyse de type coût/bénéfices.

II.4.2. Méthodes qualitatives.

L'application des méthodes d'analyse de risque qualitatives fait systématiquement appel aux raisonnements par induction et par déduction. La plupart des méthodes revêtent un caractère inductif dans une optique de recherche allant des causes aux conséquences éventuelles. En contrepartie, il existe quelques méthodes déductives qui ont pour but de chercher les combinaisons de causes conduisant à des événements redoutés.

L'APR, l'AMDEC, l'Arbre de Défaillances ou l'Arbre d'Evénements restent des méthodes qualitatives même si certaines mènent parfois aux estimations de fréquences d'occurrence avant la classification des risques.

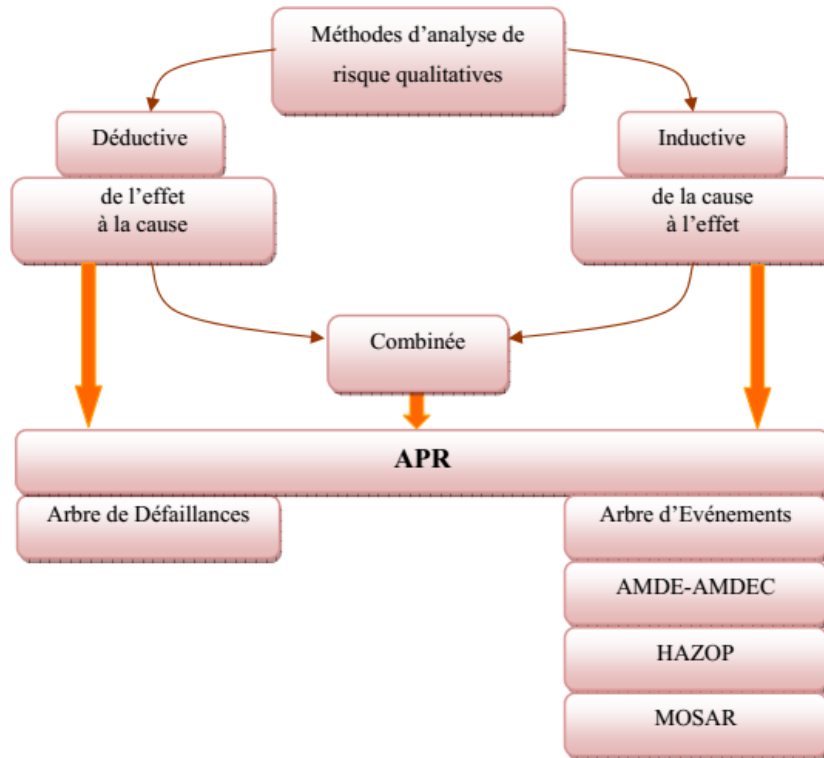


Figure II.4. Classification des principales méthodes d'analyse de risque qualitatives[45].

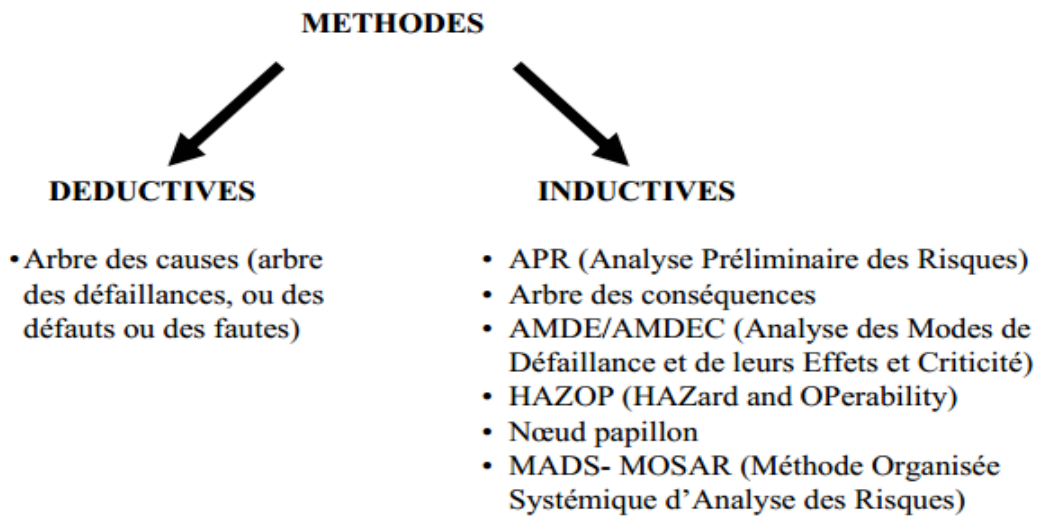
Le principe de ces méthodes consiste à partir d'une cause d'anomalie (défaillance, erreur humaine, agression externe, etc.) et à déterminer les scénarios d'évènements qui en résultent et/ou l'ensemble de ses conséquences possibles. La démarche inductive suppose la connaissance des causes et l'investigation des effets qu'elles sont susceptibles de provoquer[22].

II.4.2.1. Méthodes déductives.

Dans la démarche déductive, on se base plutôt sur la connaissance préalable des effets et on cherche justement à remonter causalement jusqu'aux origines de leur occurrence. Généralement, on part des événements redoutés, et on essaye de trouver leurs causes principales[22].

II.5. Panorama des méthodes d'analyse de risque.

Nous allons présenter dans cette section un échantillonnage de l'ensemble des méthodes d'analyse de risque. Chacune d'entre elle sera présentée brièvement. Une description plus complète avec les références correspondantes se trouve en chapitre II.



II.5.1. L'Analyse Préliminaire de Risque - APR / Analyse Préliminaire de Danger – APD (Preliminary Hazard Analysis –PHA).

L'analyse Préliminaire de Risque (Danger) a été développée au début des années 1960 dans les domaines aéronautique et militaire. Le but consiste à identifier les entités dangereuses d'un système, puis à regarder pour chacune d'elles comment elles pourraient générer un incident ou un accident plus ou moins grave suite à une séquence d'événements causant une situation dangereuse[22].

Pour identifier les entités et les situations dangereuses susceptibles d'en découler, l'analyse est aidé par des listes de contrôles (check-lists) d'entités dangereuses, de situations dangereuses et d'événements redoutés. Ces check-lists sont spécifiques au domaine d'étude concerné. Comme son nom l'indique, cette méthode n'est pas destinée à traiter en détail la matérialisation des scénarios d'accident, mais plutôt à mettre rapidement en évidence les gros problèmes susceptibles d'être rencontrés pendant l'exploitation du système étudié[4].

II.5.2. Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets - AMDE /et de leur Criticité - AMDEC (Failure Modes, and Effects Analysis - FMEA / Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis – FMECA).

L'AMDE a été employée pour la première fois dans le domaine de l'industrie aéronautique durant les années 1960. Son utilisation s'est depuis largement répandue à d'autres secteurs telle que l'industrie chimique, pétrolière ou nucléaire. L'AMDEC est l'extension de l'étude AMDE quand il est question d'évaluer la criticité des défaillances[49].

L'AMDE est une technique fondamentale d'identification et d'analyse de la fréquence des dangers qui analyse tous les modes de défaillances d'un équipement donné et leurs effets tant sur les autres composants que sur le système lui-même[32].

Cette analyse vise d'abord à identifier l'impact de chaque mode de défaillance des composants d'un système sur ses diverses fonctions et ensuite hiérarchiser ces modes de défaillances en fonction de leur facilité de détection et de traitement.

L'AMDE(C) traite des aspects détaillés pour démontrer la fiabilité et la sécurité d'un système. Elle contient 3 (4) parties primaires :

1. Identification des modes de défaillance.
2. Identification des causes potentielles de chaque mode.
3. Estimation des effets engendrés.

S'il s'agit d'une AMDEC:

4. Evaluation de la criticité de ces effets.

L'analyse commence toujours par l'identification des défaillances potentielles des modes opérationnels. Elle se poursuit, par des inductions afin d'identifier les effets potentiels de ces défaillances (situation dangereuse, événement dangereux et dommages). Une fois les effets potentiels établis, on estime le risque on spécifie les actions de contrôle[12].

II.5.3. Hazard and Operability Study (HAZOP).

La méthode HAZOP a été développée par la société « Imperial Chemical Industries (ICI) » au début des années 1970. Elle sert à évaluer les dangers potentiels résultants des dysfonctionnements d'origine humaine ou matérielle et aussi les effets engendrés sur le système[4].

L'objectif de cette méthode est d'identifier les phénomènes dangereux qui mènent à des événements dangereux lors d'une déviation des conditions normales de fonctionnement d'un système. L'HAZOP n'a pas pour but d'observer les modes de défaillances à l'image de l'AMDE mais plutôt les dérives potentielles des principaux paramètres liés à l'exploitation de l'installation. Lorsqu'une déviation est identifiée, l'analyse tente d'identifier les conséquences qui en découlent. Les déviations potentiellement dangereuses sont ensuite hiérarchisées en leur associant des actions de contrôle allouées. La méthode se termine par l'investigation des causes potentielles des déviations jugées crédibles[22].

De manière générale, les paramètres sur lesquels porte l'analyse sont observables, quantifiables et comparables. Par exemple la vitesse, la température, la pression, le débit, le niveau, le temps, etc.

La combinaison de ces paramètres avec des mots clés prédéfinis (plus que, moins que, pas de, etc.) se fait de la manière suivante [46]:

« Plus de » et « Pression » = « Pression trop haute »,

« Pas de » et « Niveau » = « Capacité vide ».

Dans le cas où une estimation de la criticité est nécessaire, HAZOP est complétée par une analyse a priori de la criticité des risques sur les bases d'une technique quantitative simplifiée.

II.5.4. What-If Analysis.

What-if est une forme dérivée de HAZOP, dont l'objectif est d'identifier les phénomènes dangereux régissant le fonctionnement d'un système. La méthode consiste à réaliser un *brainstorming* partant généralement de situations dangereuses ou d'événements dangereux imaginés, en essayant de répondre à la question : « *qu'arrive-t-il si tel paramètre ou tel comportement n'est pas nominal ?* ». Ceci va permettre d'identifier les effets provoquant des dommages[22].

II.5.5. Analyse par Arbre de Défaillances, Arbre de Causes ou Arbre de Fautes (Fault Tree Analysis - FTA).

L'analyse par Arbre de Défaillances a été élaborée au début des années 1960 par la compagnie américaine « Bell Téléphone ». Elle fut expérimentée pour l'évaluation de la sécurité des systèmes de tir de missiles. Elle est employée pour identifier les causes relatives aux événements redoutés. En partant d'un événement unique, il s'agit de rechercher les combinaisons d'événements conduisant à la réalisation de ce dernier. L'analyse par Arbre de Défaillances peut également être poursuivie dans le cadre d'une reconstitution des causes d'un accident[4].

La méthode consiste en une représentation graphique des multiples causes d'un événement redouté. Elle permet de visualiser les relations entre les défaillances d'équipement, les erreurs humaines et les facteurs environnementaux qui peuvent conduire à des accidents. On peut donc éventuellement y inclure des facteurs reliés aux aspects organisationnels.

L'analyse par Arbre de Défaillances se déroule généralement en 3 étapes [48]:

1. Spécification du système et de ses frontières.
2. Spécification des événements redoutés préalablement identifiés par exemple par APR.
3. Construction des arbres de défaillances : On cible les événements redoutés un par un et on essaye d'identifier les successions et les combinaisons d'événements de base permettant de les atteindre.

Toutefois, un événement de base doit répondre à un certain nombre de critères, en l'occurrence :

- Il doit être indépendant des autres événements de base.
- Il ne doit pas être décomposable en éléments plus simples.
- Il doit avoir une fréquence évaluable.

Le calcul de la probabilité de l'événement sommet se fait à travers la propagation des probabilités d'occurrence des événements de base vers le sommet. Le calcul des coupes minimales peut s'effectuer avec le même principe en essayant cette fois-ci de trouver les plus petits ensembles d'événements de base pouvant mener à un événement redouté. Ceci permettrait de hiérarchiser les événements et d'implanter stratégiquement les barrières de défense afin d'améliorer la fiabilité et la sécurité en même temps [48].

II.5.6. Modèle de danger MADS.

Le modèle MADS (Méthodologie d'Analyse de Dysfonctionnement des Systèmes) est une conceptualisation d'une approche systémique du risque d'accident. Le danger est représenté comme un ensemble de processus conduisant à un processus principal représentant le flux de danger pouvant être généré par un système source de danger. Selon B. Saoulé [22]: « Le flux de danger peut être constitué d'énergie, de matière ou d'information. Il est généré par un événement (ou processus) initiateur d'origine interne ou externe. Ceci se déroule en plusieurs phases, d'abord l'occurrence d'un facteur de déclenchement (événement initiateur) qui génère un flux de danger entre les constituants du système global faisant de l'un d'eux une source et d'un autre une cible de danger. Un Événement Non Souhaité (ENS) se produit alors et peut générer un dommage subi par la ou les cibles, qui peut être de surcroît accru par un processus renforçateur » [22].

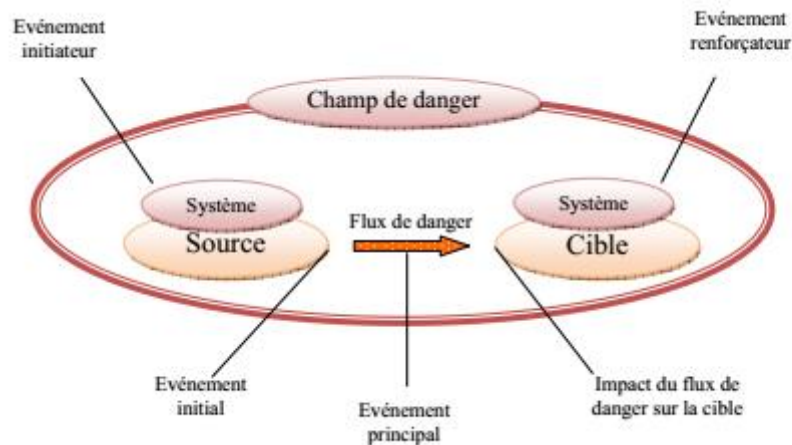


Figure II. 5. Processus de danger du modèle MADS[45].

Le modèle MADS permet de mettre en relation un système source et un système cible par l'intermédiaire des flux de danger dans un environnement dit « champ de danger ».

Le modèle de référence du processus de danger permet de considérer 4 couples « source, cible ». Le tableau suivant regroupe les différentes possibilités d'interaction entre sources et cibles :

Système source	Système cible	Points de vue
Installation (Système)	Installation (Système)	Sécurité des matériels Sûreté de Fonctionnement
Installation (Système)	Opérateur (Facteur Humain)	Ergonomie Sécurité des installations (systèmes)
Opérateur (Facteur Humain)	Installation (Système)	Fiabilité humaine Malveillance interne
Installation (Système)	Population	Hygiène et santé publique Epidémiologie, génie sanitaire Sécurité industrielle
Population	Installation (Système)	Malveillance externe
Installation (Système)	Ecosystème (Environnement)	Génie sanitaire, écologie Hygiène et sécurité de l'environnement
Ecosystème (Environnement)	Installation (Système)	Risques naturels

Tableau II.1. Classes d'interaction des sources/cibles de danger[22].

II.5.7. La méthode MOSAR.

La méthode MOSAR (Méthode Organisée et Systémique d'Analyse des Risques) a été mise au point par Pierre PERILHON au CEA. Elle est utilisée dans divers domaines, en particulier dans l'étude des risques d'installations à hauts risques (nucléaire, chimique, etc.). En effet, la méthode a été effectivement appliquée dans le domaine nucléaire et notamment à EDF (Centres de recherches et d'essais) et au CEA (Installations d'essais). MOSAR contient deux modules hiérarchiques, un module macro « module 'A' » et un module micro « module 'B' » [22].

Le module 'A' a pour but d'identifier les dysfonctionnements techniques et opératoires provoquant un événement indésirable. Les scénarios d'accident sont examinés d'une manière macroscopique, autrement dit, sans traiter en détail des aspects fonctionnels du système et de ses interfaces. Principalement, le module 'A' se décompose en 6 étapes [8]:

- Modélisation de l'installation.
- Identification des sources de danger.
- Identification des scénarios d'accident.
- Evaluation des scénarios de risque.
- Négociation des objectifs.
- Définition des moyens de maîtrise des risques.

Le module 'A' s'appuie essentiellement sur le modèle MADS dans la phase d'identification des sources, flux et cibles de dangers ainsi que les différents événements du processus de danger.

Le module B de la méthode MOSAR qui se présente d'ailleurs comme une suite logique du module A.

Il permet d'effectuer une analyse plus détaillée des dysfonctionnements techniques et opératoires et aussi de l'impact qu'ils pourraient engendrer sur le système global. Ce module se décompose en 5 étapes [21]:

- Identification des risques de dysfonctionnement.
- Evaluation des risques en constituant des Arbres de Défaillances.
- Négociation des objectifs précis de maîtrise des risques.
- Affinement des moyens complémentaires de maîtrise des risque.
- Gestion des risques

II.6. Approches méthodologiques partique d'étude des risques.

Le risque est un problème multiface, il doit être étudié avec des méthodes appropriées pour aider à la prise de décision. Pour évaluer les risques, les gestionnaires utilisent des processus très systémiques. Mitchell, commencent par comprendre le risque avant de passer à l'évaluation (figure II.6). La phase de compréhension est décisive[4].

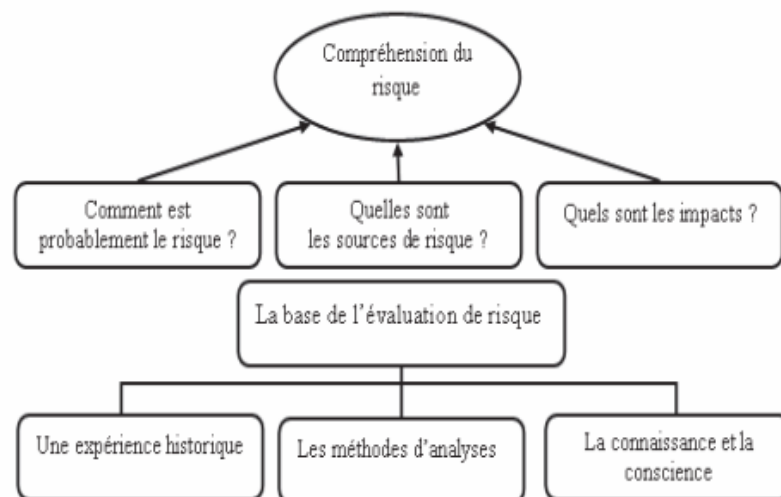


Figure II.6. Les principaux éléments pour développer la compréhension de risque.

D'autres approches ont été proposées. Elles sont recommandées quand les conséquences sont catastrophiques. Dans ces cas, une attention particulière est exigée, surtout quand des vies humaines sont en jeu. Dans la démarche ISO, l'appréciation du risque est une étape importante. Soit le risque est accepté soit, il est maîtrisé ou réduit. La démarche ISO, est présentée schématiquement dans la figure II.7 ci-après.

Selon l'ISO [4]: « La sécurité est obtenue en réduisant le risque à un niveau acceptable. Le risque tolérable (cceptable) est déterminé par la recherche d'un équilibre optimal entre l'idéal de la sécurité absolue et les exigences à remplir par un produit, et des facteurs tels que l'avantage pour

l'utilisateur, l'adéquation à un usage particulier, la rentabilité et les conventions de la société concernée. Le risque acceptable est obtenu par un processus itératif d'évaluation des risques (analyse des risques et l'évaluation des risques) et de la réduction des risques ».

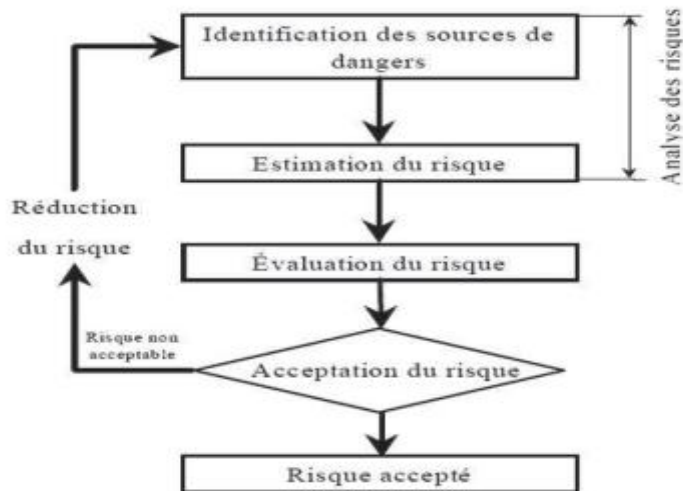


Figure II.7. Démarche ISO pour l'étude du risque[27].

II.7. Gérer les risques.

Il est impossible de prévoir tous les risques, c'est ce qui donne un petit côté aventureux à la gestion de projet. Cependant, une analyse rigoureuse des risques est une bonne façon de garantir la réussite de votre projet.

Le management des risques d'un projet se déroule en sept étapes.

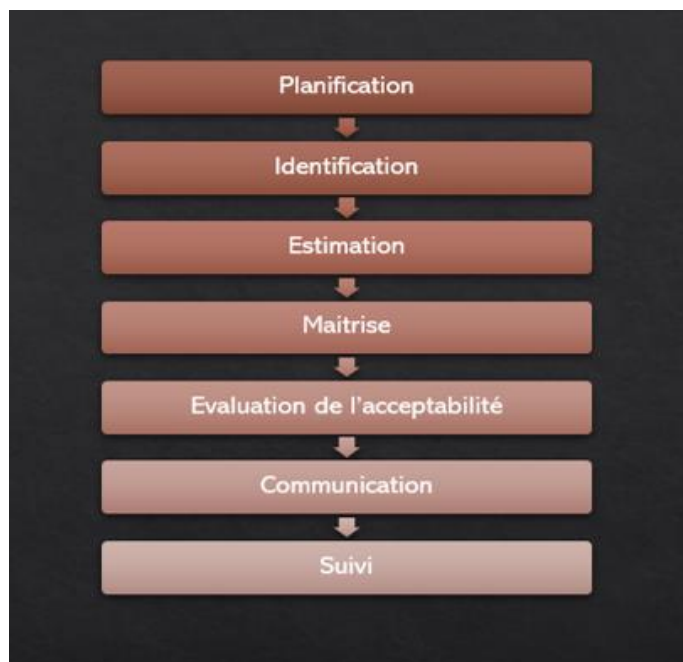


Figure II.8. Etapes de gestion des risques.

II.7.1. Planifier la gestion des risques.

Il faut dans un premier temps clairement définir les **tâches** à accomplir et établir les **responsabilités** [45] :

- En matière de politique d'acceptation des risques (*les critères*) qui revient « au plus haut gradé » : la direction dans une entreprise.
- Concernant toutes les tâches nécessaires à la gestion des risques, qui sont décrites ci-après

II.7.2. Identifier les risques.

La qualité de votre analyse dépendra directement de votre **connaissance du contexte**, il est conseillé de le décrire en spécifiant [49]:

- Les personnes / l'environnement / les équipements... impliqués
- Les différents dangers
- Les scénarios menant aux situations dangereuses
- Les dommages potentiels

Cela passe nécessairement par une **revue de l'état de l'art** :

- Les risques déjà connus,
- Les maîtrises déjà mises en œuvre,
- Les bonnes pratiques (*guides, normes, spécifications, réglementation ...*)
- Les possibilités techniques et les limites qui sont associées

II.7.3. Estimer les risques.

C'est là que les choses se compliquent, il faut **estimer** – au moins qualitativement si ce n'est quantitativement – des **probabilités** et des **gravités**, or :

- Ces estimations concernent une **pleine échelle gigantesque** (*ex :des probabilités qui varient de 1/1'000'000 à 50% ; une perte d'argent d'1€ à 1M€ ; un dommage pour la santé allant d'une simple gêne à la mort...*) qui sont difficiles à appréhender
- Vous n'avez **pas la moindre idée** des estimations

En première approche les estimations sont clairement « *à la louche* », elles sont ensuite affinées avec les données issues [4]:

- De l'état de l'art
- D'expérimentation
- De modélisation
- Du terrain

II.7.3.1. Estimations du niveau de risque par matrice probabilité/gravité.

La plupart des analyses sont réalisées avec des matrices, classiquement, une matrice 3×3 (voire 5×5) donne un **niveau de risque** en fonction du **couple gravité/probabilité**, exemple[22] :

GRAVITÉ	PROBABILITÉ		
	FAIBLE	MOYENNE	HAUTE
SIGNIFICATIVE	Risque Moyen	Risque Élevé	Risque Élevé
MODÉRÉE	Risque Acceptable	Risque Moyen	Risque Élevé
NÉGLIGEABLE	Risque Acceptable	Risque Acceptable	Risque Acceptable

Tableau II.2. Niveau de risque en fonction du couple gravité/probabilité.

II.7.3.2. Estimations quantitatives des risques.

- Les probabilités sont exprimées en %
- Les dommages sont quantifiés lorsque possible (exemple : analyse financière) ou estimés selon une échelle, par exemple : 5 : max, 4 : critique, 3 : très élevé, 2 : élevé, 1: moyen, 0 : faible, -1 : très faible [4].

II.7.4. Maitriser les risques.

L'idée est de définir des mesures de réduction des risques. Beaucoup d'approches s'offrent à vous, il faut néanmoins les appliquer **par ordre d'efficacité** [21]:

1. **Suppression** totale du risque
2. Utilisation de moyens de **protection**
3. Mise en place d'une **prévention**, passant par l'information des parties prenante
4. **Compensation** du risque s'il n'est pas réduit

II.7.4.1. Quand arrêter la maitrise des risques ?

C'est une des grandes subtilités en gestion des risques : **savoir quand arrêter les maitrises**. Les risques sont considérés suffisamment maitrisés quand... vos critères le disent !

Il-y-a deux approches :

1. Une théorique : la maitrise est arrêtée quand le risque résiduel est plus petit qu'un seuil prédéfini

2. Une pratique : la maîtrise est arrêtée quand on ne peut plus maîtriser.

L'approche théorique est dictée par les normes et les réglementations, qui hésitent entre deux concepts:

- Réduction **AFAP** : “*As Far As Possible*” : autant que possible, ce qui n'a aucun sens (*on pourra toujours faire plus*) et est source d'innombrables prises de têtes avec les autorités.
- Réduction **ALARP** : “*As Low As Reasonably Practicable*” : autant que raisonnablement possible, vous comprendrez que la notion de raisonnable n'est pas objective, cette philosophie est impraticable.

En pratique la réduction se fait **AFACP** : “*As Far As Contextually Possible*” la maîtrise s'arrête quand vous êtes conforme à l'état de l'art. Notez que ceci pousse à mettre à jour la maîtrise dès que le contexte évolue[17].

II.7.5. Evaluer l'acceptabilité des risques résiduels.

Vos risques ont été identifiés, un niveau de **risque initial** a été estimé pour le fun, vous avez réduit les risques AFACP, un niveau de **risque résiduel** a été estimé[4].

Reste à faire une revue :

- Des activités de maîtrise,
- Des niveaux de risques résiduels,
- Des mesures planifiées pour le suivi et la mise à jour de la gestion des risques

Et de **conclure sur l'acceptabilité** des risques.

L'acceptabilité doit être maintenue dans le temps, les activités de **surveillance** assureront cela.

II.7.6. Informer/ Communiquer / Sensibiliser.

Il faudra communiquer pour [46]:

- **Sensibiliser** sur les niveaux de risques résiduels.
- Faire comprendre les mesure de **maîtrise des risques reposant sur le destinataire**.
- Sensibiliser sur le besoin de **remonter les informations** (*et surtout les problèmes*).

II.7.7. Surveiller les risques.

Il est capital de correctement **choisir les indicateurs** qui vont permettre de **surveiller les risques** connus et de **détecter les risques** émergents. La définition des indicateurs n'est jamais figée, elle évolue avec votre compréhension des risques. Le risque observé sera à l'image des indicateurs choisis, avec tous les problèmes d'imprécisions, de biais et de mauvaises interprétation possibles.

Pour **choisir les indicateurs de suivi**, on considérera [22]:

- Les besoins pour améliorer l'estimation des risques connus,
- Les moyens de détecter des risques émergents,
- La disponibilité d'indicateur sur des risques comparables ou corrélés,
- La facilité d'interprétation des indicateurs,
- Leur forme, les moyens de collecte des données, les modalités d'analyse, les moyens de présentation des données.

II.8. Critères de choix d'une méthode d'analyse de risque.

Nous avons retenu l'essentiel des critères pesant dans la mise en oeuvre d'une méthode plutôt qu'une autre dans l'étude d'un système donné [33]:

- Domaine de l'étude.
- Stade de l'étude (spécification, conception, ..., démantèlement).
- Perception du risque dans ce domaine.
- Culture de la Sûreté de Fonctionnement de l'organisation.
- Caractéristiques du problème à analyser.
- Niveau envisagé de la démonstration de la sécurité.
- Savoir-faire des intervenants.
- Nature des informations disponibles (spécifications du système et de ses interfaces, contraintes, etc.).
- Retour d'expérience et base de données disponibles.
- Moyens humains, logistiques et autres.
- Délais et autres contraintes de management de projet.

Toutefois, l'utilisation séparée d'une seule méthode d'analyse de risque peut ne pas apporter une démonstration définitive de la réalisation des objectifs de sécurité. En effet, il est nécessaire de combiner plusieurs méthodes pour une meilleure complétude et une bonne cohérence en termes de résultats[45].

II.9. Evaluation de la qualité d'une analyse de risque.

La qualité d'une analyse de risque doit être réévaluée au fur et à mesure de l'avancement d'un projet [45].

II.9.1. Cohérence.

La cohérence renvoie aux faits que [4]:

- La démarche soit rationnelle et consensuelle.

- Les données et les résultats ne soient pas contradictoires, c.-à-d. qu'ils ne s'opposent ni entre eux ni avec les hypothèses de départ.

II.9.2. Complétude.

La complétude peut être formalisée par les hypothèses suivantes: S'il existe un chemin causal inductif entre la cause A et la conséquence B, la cause A doit être déduite à partir de la conséquence B d'une façon immédiate ou différée (effet domino) suivant un chemin inverse déductif[4].

Par analogie, pour tout chemin déductif, il doit y avoir un chemin inductif équivalent.

II.9.3. Exhaustivité.

C'est la contrainte la plus difficile à satisfaire ou à démontrer, car l'analyste dans sa représentation de la réalité fait intervenir son intuition et son savoir-faire dans les limites de sa perception de cette réalité. Il peut donc porter un jugement disproportionné sur certains facteurs (cause, effet, probabilité, conséquence, etc.), comme il peut éventuellement manquer d'imagination par rapport à d'autres[27].

En effet, pour converger vers l'exhaustivité, il convient que l'analyse de risque soit [23]:

- Elaborée au sein d'un groupe d'experts, idéalement en groupe pluridisciplinaire.
- Examinée par de tierces personnes externes.
- Assistée par des outils informatiques d'aide à la décision.

II.9.4. Intégrité

Assurance fournie par une organisation que l'analyse de risque est correctement accomplie à moins que les analystes, experts, ingénieurs ou autres, ne préviennent du manque de rigueur dans une quelconque étape, d'un désaccord sur un jugement, de la subjectivité dans l'estimation de paramètres telle que la probabilité d'occurrence, etc[27].

II.9.5. Traçabilité

L'analyse de risque n'est pas un but en soi, mais plutôt un moyen ayant pour but de démontrer le respect des exigences de sécurité. Chaque méthode est praticable dans un contexte particulier du cycle de vie d'un système. Chaque fait appelle aux données disponibles et fournit un certain nombre de résultats qui devraient être repris, en tant que données d'entrée, par l'analyse suivante. Ainsi, de fil en aiguille, on se retrouve entraîné de concevoir la partie management des risques du plan général de démonstration et de

maintien de la sécurité en l'occurrence le SMS pour Safety Management System traduit en français par Système de Management de la Sécurité[21].

II.10. Conclusion.

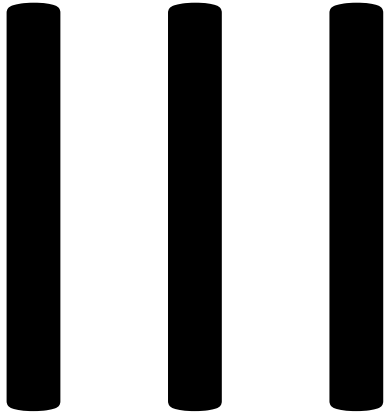
Vous le savez, le risque fait partie intégrante de la gestion de projet. Il est donc essentiel de mettre en place un plan de management des risques, et ce dès les premières étapes du lancement du projet. Cela permet d'identifier, de prévenir et de limiter ces risques en anticipant leur traitement grâce à la mise en œuvre d'actions préventives et correctrices. C'est une phase essentielle qui vous permettra de minimiser les pertes de temps et d'argent, et vous préparera à gérer efficacement le risque lorsqu'il surviendra.

Les méthodes qualitatives d'analyse de risques permettent d'identifier les événements dangereux ou les enchaînements d'événements dangereux pouvant conduire à une situation à risques, ainsi que les causes et les conséquences de ces événements. Elles sont qualitatives puisqu'elles conduisent à une estimation des conséquences des événements dangereux et non à un chiffrage de ces conséquences comme c'est le cas pour des méthodes quantitatives.

De nombreuses méthodes qualitatives d'analyse de risques ont été développées ; peuvent se différencier dans un premier temps par leur typologie : Qualitative ou quantitative, lorsqu'une analyse quantitative peut suivre une analyse qualitative ;

Inductive, lorsque l'approche part des événements élémentaires pour aboutir à l'événement indésirable, ou déductive, lorsque l'approche part de l'événement indésirable et remonte aux causes d'origine ;

Le point de départ de toute analyse de risque est la connaissance de l'organisation fonctionnelle du système étudié. Les méthodes permettant d'obtenir la description du fonctionnement d'un système.



Téledétection appliquée

au milieu naturel

Téledétection appliquée au milieu naturel

III.1. Introduction

La télédétection est la discipline scientifique qui regroupe « l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci » [3]. Cela inclut « l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plates-formes aéroportées, spatiales, terrestres ou maritimes » [3]. Par ailleurs, l'écologie est « la discipline scientifique qui s'intéresse à l'étude des relations entre les organismes et leur environnement » [3]. De manière tout à fait générale, la télédétection spatiale permet une observation homogène, exhaustive, répétée et sans interférence entre l'observateur et la cible, du comportement spectral de l'ensemble d'un système écologique, à une échelle spatiale donnée.

Parallèlement, les applications de la télédétection se sont multipliées, dans de nombreux domaines de la météorologie et de la climatologie, de l'océanographie, de la cartographie ou de la géographie. Quel que soit le domaine d'application considéré, une bonne interprétation des documents de télédétection ou une bonne utilisation des données numériques nécessite la compréhension des principes physiques sur lesquels est fondée la technique de télédétection employée[5].

Le but de ce chapitre est :

- De fournir une présentation de ces principes s'adressant à des non-physiciens, c'est à dire dépouillée au maximum de l'appareil des formules physiques mais en conservant dans la mesure du possible toute la rigueur nécessaire.
- De fournir aux utilisateurs que sont les géographes, les gestionnaires de l'environnement ou les aménageurs, une introduction aux méthodes d'utilisation de traitement des données de télédétection, à partir d'exemples simples.

III.2. Historique de la télédétection.

L'histoire des techniques de la télédétection peut être découpée en[4], [30]:

- 1839 : Mise au point de la photographie (NIEPCE, DAGUERRE).
- 1844 : Premières photographies aériennes réalisées depuis un ballon par G.F. Tournachon dit NADAR.
- 1856 : Le même NADAR fait breveter l'installation d'une chambre photographique à bord de la nacelle d'un ballon pour la prise de photographies aériennes verticales.

- 1858-1898: LAUSSEDAT expérimente systématiquement l'utilisation de la photographie aérienne (ballon) en cartographie et met au point les méthodes de la photogrammétrie.
- 1909: Premières photographies depuis un avion (WRIGHT).
- 1914-1918: Utilisation intensive de la photographie aérienne comme moyen de reconnaissance pendant la 1ère guerre mondiale.
- 1919: Mise au point du premier restituteur stéréoscopique moderne (appareil de POIVILLIERS) pour l'utilisation des photographies aériennes en cartographie topographique.
- 1919-1939 : Essor de la photographie aérienne pour la cartographie et la prospection pétrolière (Moyen-Orient).
- 1940 : Apparition des premiers radars opérationnels en Grande-Bretagne (bataille d'Angleterre).
- Depuis 1945: Développement continu de la photographie aérienne comme méthode opérationnelle de cartographie et de surveillance de l'environnement. Perfectionnement des appareils et des émulsions (infrarouge).
- 1957 : Lancement de Spoutnik 1, premier satellite artificiel.
- 1960-1972 : Développement parallèle de la technique des satellites et des capteurs (mise au point des radiomètres et radars imageurs).
- 1960 : Lancement de Tiros, premier satellite météorologique équipé de caméras de télévision pour le suivi des masses nuageuses.
- 1964-1969 : Embarquement d'appareils photographiques à bord d'engins spatiaux habités.
- 1972 : Lancement d'ERTS, rebaptisé Landsat 1, premier satellite spécialisé de télédétection des ressources terrestres.
- 1974-1978 : Mise en place, sous l'égide de l'Organisation Météorologique Mondiale, du réseau des satellites météorologiques géostationnaires.
- 1978 : Lancement de Seasat, premier satellite spécialisé dans la télédétection de l'océan, équipé, entre autres capteurs, d'un radar.
- 1982 : Apparition de la haute résolution spatiale pour l'observation de la Terre : lancement de Landsat 4, équipé du radiomètre « Thematic Mapper ».
- 1986 : Lancement de SPOT 1 (Système Probatoire d'Observation de la Terre), satellite français de télédétection. Début de l'exploitation commerciale des images (Société Spotimage).
- 1991 : Mise en orbite et début de l'exploitation du satellite européen ERS-1, équipé de plusieurs capteurs passifs et actifs pour l'étude de l'environnement global de la planète.
- 1999 : Lancement par la société privée Space Imaging Corp. du satellite IKONOS, offrant des images à très haute résolution spatiale (1 m).

III.3. Principe de la télédétection .

La télédétection implique une interaction entre la lumière et l'objet d'intérêt (corail, arbre, champ, etc.). Il y a six composants principaux [30], [54]:

- **Source de lumière** (rayonnement électromagnétique) : soit du soleil soit artificielle.
- **Objet d'intérêt** (par exemple, corail, arbre, maison) : les objets absorbent, réfléchissent le rayonnement vers un capteur distant de différentes manières selon leur taille, leur orientation, leur texture, leur couleur ou leur composition chimique.

Par exemple, le sable blanc et sec a un albédo élevé et reflétera plus de lumière que la boue humide et sombre. Ce sont les différences de motifs de réflexion qui créent des signatures spectrales uniques et permettent de différencier les habitats, les objets ou même les textures.

- **Capteur** monté sur une plate-forme (exemple, satellite, avion, drone), qui recueille le rayonnement émis ou reeété par l'objet d'intérêt ;
- **Récepteur** sur terre ou dans l'espace qui recevra les informations du capteur ;
- **Système iSun** traduire les informations de télédétection en données ;
- **Experts** ayant des compétences en télédétection et en cartographie traduisent les données générées par ordinateur en cartes.

Les cartes sont prêtes à être utilisées par des non-experts pour des applications telles que la cartographie participative qui combine les connaissances locales et les données géographiques.

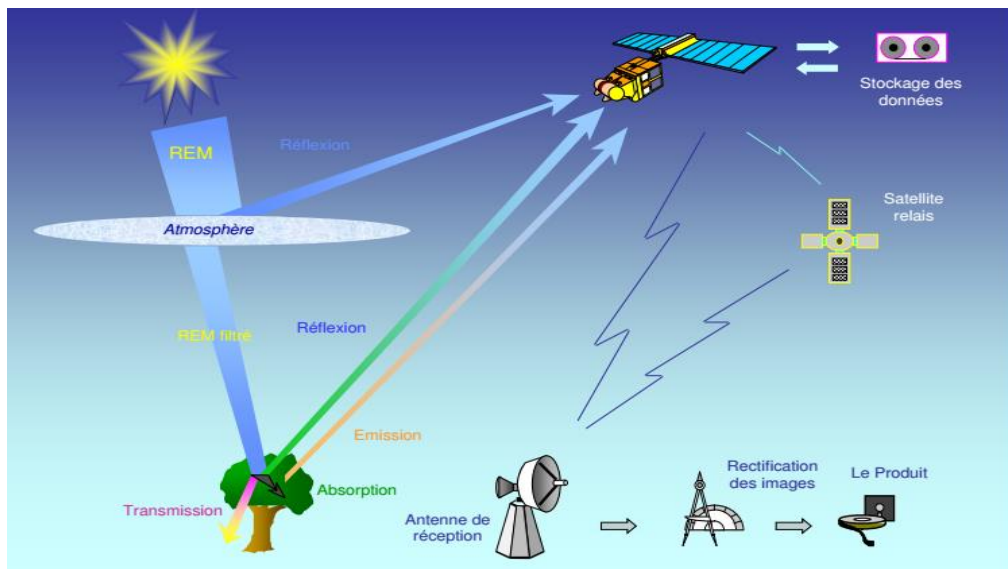


Figure III.1. Notion de télédétection : le principe physique[52].

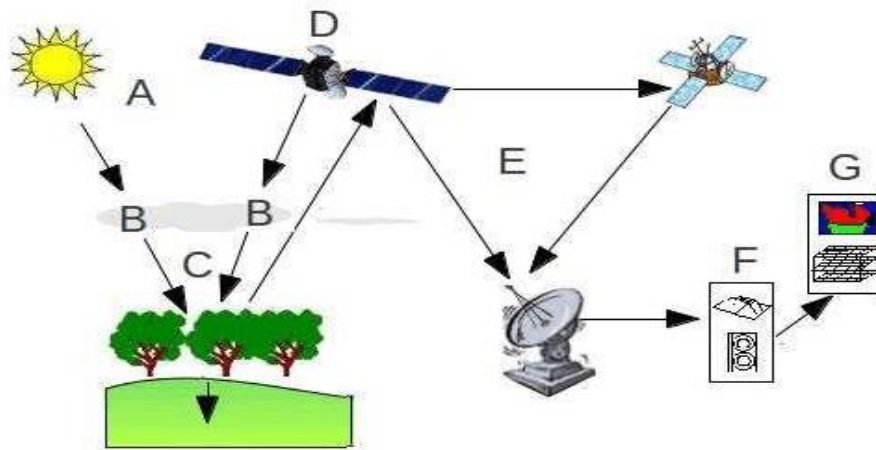


Figure III.2. Définition des paramètres : (A) source d'énergie (B) rayonnement et atmosphère (C) cible (D) capteur (E) transmission, réception et traitement (F) interprétation (G) application[52].

III.3.1. Le rayonnement électromagnétique (REM).

III.3.1.1. Bases physiques.

L'instrument utilisé pour la télédétection observe un domaine de fréquences précis qui peut être situé dans l'**infrarouge**, la **lumière visible**, les **micro-ondes**, l'**ultraviolet**, le **rayonnement X** ou les **ondes radio**. Ceci est rendu possible par le fait que les objets étudiés (surface, plantes, maisons, plans d'eau ou masses d'air) émettent ou réfléchissent du rayonnement à différentes longueurs d'onde et intensités en fonction de leurs composants et de leur état. Certains instruments de télédétection utilisent également des ondes sonores de façon similaire tandis d'autres mesurent des variations dans des champs magnétiques ou gravitaires[18].

Le rayonnement électromagnétique exploité par le processus de télédétection peut provenir des sources suivantes [51]:

- Le rayonnement solaire réfléchi par l'objet observé
- Le rayonnement émis par l'objet observé (rayonnement thermique)
- Le rayonnement émis par l'instrument utilisé pour la télédétection (para exemple radar) et réfléchi par l'objet observé.

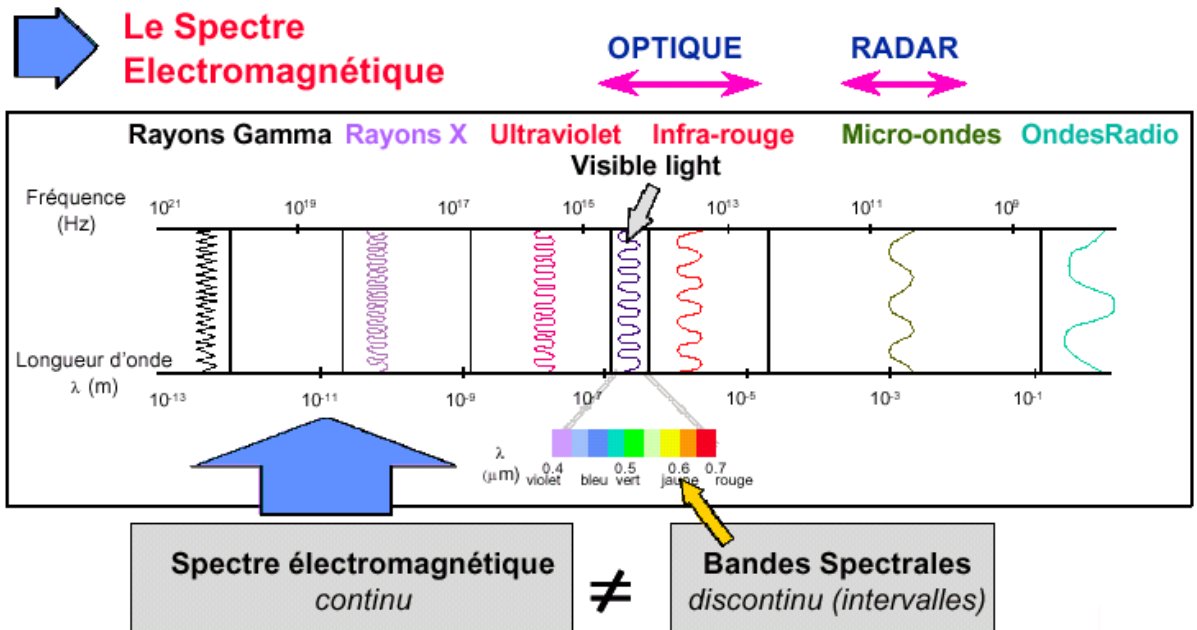


Figure III.3. Le spectre électromagnétique[50].

Le spectre électromagnétique représente la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence ou bien encore de leur énergie (figure ci dessous).

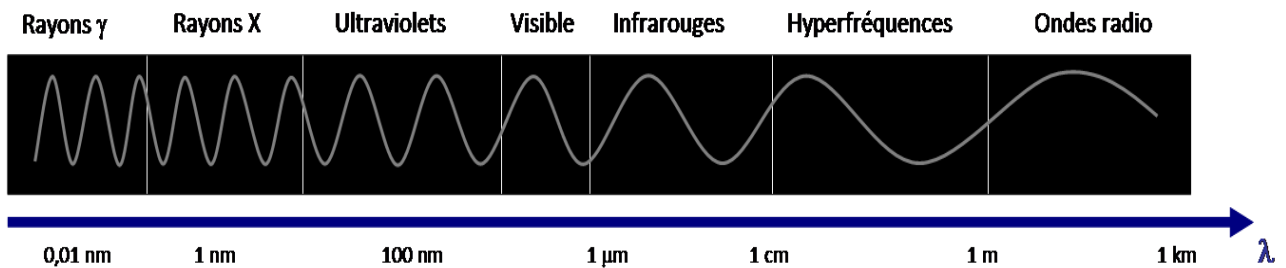


Figure III.4. Fréquence de spectre électromagnétique[50].

En partant des ondes les plus énergétiques, on distingue successivement [54]:

- **Les rayons gamma (γ)** : ils sont dus aux radiations émises par les éléments radioactifs. Très énergétiques, ils traversent facilement la matière et sont très dangereux pour les cellules vivantes. Leurs longueurs d'onde s'étendent d'un centième de milliardième (10^{-14} m) à un milliardième (10^{-12} m) de millimètre.
- **Les rayons X** : rayonnements très énergétiques traversant plus ou moins facilement les corps matériels et un peu moins nocifs que les rayons gamma, ils sont utilisés notamment en médecine pour les radiographies, dans l'industrie (contrôle des bagages dans le transport aérien), et dans la recherche pour l'étude de la matière (rayonnement synchrotron).

Les rayons X ont des longueurs d'onde comprises entre un milliardième (10^{-12} m) et un cent millième (10^{-8} m) de millimètre.

- **Les ultraviolets** : rayonnements qui restent assez énergétiques, ils sont nocifs pour la peau. Heureusement pour nous, une grande part des ultraviolets est stoppée par l'ozone atmosphérique qui sert de bouclier protecteur des cellules.

Leurs longueurs d'onde s'échelonnent d'un cent millième (10^{-8} m) à quatre dixièmes de millième ($4 \cdot 10^{-7}$ m) de millimètre.

- **Le domaine visible** : correspond à la partie très étroite du spectre électromagnétique perceptible par notre œil. C'est dans le domaine visible que le rayonnement solaire atteint son maximum ($0,5 \mu\text{m}$) et c'est également dans cette portion du spectre que l'on peut distinguer l'ensemble des couleurs de l'arc en ciel, du bleu au rouge.

Il s'étend de quatre dixièmes de millième ($4 \cdot 10^{-7}$ m) - *lumière bleue* - à huit dixièmes de millième ($8 \cdot 10^{-7}$ m) de millimètre - *lumière rouge*.

- **L'infrarouge** : rayonnement émis par tous les corps dont la température est supérieure au zéro absolu (-273°C).

En télédétection, on utilise certaines bandes spectrales de l'infrarouge pour mesurer la température des surfaces terrestres et océaniques, ainsi que celle des nuages.

La gamme des infrarouges couvre les longueurs d'onde allant de huit dixièmes de millième de millimètre ($8 \cdot 10^{-7}$ m) à un millimètre (10^{-3} m).

- **Les ondes radar ou hyperfréquences** : Cette région du spectre est utilisée pour mesurer le rayonnement émis par la surface terrestre et s'apparente dans ce cas à la télédétection dans l'infrarouge thermique, mais également par les capteurs actifs comme les systèmes radar.

Un capteur radar émet son propre rayonnement électromagnétique et en analysant le signal rétrodiffusé, il permet de localiser et d'identifier les objets, et de calculer leur vitesse de déplacement s'ils sont en mouvement. Et ceci, quelque soit la couverture nuageuse, de jour comme de nuit.

Le domaine des hyperfréquences s'étend des longueurs d'onde de l'ordre du centimètre jusqu'au mètre.

- **Les ondes radio** : Ce domaine de longueurs d'onde est le plus vaste du spectre électromagnétique et concerne les ondes qui ont les plus basses fréquences. Il s'étend des longueurs d'onde de quelques cm à plusieurs km.

Relativement faciles à émettre et à recevoir, les ondes radio sont utilisées pour la transmission de l'information (radio, télévision et téléphone). La bande FM des postes de radio correspond à des longueurs d'onde de l'ordre du mètre. Celles utilisées pour les téléphones cellulaires sont de l'ordre de 10 cm environ.

Contrairement à l'œil humain qui n'est capable de capter le rayonnement que dans une fenêtre très étroite du spectre électromagnétique, celle correspondant au domaine du visible (longueurs d'onde

comprises entre 0,4 μ m et 0,7 μ m), les capteurs satellitaires utilisent une fraction beaucoup plus étendue du spectre[29].

III.3.1.2. Signatures spectrales des principales surfaces naturelles.

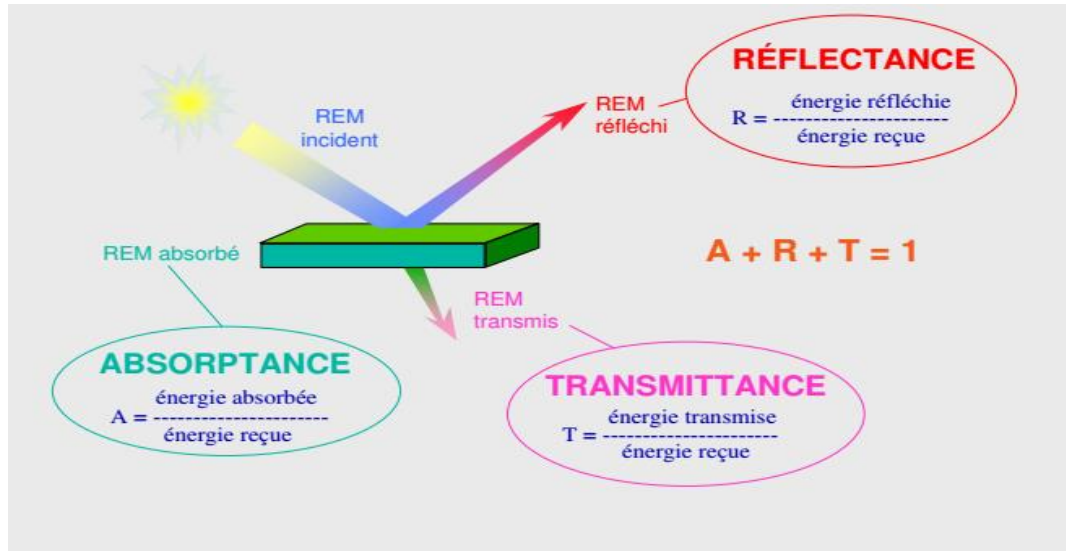


Figure III.5. Signatures spectrales [29].

En fonction de la nature et des caractéristiques intrinsèques des objets et des surfaces, le rayonnement incident interagira avec la cible selon l'une ou l'autre des propriétés citées précédemment, ou de manière générale selon une combinaison de ces propriétés.

Chaque surface possède ainsi une signature spectrale - quantité d'énergie émise ou réfléchie en fonction de la longueur d'onde - qui lui est propre et qui permettra son identification sur les images satellitaires. La figure ci-dessous présente la signature spectrale des principales surfaces naturelles[29].

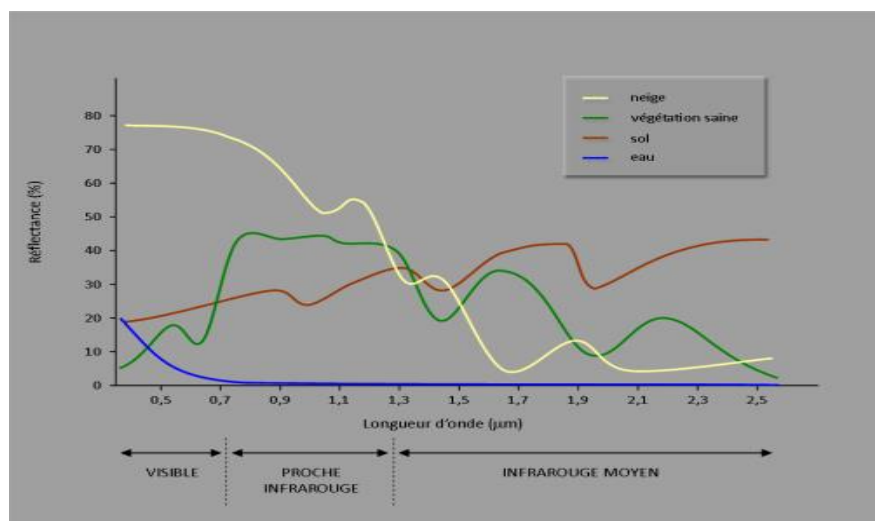


Figure III.6. Signatures spectrales des surfaces naturelles dans le domaine du visible, du proche infrarouge et de l'infrarouge moyen[29].

En ce qui concerne la signature spectrale des sols, on note un accroissement régulier de la réflectance au fur et à mesure qu'on se déplace vers les grandes longueurs d'onde. Les discontinuités que l'on observe dans le proche infrarouge et l'infrarouge moyen sont dues aux bandes d'absorption de l'eau.

L'étude des propriétés spectrales des sols est toutefois particulièrement complexe car elle doit tenir compte de la nature hétérogène du sol qui contient à la fois des matières minérales et organiques, mais aussi une composante liquide ; tous ces éléments vont influencer la réflexion du rayonnement[54].

III.3.2. Les vecteurs et les capteurs.

III.3.2.1. Les capteurs

En télédétection, l'appareil utilisé pour acquérir les images (donc pour mesurer le rayonnement qui parvient à l'instrument à bord d'un satellite) est généralement désigné par le terme de “**capteur**”. Ce terme est utilisé de préférence parce qu'il désigne toute une catégorie de dispositifs de recueil de l'information et non pas seulement les appareils photo. Un appareil photo ne capte généralement que les informations telles que celles perçues que par l'œil (à l'exception des infrarouges, mais cela dépend de l'appareil et de la pellicule utilisée), tandis que la télédétection met en jeu de nombreux types de rayonnements différents dans le spectre électromagnétique [50].



Figure III.7. Capteur utilisé en télédétection [50].

Les familles des capteurs.

Parmi les capteurs on distingue les capteurs passifs (typiquement caméra optique) qui analyse le rayonnement émis par l'objet observés et les capteurs actifs (typiquement radar) qui analysent la réflexion du rayonnement qu'ils émettent.

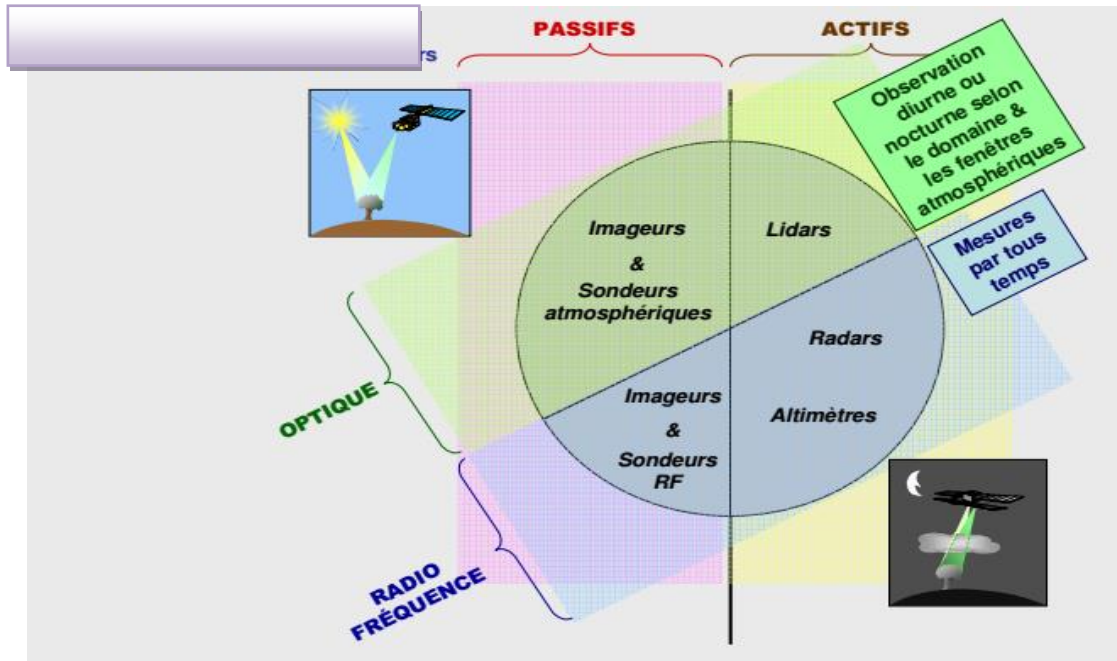
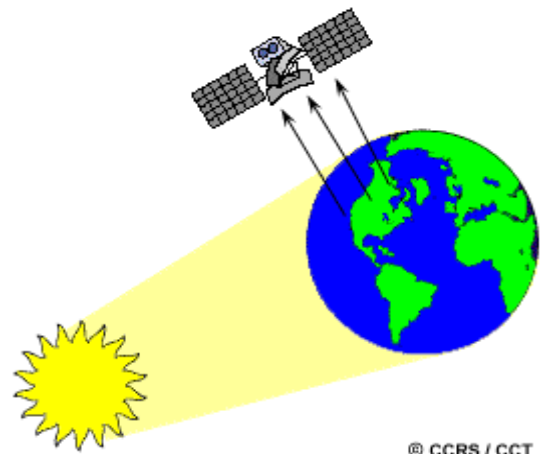


Figure III.8. Familles des capteurs [54].

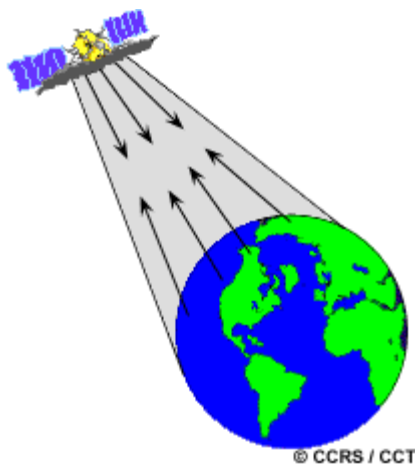
A. Capteurs passifs .

Enregistrer l'énergie naturelle réfléchiée ou émise par la surface de la Terre. La source de rayonnement la plus courante détectée par les capteurs passifs est la lumière solaire réfléchiée. Un exemple de capteur passif est une caméra avec le flash désactivé.



© CCRS / CCT

Figure III.9. Capteurs passifs.



© CCRS / CCT

Figure III.10. Capteurs actifs.

B. Capteurs actifs .

Fournir leur propre source d'énergie, comme un rayonnement électromagnétique laser ou micro-ondes, pour éclairer les objets qu'ils observent. Un capteur actif peut fonctionner jour et nuit en émettant un rayonnement en direction de la cible à étudier. Un exemple de capteur actif est une caméra avec le flash activé.

C. Capteurs optiques

Les capteurs optiques sont des systèmes passifs qui mesurent l'énergie électromagnétique en provenance de l'objet observé. Cette énergie peut être celle du Soleil qui a été réfléchi (rayonnement allant du visible à l'infrarouge moyen) ou celle émise par l'objet observé (infrarouge thermique ou lointain). L'instrument peut privilégier la dimension spatiale : c'est alors un radiomètre imageur (notre appareil photo) ou la dimension spectrale et c'est alors un spectro-radiomètre. L'instrument peut capturer à la fois les dimensions spatiale et spectrale et c'est alors un spectro-imageur [15].

Les capteurs optiques peuvent utiliser différentes techniques d'acquisition :

- Acquisition matricielle
- Acquisition ligne par ligne (push-broom en anglais)
- Acquisition pixel par pixel

On peut citer :

- HRC (SPOT) : Bandes XS1, XS2, XS3
- TM (LANDSAT) : Bandes TM1, 2, 3, 4 et 5
- AVHRR (NOAA) : Bandes 1, 2 et 3
- METEOSAT : Bande 1

Longueurs d'onds :

0.4 à 1.8 μm

D. Capteurs à micro-ondes

- Radar à synthèse d'ouverture
- Altimètre radar
- Diffusiomètre à vent

SEASAT

ERS-1

RADARSAT

Longueurs d'onds :

0.1cm à 1m

III.3.2.2. Les vecteurs ou plate-forme.

Leur rôle est de transporter le capteur et de lui apporter, dans le cas des barrettes linéaires, le mouvement nécessaire au balayage du paysage dans la direction perpendiculaire aux barrettes. Ces vecteurs, qui peuvent être des avions ou des satellites, se déplacent sur des trajectoires bien définies.

Mme Dr. Boutahir Bencheikh M

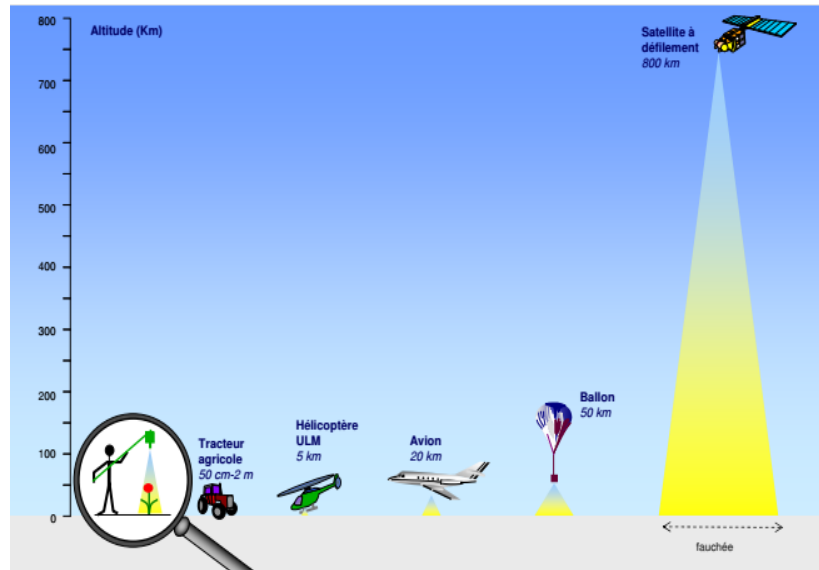


Figure III.11. Les vecteurs ou plate-forme [54].

III.3.3. Un système actif à radio fréquences : le radar

Le radar (acronyme issu de l'anglais **R**adio **D**etection **A**nd **R**anging) est un système qui utilise les ondes électromagnétiques pour détecter la présence et déterminer la position ainsi que la vitesse d'objets tels que les avions, les bateaux, ou la pluie. Les ondes envoyées par l'émetteur sont réfléchies par la cible, et les signaux de retour (appelés écho radar ou écho-radar) sont captés et analysés par le récepteur, souvent situé au même endroit que l'émetteur. La distance est obtenue grâce au temps aller/retour du signal, la direction grâce à la position angulaire de l'antenne où le signal de retour a été capté et la vitesse avec le décalage de fréquence du signal de retour généré selon l'effet Doppler [29].

Il existe également différentes informations trouvées par le rapport entre les retours captés selon des plans de polarisation orthogonaux.

Le radar est utilisé dans de nombreux contextes : en météorologie pour détecter les orages, pour le contrôle du trafic aérien, pour la surveillance du trafic routier, par les militaires pour détecter les objets volants mais aussi les navires, en astronautique, etc.

On peut citer les principaux types des radars [54]:

- **Ers 1 et 2** : altimétrie, diffusiomètre, radar imageur
- **Jason 1** : altimétrie – océanographie
- **Seasat** : altimétrie, radar imageur, température de surface, radiomètre visible et infrarouge
- **Radarsat** : radar imageur
- **Envisat** : radar imageur- étude de l'environnement



Figure III.12. Une antenne radar longue portée ALTAIR.

III.3.3.1. Composantes d'un système radar.

Composantes d'un radar :

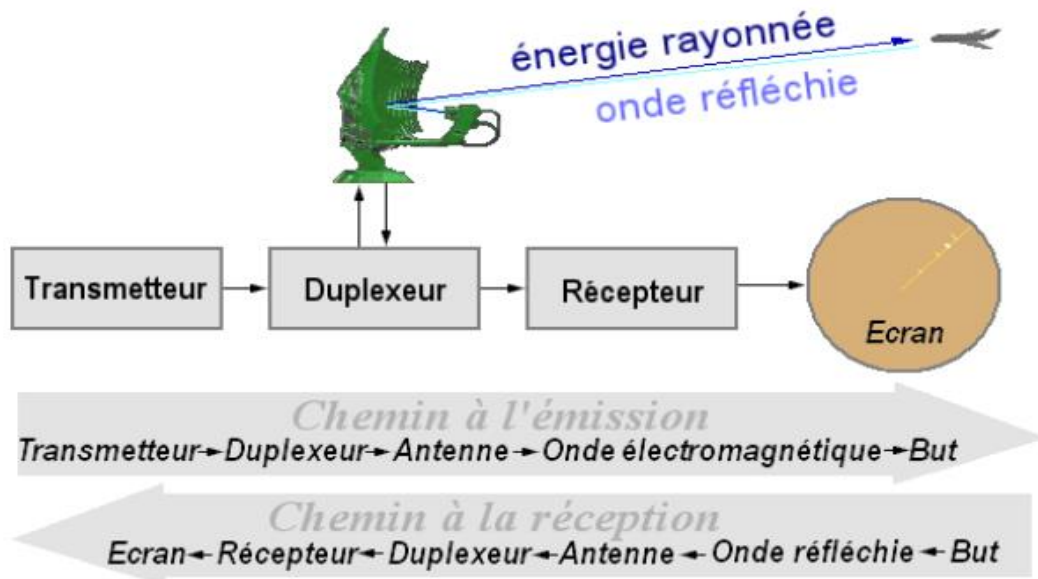


Figure III.13. Composantes d'un radar.

Un radar est formé de différentes composantes [50]:

- **L'émetteur** qui produit l'onde radio ;
- **Un guide d'ondes** qui amène l'onde vers l'antenne sur les radars ;

Le duplexeur, un commutateur électronique, dirige l'onde vers l'antenne lors de l'émission puis le signal de retour depuis l'antenne vers le récepteur ;

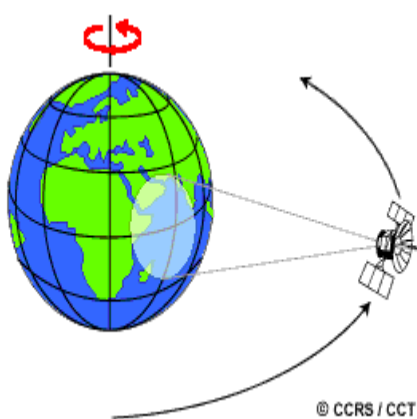
- **L'antenne** dont le rôle est de diffuser l'onde électromagnétique vers la cible avec le minimum de perte. Sa vitesse de déplacement, rotation et/ou balancement, ainsi que sa position, en élévation comme en azimut, sont généralement asservies mécaniquement.
- **Le récepteur** qui reçoit le signal incident (cible - antenne - guide d'ondes - duplexeur), le fait émerger des bruits radios parasites, l'amplifie, le traite ;
- **Un étage de traitement** de signal permettant de traiter le signal brut afin d'en extraire des données utiles à l'opérateur (détection, suivi et identification de cible; extraction de paramètres météorologiques, océanographiques, etc.). Le tout est contrôlé par le système électronique du radar, programmé selon un logiciel de sondage. Les données obtenues sont alors affichées aux utilisateurs.

III.3.4. Satellite de télédétection.

Un satellite de télédétection est un satellite artificiel qui effectue des observations à distance par réception d'ondes électromagnétiques à l'aide de capteurs passifs ou actifs. ceux-ci peuvent être des caméras ou des spectromètres (instruments passifs), des radars (radar spatial) (instruments actifs), etc. le satellite de télédétection s'oppose au satellite qui effectue des observations en utilisant des instruments effectuant des mesures in situ, par exemple pour étudier le champ magnétique, les champs électriques, la composition de l'exosphère, le plasma, la poussière interplanétaire.

III.3.4.1. Types de satellite.

Satellites géostationnaires



Altitude d'environ 36 000 kilomètres.
Satellites de communication et d'observation
des conditions météorologiques

Satellites quasi-polaires



De nos jours, la plupart des plates-formes
satellitaires sont placées sur orbite quasi-
polaire.

Figure III.14. Types de satellite.

III.3.4.2. Satellites utilisés pour la télédétection.

LANDSAT 8 2013 (résolution 15 à 30m)



Name	launched	actually
LANDSAT-1 (ERTS-1)	23 July 1972	ceased
LANDSAT-2	22 January 1975	ceased
LANDSAT-3	1978	ceased
LANDSAT-4	1982	ceased
LANDSAT-5	1984	Operational
LANDSAT-6	October 1993	Failed
LANDSAT-7	15 April 1999	Operational

SPOT 7 2014 (résolution 1,5 m)



Name	launched	actually
SPOT-1	1986	Reactivated
SPOT-2	1990	Operational
SPOT-3	1993	ceased
SPOT-4	1998	Operational
SPOT-5	2002	Operational
SPOT-6	2012	Operational



QuickBird 2001 (résolution 0,65m)



IKONOS 1999 (résolution 0,82m)



ASTER 1999 (résolution 15 à 90m)

Figure III.15. Satellites utilisés pour la télédétection.

III.4. Les domaines d'application de la télédétection.

La télédétection permet de nos jours d'observer l'ensemble de la planète dans tout le spectre électromagnétique avec une résolution spatiale inférieure au mètre dans le domaine optique. Une même région peut être observée à des intervalles rapprochés. Une des limites de la télédétection est qu'elle fournit des informations principalement sur la surface des sols. On peut distinguer les usages en fonction du domaine auquel ils s'appliquent : maritime, terrestre, atmosphérique [1].

III.4.1. Applications terrestres.

III.4.1.1. Foresterie.

L'importance des forêts comme ressource alimentaire et protectrice, comme habitat, comme pourvoyeur de papier, de matériaux de construction et de combustion ainsi que de plantes médicinales est indéniable. Les forêts jouent également un rôle important dans les réserves et l'équilibre des échanges de CO₂ sur la Terre. Elles constituent un maillon clé entre l'atmosphère, la géosphère et l'hydrosphère.

La foresterie peut bénéficier de nombreuses applications internationales et domestiques de la télédétection. Mentionnons parmi celles-ci :

- Le développement continu,
- La biodiversité,
- Les titres et cadastres des terres,
- La surveillance du déboisement,
- La gestion du reboisement,
- Les opérations de coupes commerciales,
- La cartographie et la protection des côtes et bassins versants et la surveillance biophysique (estimation d'habitats sauvages).

III.4.1.2. L'agriculture.

La végétation herbacée terrestre fait l'objet de plusieurs types d'utilisation. Ces types peuvent se répartir de la façon suivante :

1- Utilisation pour la production d'herbe et de fourrage, nécessaires à l'alimentation du bétail :

2- Utilisation à titre de conservation des milieux :

- Périmètre de protection des bassins versants pour le captage d'eau potables,
- conservatoires biologiques d'espèces (animales et végétales),
- zone de protection contre l'érosion 'éolienne et hydrique) ;

3- Utilisation comme valeur d'usage :

- Dans un but esthétique ;
- Pour une vocation touristique.
- Prévisions de récoltes
- Évaluation des dommages causés par la sécheresse et les inondations
- Contrôle des maladies des cultures et des nuisibles
- Détermination du stress hydrique ou nutritionnel des cultures.

III.4.1.3. Couverture et utilisation du sol.

La télédétection permet d'obtenir des cartes d'utilisation du sol et des couvertures terrestres qui sont utilisées pour faire face aux changements induits par la croissance de la population, le développement économique et les changements climatiques.

III.4.1.4. Suivi des zones urbaines.

Les applications dans ce domaine dépendent de la résolution spatiale et du nombre de bandes spectrales disponibles. Ces applications sont :

- Suivi de la croissance urbaine au niveau local, régional et global ;
- Utilisation du sol ;
- Vulnérabilité en cas de catastrophes ;
- Évaluation des dommages après une catastrophe ;
- Télédétection à très haute résolution ;

III.4.1.5. Cartographie.

La résolution spatiale des capteurs récents permet de réaliser des cartes ou d'alimenter des systèmes d'information géographique (SIG). Les cartes topographiques sont souvent produites à l'aide de paires stéréographiques de photos aériennes permettant de recréer une image en trois dimensions.

III.4.1.6. Température de la surface terrestre.

III.4.2. Catastrophe naturelles

- Prévention des catastrophes naturelles (incendie, inondation, tremblement de terre, éruption volcanique, sécheresse) ;
- Suivi en temps réel des catastrophes ;
- Analyse des impacts ;
- Suivi des opérations de réhabilitation ;

III.4.3. Applications militaires.

- Opérations de renseignement ;
- Cartographie ;
- Vérification des traités internationaux ;
- Contrôle des frontières.

III.4.4. Autres applications

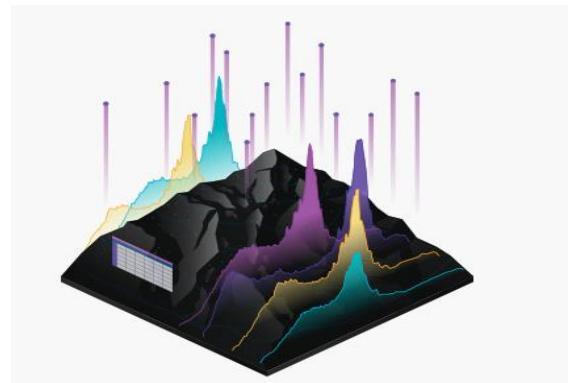
- Géologie : minéraux, sédimentation, érosion ;
- Humidité du sol ;
- Topographie ;
- Archéologie ;
- Géodésie.

III.4.5. Applications maritimes

- Température de la surface de la mer
- Niveau de la mer
- Salinité
- Vents de surface (vitesse et direction) : Le vent de surface est le mouvement de l'atmosphère relatif à la surface de l'océan.
- Courants marins
- Couleur de l'océan
- Qualité de l'océan
- Acidité
- Gestion des zones côtières
- Bathymétrie (érosion, sédimentation). Les fonds marins sont cartographiés grâce à l'usage des sonars.

III.5. Le système d'information géographique (SIG).

Le SIG est un outil informatique permettant de définir un environnement de gestion et d'exploitation de données localisées dans l'espace. Il intègre des machines et des réseaux, des logiciels et des bases de données de la télédétection (images, cartes,...) [18].



La gestion de l'information graphique et notamment le dessin assisté par ordinateur (DAO) sous Autocad qui a fourni un standard de format de données graphiques (format DXF) que de nombreux SIG intègrent dans les modules d'importation de données pratiques.

La gestion des bases de données par des systèmes informatiques selon des tables et des relations entre elles (ORACLE, ACCESS, DBASE...).

Questions auxquelles peuvent répondre les SIG : Selon ESRI [5], un SIG doit répondre à cinq questions, quel que soit le domaine d'application: Comment : comment les objets sont-ils répartis dans l'espace étudié, et quelles sont leurs[54].

- **Quoi** : quels objets peut-on trouver sur l'espace étudié ?
- **Où** : où se situe le domaine d'étude et quelle est son étendue géographique?
- **Et si** : que se passerait-il s'il se produisait tel événement ?
- **Quand** : quel est l'âge d'un objet ou d'un phénomène ? C'est l'analyse temporelle.
- **Relations** ? C'est l'analyse spatiale.

III.5.1. domaines d'application de SIG.

Les approches ont mis en évidence le fait qu'un système d'information géographique est un outil de gestion et d'aide à la décision. C'est un outil de gestion pour le technicien qui doit au quotidien assurer le fonctionnement d'une activité. Le SIG doit aussi être un outil d'aide à la décision pour le décideur (directeur, administrateur) qui doit bénéficier de sa puissance et disposer de cartes de synthèses pour prendre les meilleures décisions. C'est cette finalité qui permet d'employer le terme de système d'information et de donner aux SIG les domaines d'applications suivants [3],[5],:

Pour les grandes échelles :

- La gestion foncière et cadastrale (recensement des propriétés, calcul de surfaces) ,
- La planification urbaine (plan d'occupation des sols et d'aménagement) ,
- La gestion des transports (voies de circulations, signalisation routière) ,
- La gestion des réseaux (assainissement, AEP, gaz, électricité, téléphone ...) ,
- La gestion du patrimoine (espaces verts, parcs, jardins ...) ,
- Les applications topographiques (travaux publics et génie civil) .

Pour les échelles moyennes et petites :

- Les études d'impact (implantation d'un centre commercial ou d'une école)
- Les études d'ingénierie routière (constructions de routes ou d'autoroutes)
- Les applications liées à la sécurité civile (prévention des risques naturels et technologiques).
- La gestion des ressources naturelles (protection de l'environnement, études géologiques, climatologiques ou hydrographiques).

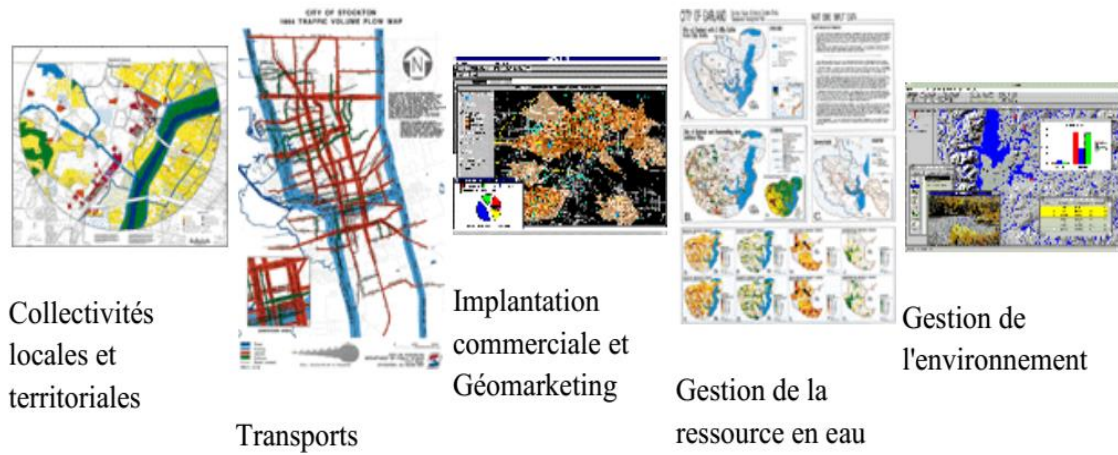


Figure III.16. Domaines d'application des SIG.

III.5.2. Les composants d'un SIG.

Un SIG est constitué de cinq composants majeurs tels que présentés par le schéma ci-dessous: (figure III.17)[52].

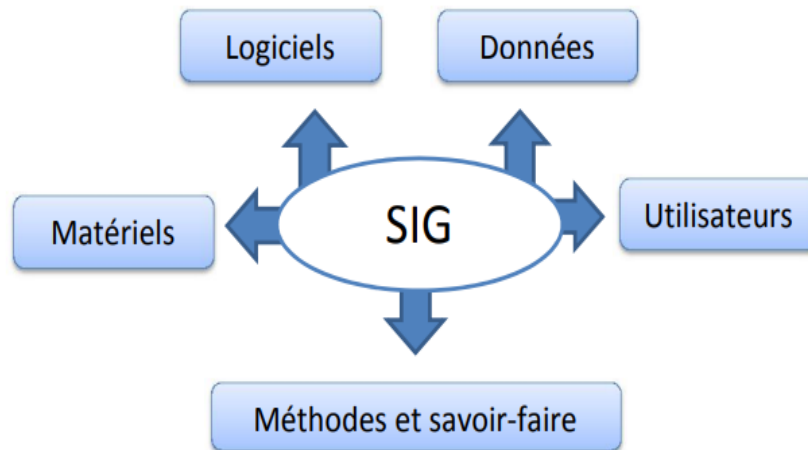


Figure III.17. Les composants d'un SIG.

III.5.3. Quelques exemples.

III.5.3.1. Carte d'occupation du sol.

Aléas et risques géotechniques

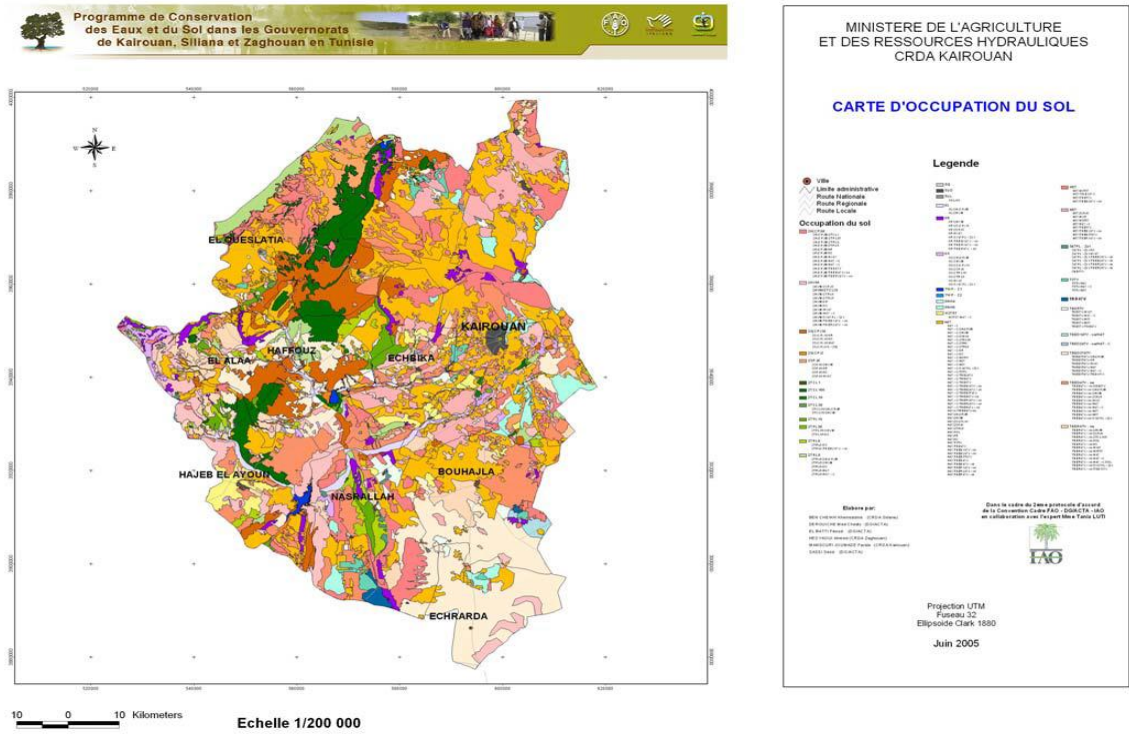


Figure III.18. Carte d'occupation du sol.

III.5.3.2. Carte de gestion des espaces verts d'une ville.

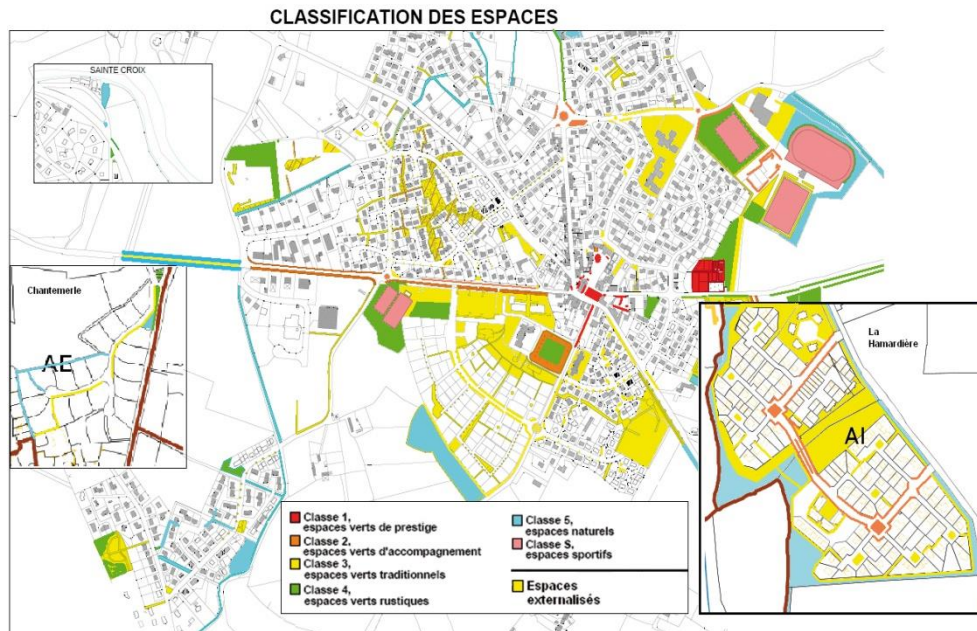


Figure III.19. Carte de gestion des espaces verts d'une ville.

III.5.3.3. Carte de gestion des espaces forestiers.

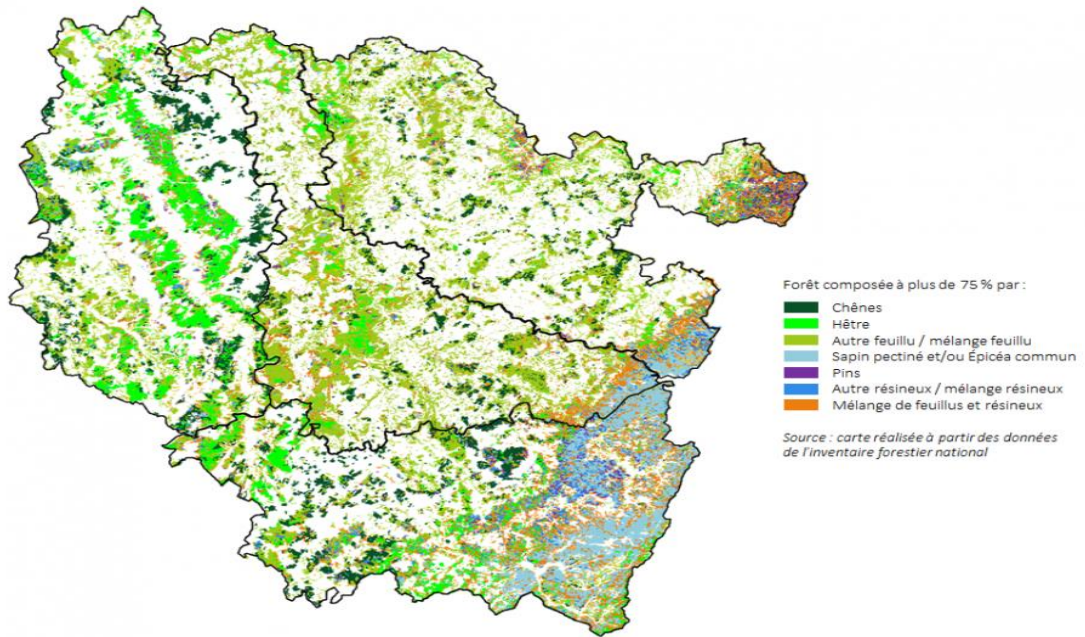


Figure III.20. Carte de gestion des espaces forestiers.

III.5.3.4. Carte de gestion des risques géotechnique.

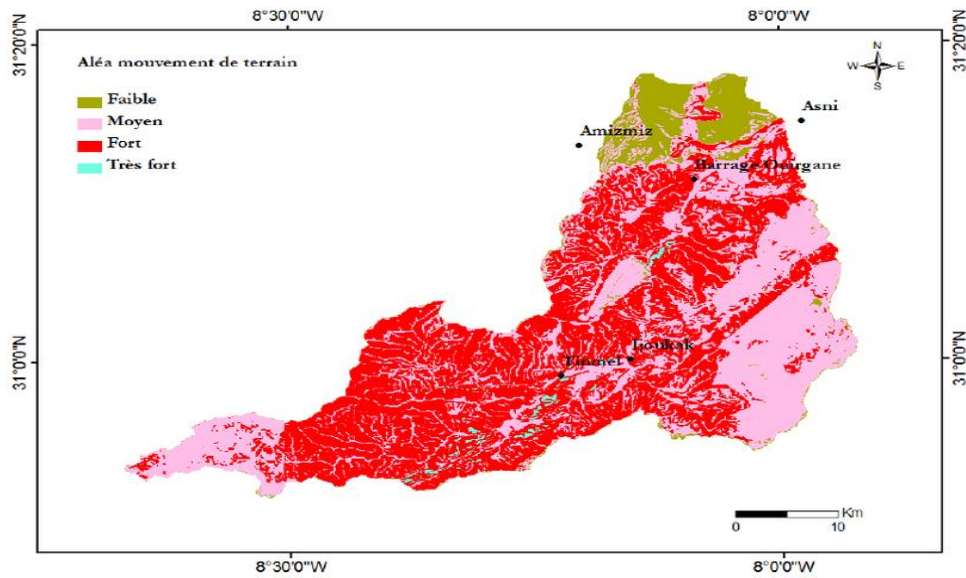


Figure III.21. Carte de gestion des risques géotechnique.

Aléas et risques géotechniques

III.5.3.5. Carte de gestion des risques géotechnique.

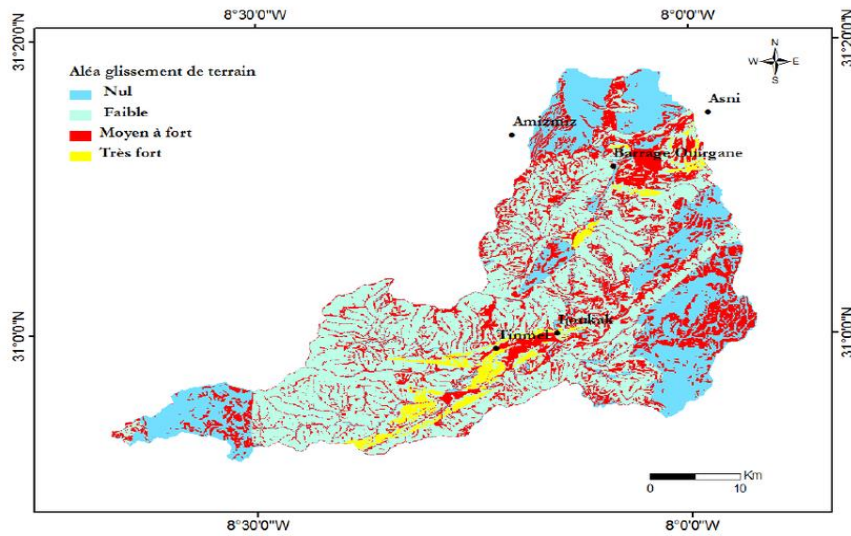


Figure III.22. Carte de gestion des risques géotechnique.

III.5.3.6. Carte de gestion des risques géotechnique.

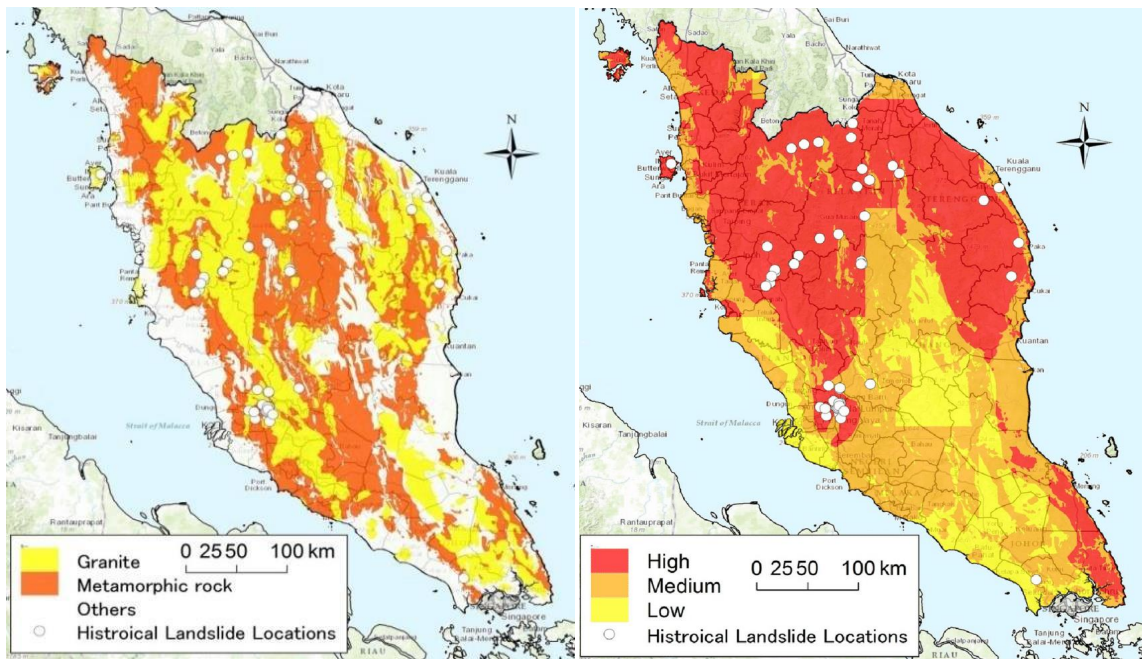


Figure III.23. Carte de gestion des risques géotechnique.

III.6. Conclusion

La télédétection est une technique permettant l’observation du rayonnement diffusé ou émis par la surface de la Terre. La télédétection par satellite permet des observations régulières, répétitives, de la quasi-totalité de la planète, à divers pas d’espace et de temps, dans plusieurs domaines de longueur d’onde. Ces observations traduisent la nature, l’état, la variation spatiale et temporelle des propriétés des objets présents à la surface terrestre. À titre d’exemple, l’étendue des surfaces en eau, la rugosité, l’humidité des sols et leur changement de nature, sont des informations présentes dans ces observations.

IV

Méthodologie d'analyse

et de traitement des données

Méthodologie d'analyse et de traitement des données

IV.1. Introduction.

L'évaluation de l'aléa revient à répondre à ces quatre questions : où, quand, comment et pourquoi le phénomène se produira ? Ainsi, Cela revient à évaluer la probabilité d'occurrence spatiale (susceptibilité: probabilité spatiale qu'un type de phénomène se produise sur un territoire pour différentes conditions environnementales locales), temporelle (période de retour) et de propagation d'un phénomène d'intensité donnée. Cela suppose que tous les phénomènes soient identifiés et classés (inventaire) et qu'ils se (re)produiront selon les mêmes conditions géologiques, géomorphologiques, hydrologiques et climatiques que les phénomènes connus[5].

Cependant, quantifier un niveau d'aléa reste un exercice difficile. En effet, les données nécessaires à une analyse complète et rigoureuse (incluant facteurs de déclenchement, date de déclenchement, âge, etc...) ne sont pas toujours disponibles et/ou insuffisamment détaillées.

IV.2. Notion de base.

IV.2.1. Notion de risque

Un aléa représente un phénomène naturel caractérisé par sa probabilité d'occurrence et l'intensité de sa manifestation. Ces phénomènes naturels sont considérés comme dangereux pour l'homme, l'environnement et les biens. Ces deux notions intègrent la notion de vulnérabilité[4].

IV.2.2. Définition mathématique du risque.

Dans le domaine scientifique et technique, on rencontre deux définitions dans la normalisation internationale (selon la nature du risque) [56]:

▶ **Pour les risques naturels :**

$$R = p(E) \cdot (V \cdot v) \quad (\text{IV.1})$$

$p(E)$: probabilité de l'événement et $(V \cdot v)$: espérance des pertes

V : valeur des enjeux ; v : vulnérabilité des enjeux

▶ **Pour les risques technologiques :**

$$R = p(E) \cdot G \quad (\text{IV.2})$$

G : gravité des conséquences (intensité de l'impact du dysfonctionnement).

IV.2.3. Notion de vulnérabilité.

La vulnérabilité est le degré de pertes causé par un phénomène naturel. Néanmoins, cette définition varie selon l'étude et comme le rappelle Patricia Bouleux, « il y a autant de définitions que d'indices proposés pour l'évaluer »[56].

IV.2.3. Notion de criticité.

Le niveau de risque peut se traduire sur une échelle à 3 niveaux, telle que présentée ci-après :

Zone de risques moindres	Zone de risques à maîtriser Ou intermédiaires « MMR »	Zone de risques élevés « NON »
--------------------------	--	-----------------------------------

Les phénomènes dangereux étudiés peuvent ainsi être comparés en les positionnant sur une grille de criticité [55]:

		Probabilité				
		E (très rare)	D	C	B	A (courant)
Niveau de gravité des conséquences	Désastreux	Désastreux.E <i>Non partiel / MMR 2*</i>	Désastreux.D Non 1	Désastreux.C Non 2	Désastreux.B Non 3	Désastreux.A Non 4
	Catastrophique	Catastrophique.E MMR 1	Catastrophique.D MMR 2*	Catastrophique.C Non 1	Catastrophique.B Non 2	Catastrophique.A Non 3
	Important	Important.E MMR 1	Important.D MMR 1	Important.C MMR 2*	Important.B Non 1	Important.A Non 2
	Sérieux	Sérieux.E	Sérieux.D	Sérieux.C MMR 1	Sérieux.B MMR 2	Sérieux.A Non 1
	Modéré	Modéré.E	Modéré.D	Modéré.C	Modéré.B	Modéré.A MMR 1

Tableau IV.1. Niveau de gravité des conséquences avec la probabilité[55].

IV.2.3.1. Guide de lecture de la grille.

Cette grille délimite trois zones de risque accidentel :

- Une zone de risque élevé, figurée par le mot « NON » ;

- Une zone de risque intermédiaire, figurée par sigle « MMR » (mesures de maîtrise des risques), dans laquelle une démarche d'amélioration continue est particulièrement pertinente, en vue d'atteindre, dans des conditions économiquement acceptables, un niveau de risque aussi bas que possible, compte tenu de l'état des connaissances et des pratiques et de la vulnérabilité de l'environnement de l'installation ; une zone de risque moindre, qui ne comporte ni « NON » ni « MMR »[55].

La gradation des cases « **NON** » ou « **MMR** » en « **rangs** », correspond à un risque croissant : depuis le rang 1 jusqu'au rang 4 pour les cases « **NON** », et depuis le rang 1 jusqu'au rang 2 pour les cases « **MMR** ». Cette gradation correspond à la priorité que l'exploitant doit accorder à la réduction des risques, en s'attachant d'abord à réduire les risques les plus importants (rang élevés)[55].

IV.3. Outils d'évaluation des risques.

La majorité des méthodes d'évaluation classent les risques selon deux axes : l'impact du risque et l'occurrence du risque. La mesure de ces éléments peut être alors exprimée de manière quantitative sous la forme de probabilités, de mesures effectives d'impact ou de manière qualitative souvent exprimée sous la forme d'échelle ordinale (par exemple très élevé, élevé, faible, très faible, etc)[60].

Plusieurs méthodes sont utilisées pour l'évaluation des risques. Néanmoins nous pouvons souligner l'utilisation de matrice des risques ou de l'approche AMDEC qui associe notamment à chaque risque une mesure de criticité qui est le produit entre la probabilité d'occurrence, et l'impact[60] .

IV.3.1 Analyse des Modes de Défaillances (rupture) et de leurs Effets (AMDE)/ et de leur Criticité (AMDEC).

C'est l'outil d'analyse le plus utilisé et l'un des plus efficaces parmi l'ensemble des techniques inductives (on part des causes pour remonter aux effets) disponibles. L'AMDE a été employée pour la première fois dans le domaine de l'industrie aéronautique durant les années 1960. Son utilisation s'est depuis largement répandue à d'autres secteurs industriels. L'AMDEC est l'extension de l'étude AMDE quand il est question d'évaluer la criticité des défaillances.

L'AMDE est une technique fondamentale d'identification et d'analyse de la fréquence des dangers qui analyse tous les modes de défaillances d'un équipement donné et leurs effets tant sur les autres composants que sur le système lui-même.

Cette analyse vise d'abord à identifier l'impact de chaque mode de défaillance des composants d'un système sur ses diverses fonctions et ensuite classer ces modes de défaillances en fonction de leur facilité de détection et de traitement. L'AMDE(C) traite des aspects détaillés pour démontrer la fiabilité et la sécurité d'un système. Elle contient 4 parties primaires :

1. Identification des modes de défaillance ;
2. Identification des causes potentielles de chaque mode ;
3. Estimation des effets engendrés ;
4. S'il s'agit d'une AMDEC : Evaluation de la criticité de ces effets ;

L'analyse commence toujours par l'identification des défaillances potentielles des modes opérationnels. Elle se poursuit, par des inductions afin d'identifier les effets potentiels de ces défaillances (situation dangereuse, événement dangereux et dommages). Une fois les effets potentiels établis, on estime le risque on spécifie les actions de contrôle[56].

En général on construit le tableau de pondération adapté au problème à étudier. Souvent on utilise une notation allant de 1 à 10, tableau ci-dessous

On évalue la criticité par le produit :

$$C = F \times G \times D \quad (II.3)$$

G : gravité des conséquences ;

F : Probabilité d'apparition ;

D : Note,

Plus « C » est grand, plus le problème est critique.

Note F	Probabilité d'apparition	Note G	Gravité	Note D	Probabilité de non-détection
10	Permanent	10	Mort d'homme	10	Aucune probabilité de détection
5	Fréquent	5	Conséquences financières et/ou matérielles	5	Un système de détection est en place mais n'est pas infaillible
1	Rare	1	Pas grave	1	Le système de détection est infaillible

Tableau IV.2. Niveau de gravité avec la probabilité[55]

IV.3.2. La méthode matricielle ou criticité.

Les matrices de risques sont probablement les outils les plus utilisés pour l'évaluation des risques. En général, les matrices permettent d'obtenir une classification homogène des risques. Une matrice de

risques doit être quantitative, il s’agit d’évaluer le risque en chiffre. La quantification du risque repose sur différents paramètres dont les principaux sont : la mesure de probabilité d’occurrence d’un événement et la mesure de ses conséquences. Tout d’abord il faut identifier un certain nombre de scénarios de risques. Pour chacune des conséquences du scénario étudié, la gravité et la probabilité seront évalués de façon croissante. La détermination de l’aléa nécessite l’observation sur site des paramètres permettant la détermination de la sensibilité, de l’activité, et de l’intensité dans chacune des zones étudiées.

Cette méthode repose sur une représentation matricielle qui consiste à placer un point dans une zone de risque, zone que l’on retiendra comme résultat quantité de l’évaluation, la zone est le produit de la valeur probabilité d’occurrence (aléa) par la valeur gravité ou impact (vulnérabilité). Une matrice, conçue selon ce principe de base, est une représentation de la combinaison de l’aléa et de la vulnérabilité.

Le tableau IV.3 représente un exemple d’une matrice de gravité des risques, elle est basée sur l’expérience et le jugement de l’équipe multidisciplinaire [55].

PROBABILITÉ	Très élevée	5	10	15	20	25
	Élevée	4	8	12	16	20
	Modérée	3	6	9	12	15
	Faible	2	4	6	8	10
	Très faible	1	2	3	4	5
		Très faible	Faible	Modéré	Élevé	Très élevé
		IMPACT				

Tableau IV.3. Exemple de matrice de la gravité des risques[55].

La matrice comprend quatre zones des risques d’où les risques des zones supérieures ont des priorités plus élevés que les risques situés dans les zones inférieures. Plus le niveau de probabilité est élevé plus l’occurrence de l’événement de risque est plus probable, plus le niveau de probabilité est bas, moins l’occurrence de l’événement de risque est probable. Les matrices de risques ou matrices de criticité sont établies à partir d’échelles de gravité et de conséquences, lesquelles reposent sur une gestion rigoureuse de l’historique des risques (rapport, traitement statistique, etc.)[56].

En générale, chaque secteur d’activité a conçu des référentiels métiers qui permettent de quantifier de façon homogène les différents risques.

Risque de niveau 1	Rare	< 10%	Événement risquant de se produire uniquement dans des cas exceptionnels
Risque de niveau 2	Peu probable	10-30%	Événement risquant de se produire à un moment donné
Risque de niveau 3	Possible	30-50%	Événement devant se produire à un moment donné
Risque de niveau 4	Probable	50-90	Événement probable dans la plupart des cas
Risque de niveau 5	Quasiment	> 90%	Événement probable dans la plupart des cas

Tableau IV.4. Exemple de classes de probabilité.

IV.3.3 La méthode de simulation de Monte Carlo.

Le processus de Monte Carlo est appliqué au management de risque , c'est un modèle qui s'applique pour le systèmes complexes et présente une série de distributions de probabilité pour les risques potentiels, d'un échantillon aléatoire de ces distributions, puis permet de transformer ces chiffres en informations utiles qui reflètent la quantification du risque potentiel d'une situation du monde réel. Bien que souvent utilisé dans des applications techniques (Par exemple, les performances du circuit intégré, réponse structurelle à un tremblement de terre), des simulations de Monte Carlo ont été utilisées pour estimer les risques dans la conception de centres de service[21].

IV.3.4. Nœud papillon ou la méthode du diagramme causes conséquences.

Le « Nœud Papillon » est une approche arborescente développée par SHELL. Il permet de considérer une approche probabiliste dans le management du risque.

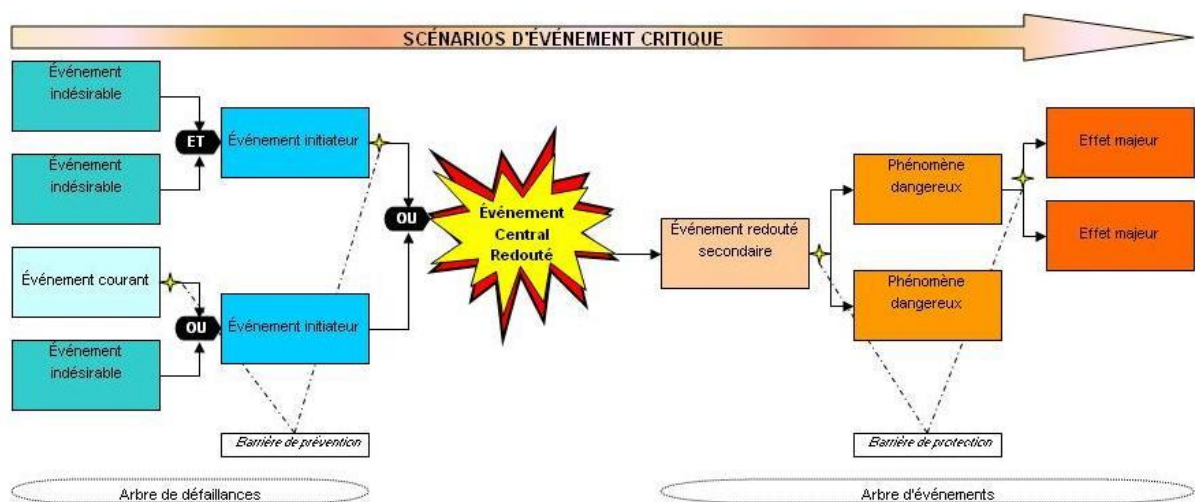


Figure IV.1. Principe de la méthode du Nœuds papillon.

Méthode d'évaluation de la probabilité d'occurrence En l'absence de données bibliographiques sur la probabilité d'occurrence du phénomène dangereux redouté, l'évaluation de cette dernière s'effectue à l'aide d'une approche semi quantitative par barrières, décomposée en plusieurs étapes [21]:

1. Elaboration d'un nœud papillon,
2. Combinaison d'un arbre des causes (en amont de l'évènement redouté central) et d'un arbre des conséquences (en aval de l'évènement redouté central),
3. Estimation de la probabilité d'occurrence du phénomène dangereux redouté et de ses conséquences sur les tiers en tenant compte : des indices de fréquence des événements initiateurs de l'arbre des causes ou de l'indice de fréquence de l'évènement redouté central lorsqu'il est disponible, du niveau de confiance des mesures de maîtrise des risques identifiées (mesures de prévention ou de protection).

Le nœud papillon ainsi construit permet :

- a) De réaliser une analyse fonctionnelle des événements initiateurs à l'origine de l'évènement redouté central étudié (scénario),
- b) De réaliser une analyse fonctionnelle des phénomènes dangereux et effets majeurs de l'évènement redouté central étudié (conséquences situées à droite de l'évènement redouté central),
- c) D'identifier l'ensemble des mesures de maîtrise des risques existant actuellement sur le site, qu'il s'agisse de mesures de prévention (à gauche de l'évènement redouté) ou de protection et d'intervention (à droite de l'évènement redouté),
- d) De mettre en évidence les éventuelles mesures de maîtrise des risques complémentaires qui pourraient être mise en place pour réduire le niveau de risque, et le rendre acceptable, et qui seront exploitées dans la suite de l'étude.

Au niveau du nœud papillon, les événements redoutés apparaissent dans des rectangles et s'enchaînent par l'intermédiaire de portes logiques « OU » et « ET ». Le niveau de probabilité des événements considérés apparaît sous la forme d'une lettre comprise entre A et E dans un coin du rectangle « événement » ; ces lettres font référence à la grille présentée ci-avant, à savoir [4] :

Niveau de probabilité	A	B	C	D	E
	$10^{-2} \leq P$	$10^{-3} \leq P < 10^{-2}$	$10^{-4} \leq P < 10^{-3}$	$10^{-5} \leq P < 10^{-4}$	$P < 10^{-5}$

Tableau IV.5. Cotation des niveaux de probabilité d'occurrence .

L'indice de probabilité E représente la possibilité d'occurrence la plus faible de l'événement considéré ; inversement, l'indice de probabilité A représente la possibilité d'occurrence la plus haute de l'événement considéré. Les mesures de maîtrise des risques apparaissent sous la forme de traits de couleur permettant de faire la distinction entre les mesures de prévention de type organisationnel, les mesures de prévention technique et les mesures de protection /intervention[55].

IV.3.5. Méthode ALARP.

Les méthodes ALARP (As Low As Reasonably Practicable = aussi faible que raisonnablement réalisable) d'analyse de risque sont basées sur le principe des courbes de Farmer 1967. Farmer [4] 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[55].

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

- 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.

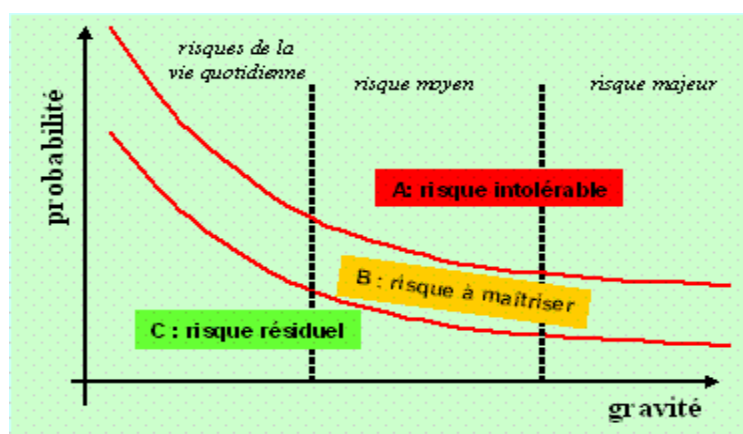


Figure IV.2. Diagramme de Farmer (gravité – probabilité).

La figure ci-dessous reproduit le même graphique avec des échelles logarithmiques pour le cas de risque dans un tunnel. Les limites entre les trois domaines sont définies par des relations de la forme [60]:

$$F = k \cdot N^{-a} \quad (\text{II.4})$$

a : aversion (plus ce facteur est élevé plus les pentes des droites sont élevées)

k : coefficient lié au niveau de vie (pays développés k = 5)

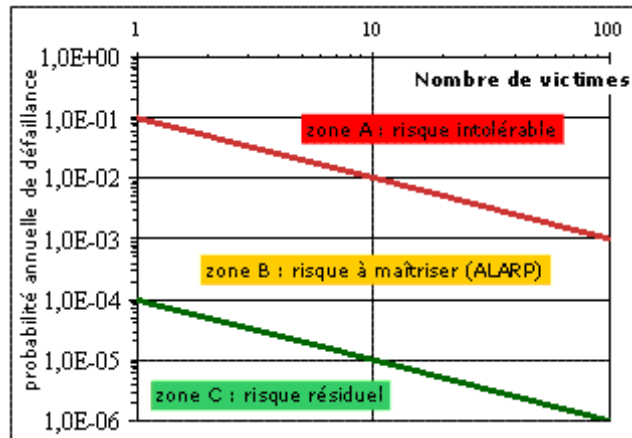


Figure IV.3. Exemple de diagramme ALARP, reliant la probabilité d'accident pour 1 km de tunnel au nombre de victimes, d'après Knoflach[.]

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

$$N = A F \cdot k$$

Où k est d'autant plus élevé (donc la droite inclinée) que l'aversion sociale aux désastres est élevée.

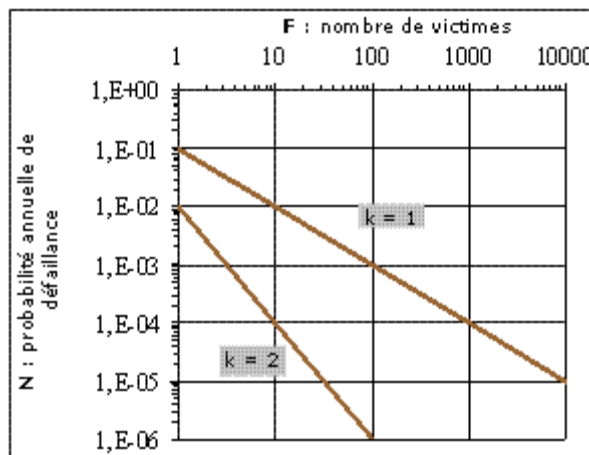


Figure IV.4. Limites ALARP : influence de l'aversion au risque.

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

Mme Dr. Boutahir Bencheikh M

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 [56].

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 .

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. 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 ($2 \cdot 10^{-4}/\text{an}$), pour le passager ($2 \cdot 10^{-5}/\text{an}$) ou pour l'usager du pont ($2 \cdot 10^{-6}/\text{an}$). On retrouve ici le poids du caractère plus ou moins volontaire de l'activité [56].

IV.4. 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[56] :

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.

IV.4.1. 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[32].

IV.4.2. 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 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.

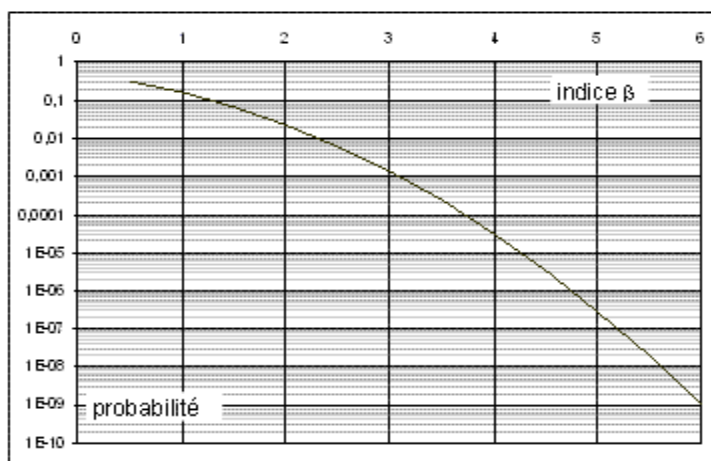


Figure IV.5. Graphique reliant la probabilité à la valeur de l'indice de fiabilité β [55].

Le tableau suivant regroupe des valeurs proposées pour l'indice de fiabilité et donc pour la valeur de la β probabilité cible correspondante. La probabilité cible y est adaptée à la nature de l'ouvrage, et donc à la valeur des enjeux[32].

		<i>type de défaillance</i>			
		service	rupture ductile de systèmes redondants avec réserve de résistance	rupture ductile sans réserve de résistance	rupture fragile de systèmes non redondants
<i>conséquences</i>	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	02/05/08	03/05/08	01/04/00
	importantes ex : ponts, théâtres	02/05/08	01/03/00	04/05/08	01/05/00
	majeures ex : centrales, barrages	01/03/00	01/04/00	01/05/00	01/06/00

Tableau IV.6. Valeurs de l'indice de fiabilité en fonction du mode de défaillance et de la nature des enjeux[33].

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 »[5].

- 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[4].

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 suspenste 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 suspenste. 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[22].

IV.5. Prévention et réduction des risques géotechniques.

La prévention des risques est une phase de la gestion intégrale des risques englobant l'ensemble des mesures destinées à réduire la vulnérabilité; c'est-à-dire d'éviter les dangers ou en tout cas d'en diminuer les effets.

IV.5.1. Parades contre les glissements.

Face à un risque de glissements de terrain, une première solution consiste à s'affranchir des mouvements de la pente instable sans les empêcher. Deux types de solutions ont possibles [57]:

- Implanter ou déplacer l'ouvrage d'art ou la route en dehors de la zone en mouvement, dans un secteur reconnu comme stable ;
- Concevoir l'ouvrage de telle sorte qu'il ne soit pas endommagé par les mouvements : soit en résistant aux efforts apportés par le glissement de terrain (solution réservée aux petits glissements), soit en adaptant le mode de construction de sorte que les fondations soient dissociées du sol en mouvement.

Si ce type de solution n'est pas retenu, on est amené à conforter le talus avec l'une des systèmes de parades présentées dans la figure IV.5 ci après. Dans cette étude, on propose une classification des systèmes de parades, basée sur leurs définitions, et leurs types d'approches : douce et dure[57].

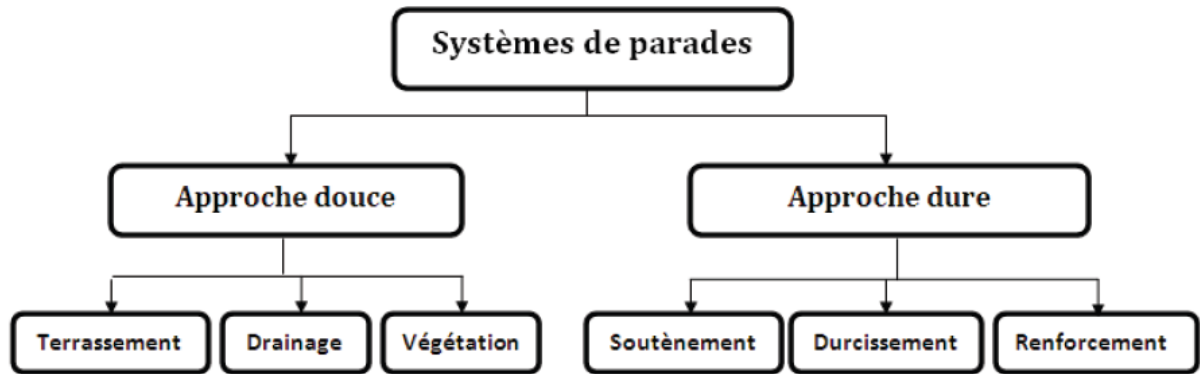


Figure IV.6. Système de parades.

- **Approche douce** : Une approche douce se définit par l'utilisation de méthodes naturelles, esthétiques, et qui s'attaque directement aux facteurs d'instabilités. Les systèmes de parades qui utilisent cette approche sont représentés par la figure IV.6.

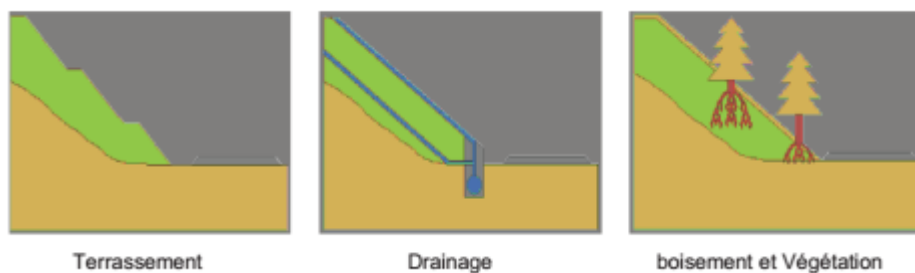


Figure IV.7. Systèmes de parades par approche douce .

- **Approche dure** : Cette approche s'attaque au problème en modifiant, d'une manière directe, les propriétés, mécanique, physique ou chimique du sol. Les systèmes de parades qui utilisent cette approche sont représentés par la figure IV.7.

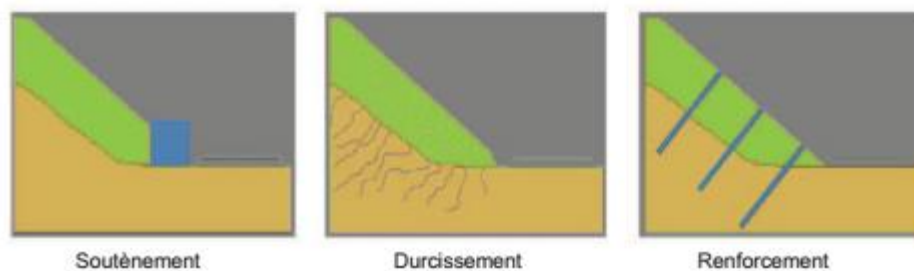


Figure IV.8. Systèmes de parades par approche dure .

IV.5.2. Parades contre les éboulements.

D'après Henri K et al [56], trois solutions qui peuvent être envisagées pour la stabilisation de talus contre le risque d'éboulement :

- Stabiliser la masse rocheuse : Procèdes qui permettent d'assurer l'ancrage optimal au terrain (grillages, filets, béton projeté).
- Implanter des dispositifs de protection : dispositifs permettant d'arrêter les blocs avant qu'ils n'atteignent la zone à protéger (plantation des arbres, piège à cailloux, barrières de protection, ...).
- Purger la masse instable : La purge se fait par un abattage à l'explosif ou l'utilisation du ciment expansif.
- Analyse géologique et morphologique des bassins versants : diagnostic des causes, évaluation des volumes de matériaux mobilisables.



Figure IV.9. Techniques de stabilisation[56].

IV.5.3. *Parades contre les coulées de boue.*

Les dispositifs de protection contre les coulées visent à empêcher le déclenchement du phénomène, réduire son ampleur, le dévier, le canaliser ou l'arrêter avant qu'il n'atteigne les enjeux.

Les processus hydrologiques de ruissellement jouent un rôle primordial dans le déclenchement des phénomènes de coulées : coulées de boue, charriage, ravinement... Afin de lutter contre les phénomènes de coulées, il faut limiter le ruissellement de surface et arrêter/ralentir la propagation des matériaux solides déplacés par les écoulements de surface[59].

Il faut aussi :

- ▶ Favoriser l'infiltration de l'eau afin de diminuer au maximum la formation de ruissellement d'une part, et l'érosion d'autre part par le drainage des sols.
- ▶ Végétalisation des zones exposées au ravinement (permet de protéger les sols, d'intercepter les gouttes de pluies et de limiter la formation du ruissellement).
- ▶ Correction torrentielle.

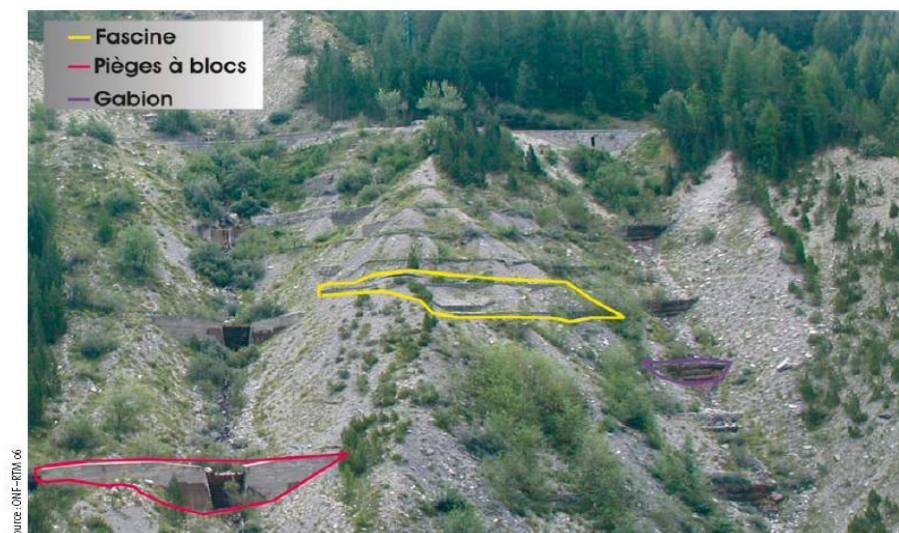


Figure IV.10. Dispositifs de protection contre le ravinement et les charriages torrentiels à Entraunes(Alpes).

IV.5.4. Parades contre les effondrements et affaissements.

Pour se protéger des phénomènes d'affaissement/effondrement, des mesures de confortement des cavités souterraines peuvent être réalisés : remblaiement total ou partiel de la cavité, protection des parois/piliers des cavités souterraines contre l'altération, renforcement par pilier[55].

- Empêcher la baisse du niveau des eaux souterraines ;
- Maîtrise de toutes les infiltrations d'eau ;
- Des études de sols pour mettre des mesures constructives ;
- Stabilisation par comblement partiel ou total des cavités souterraines (remblaiement total, remblaiement partiel, injection par forages) ;
- Renforcement de la structure d'une construction (réalisation de fondations profondes) ;
- Adaptation de la voirie (renforcement de la structure de chaussée par des nappes de géotextiles) ;

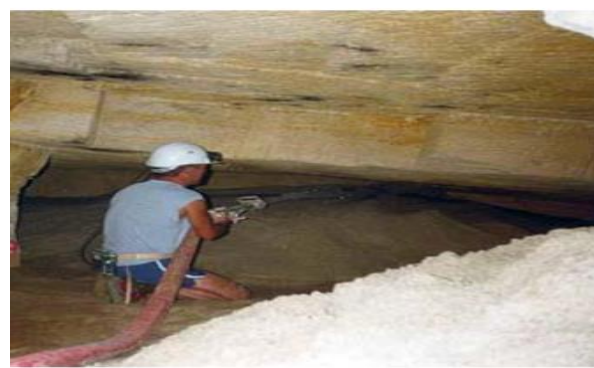


Figure IV.11. Injection d'un mélange de sable et d'eau (facilitant le transport) dans la cavité. Le mur en parainge à pour role de contenir le sable infecté dans la cavité tout en laissant circuler l'eau.



Source : BRGM

Figure IV.12. Renforcement par piliers.



: BRGM

Figure IV.13. Boulonnage du toit .

IV.5.5. Parades contre le retrait – gonflement.

- ▶ Reconnaître et identifier les sols présents au droit de la construction
- ▶ Caractériser leur répartition spatiale et repérer d'éventuelles hétérogénéités verticales et horizontales
- ▶ Identifier la présence éventuelle d'argiles gonflantes et en déterminer le potentiel de retrait et de gonflement en cas de variation des conditions hydriques
- ▶ Repérer l'existence d'éventuels facteurs d'aggravation susceptibles de modifier localement la teneur en eau dans le sol sur la parcelle

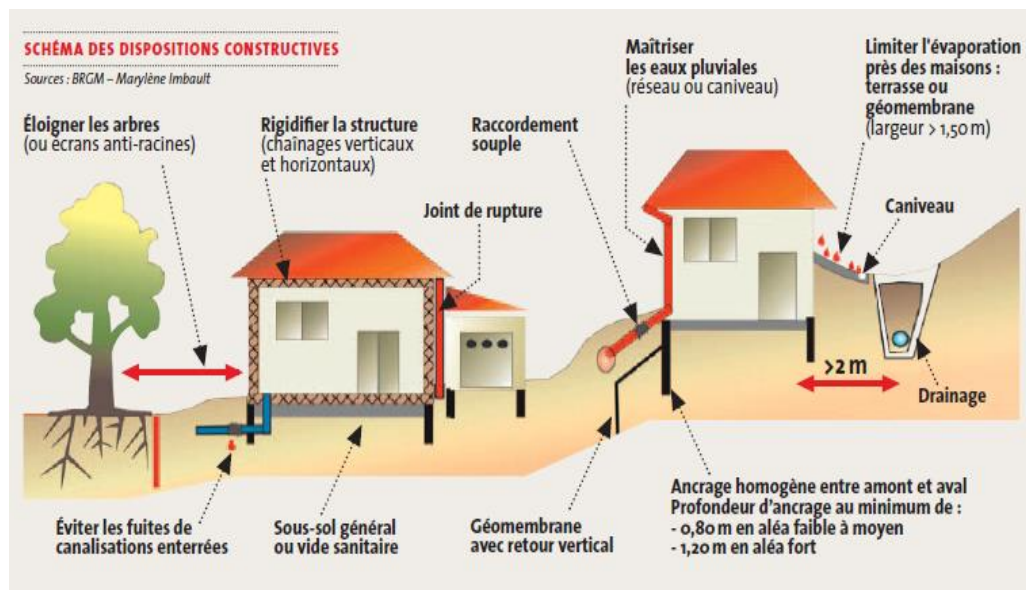


Figure IV.14. Solutions technique pour la lutte contre le retrait – gonflement[55].

IV.6. Nouveaux outils pour une cartographie de terrain.

La cartographie de terrain est une étape indispensable pour la cartographie de l'aléa glissements de terrain ou autre problème d'instabilité mais est très consommatrice de temps. Les outils numériques de saisie d'information spatiale sur le terrain permettent d'améliorer la cartographie et la localisation des phénomènes sur le terrain tout en diminuant le temps imparti à cette étape[56].

La manière de cartographier les glissements, les problèmes des sols et la cartographie géomorphologique ont été révolutionnées par l'utilisation du GPS, permettant une localisation rapide des caractéristiques du paysage et des glissements de terrain avec parfois des précisions dépassant les besoins de l'expert. Les outils de cartographie *in situ*, comme les tablettes avec SIG intégré, facilitent également la cartographie permettant d'améliorer les premières cartes réalisées par télédétection et d'ajouter directement sur le terrain des informations non vectorisées initialement. Récemment des essais de cartographies couplant jumelles électroniques (« rangefinder binocular ») connectées à une tablette et un GPS ont permis de lever à distance une série de glissements de terrain déclenchés par des précipitations pluvieuses. Une comparaison entre deux cartes réalisées, l'une sur le terrain à l'aide d'un GPS, l'autre par simple observation, a montré que les résultats étaient similaires, mettant alors en avant tout le potentiel de cette technologie nouvelle. Le Zeb-revo (laser rotatif léger, GeoSLAM®), largement utilisé pour le zonage des cavités souterraines, pourrait devenir également un outil de cartographie de précision des glissements de terrain. Des tests actuellement sont en cours sur des sites simples d'accès, l'idée étant ensuite de le tester sur des sites plus complexes. Enfin, pour préciser et affiner des cartes de degré d'activité, le développement d'outils de prise d'images de haute qualité, de mesures *in situ* de déplacements et de déformation de surface par appareil low-cost (*e.g.* tag-RFID) émergent et sont actuellement testés sur divers sites[60].

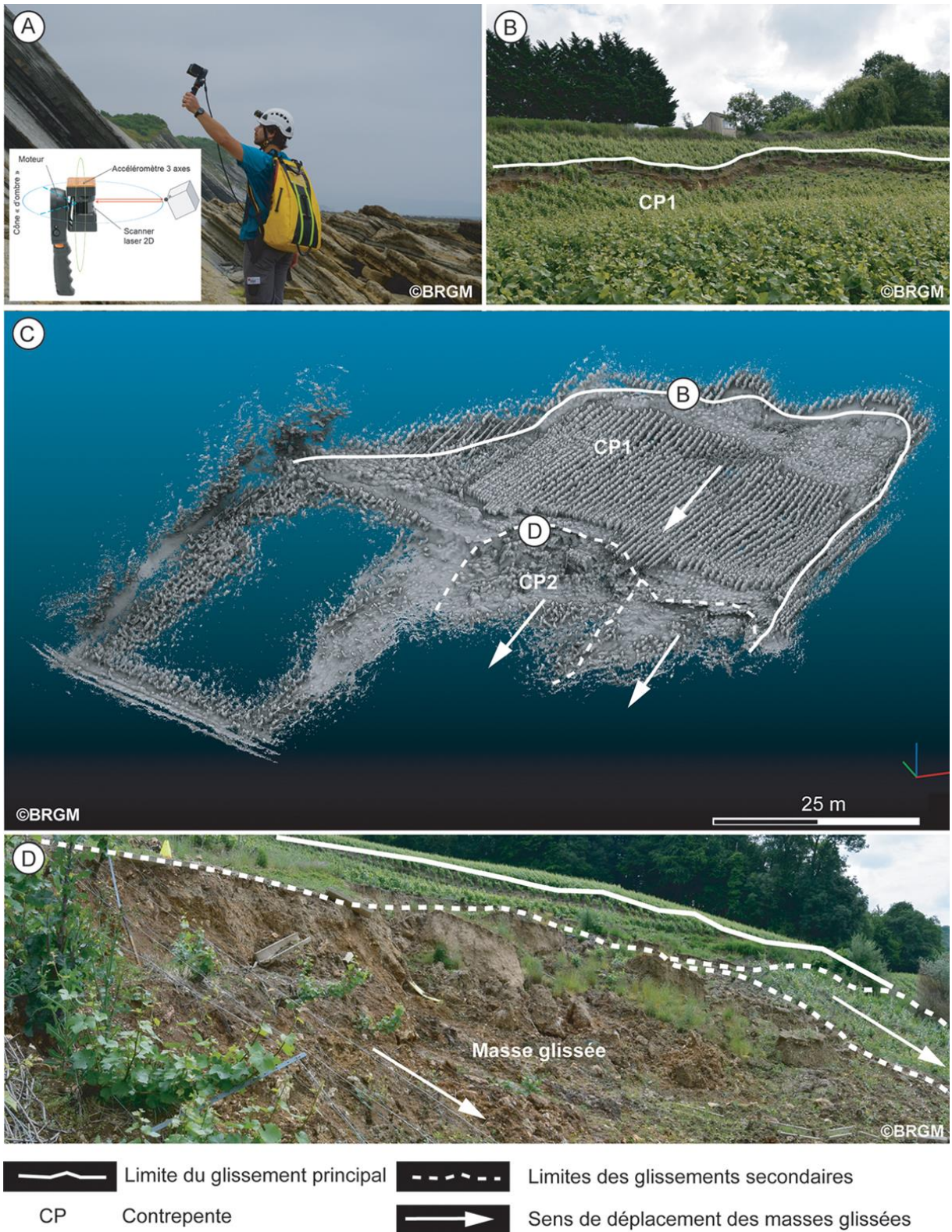


Figure IV.15. Exemple de nuage de points obtenu par ZEB-Revo (scan laser terrestre 3D rotatif léger) pour un glissement de terrain de type rotationnel dans les vignes de Champagne (Commune de Le Mesnil-le Huttier-2018). A. Principes de fonctionnement du Zeb-Revo (lever sur la falaise de Socoa-Pyrénées Atlantique, France). B. Vue sur l'escarpement principal du glissement de terrain. C. Nuage de points et interprétation. D. Vue sur les glissements rotationnels secondaires[60].

IV.6. Conclusion.

Le risque est la combinaison de la probabilité d'occurrence et l'impact. Nous ne pouvons pas le mesurer directement à l'aide d'un instrument, mais nous pouvons mesurer l'ampleur du phénomène. Il est nécessaire, avant de porter la démarche de management des risques, de présenter les différentes méthodes de l'étude de risque.

L'évaluation des risques qui peut se faire sous différentes méthodes dont la méthode matricielle, l'analyse des modes de défaillances et de leurs effets/et leur criticité et la méthode des nœuds papillon ainsi la simulation par SIG et GPS. Le développement des stratégies de réponses permet de réduire les dommages possibles et le contrôle des stratégies de réponse aux risques met en œuvre cette stratégie et modifie le plan en fonction des nouveaux risques.

.

V

Systemes d'alerte et de

gestion des situations de crise

Systèmes d'alerte et de gestion des situations de crise

V.1. Introduction à la gestion des catastrophes.

La gestion des risques comprend l'évaluation des risques et leur analyse, ainsi que la mise en œuvre de stratégies et d'actions spécifiques pour les contrôler, les réduire et les transférer. Elle est largement pratiquée par des organisations afin de minimiser les risques dans les décisions d'investissement et traite d'opérations tels que l'interruption des activités, des arrêts de production, les dommages environnementaux, les impacts sociaux et les dommages causés par le feu et les risques naturels. La gestion des risques est une question essentielle pour des secteurs tels, l'énergie et l'agriculture dont la production est directement touchée par des phénomènes météorologiques et climatiques[11].

Dans le cadre de ce chapitre, nous essayerons de lever certaines ambiguïtés relatives aux activités relevant du management des risques. Nous suivrons la démarche adoptée pour la maîtrise des risques, c'est-à-dire définition, explication en vue d'une meilleure compréhension des notions de management, identification, évaluation, des stratégies de réponse et contrôle des risques[4].

V.2. Cycle de Gestion des Catastrophes.

La gestion des catastrophes est un processus cyclique. La fin d'une phase constitue le début d'une autre (cf. diagramme ci-dessous), même si une phase du cycle ne doit pas nécessairement s'achever pour laisser la place à une autre. Souvent, plusieurs phases ont lieu simultanément. La prise de décision au bon moment durant chaque phase entraîne une meilleure préparation, les meilleures alertes, une vulnérabilité réduite et/ou la prévention des catastrophes à venir. Le cycle complet de gestion des catastrophes couvre la mise en forme des lignes directrices et des plans de l'État qui résout les causes des catastrophes ou atténue leurs effets sur la population, les biens et l'infrastructure[65].

L'ensemble le plus commun de processus inclurait l'identification des risques, l'évaluation, le traitement et le suivi. La figure V.1 présente un processus de gestion des risques simple.

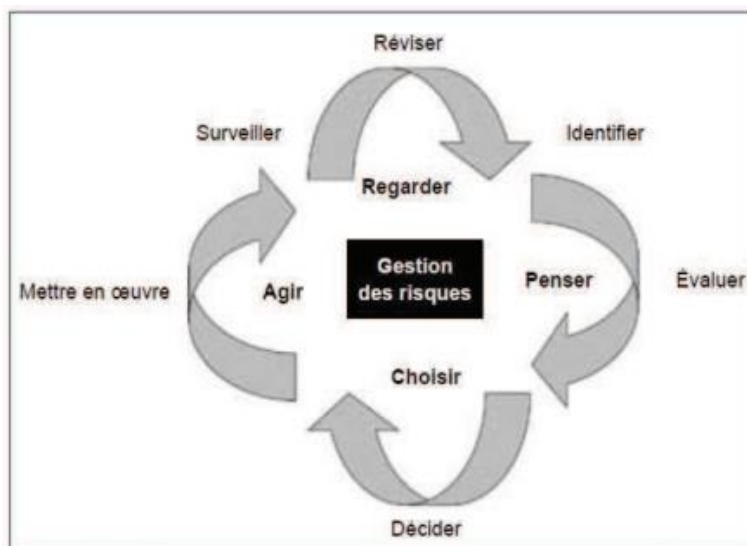


Figure V.1 Processus de gestion des risques simples[4].

V.3. Plan de réduction des risques (Risk Management Plan-RMP).

De nombreux et récents cas dans le monde ont démontré que la gestion du risque peut être améliorée énormément par l'utilisation systématique et préalable des techniques de risk management pendant l'étude ; plus son utilisation est mise en œuvre rapidement dès le début de l'étude, plus les résultats sont appréciables. L'activation du système de gestion du risque assure une identification rapide des problèmes potentiels, la mise en œuvre de mesures appropriées de réduction du risque et le contrôle et la répartition des risques résiduels entre les différentes parties qui prennent part au projet[8].

L'objectif est donc de minimiser le plus possible tous les risques identifiés à chaque phase de l'étude et de la construction, selon les informations disponibles et les décisions qui doivent être prises et de mettre en œuvre, pendant la réalisation, les mesures de réduction du risque déterminées préventivement.

Le RMP doit être intégré dans chaque phase du projet (étude, appel d'offres, contrat, construction, exploitation) et doit impliquer dans le processus toutes les parties appelées en cause, pour éviter ou réduire les risques et répartir les responsabilités. Dans ce sens, l'approche d'un groupe qui incorpore différentes disciplines et perspectives est fondamentale. De plus, il est essentiel que tous les « acteurs » soient représentés : maître d'ouvrage, maître d'œuvre, bureau d'études, entreprise de construction.

Les différentes stratégies (Processus) de réponse aux risques peuvent être classées selon [22]:

- **Réduction des risques** : La réduction des risques est l'ensemble des actions entreprises en vue de minimiser l'impact du risque (protection) et de limiter la probabilité de réalisation du risque (prévention) ou les deux en même temps.

***Protection** : technique visant à limiter l'étendue et/ou la gravité des conséquences d'un accident sur les cibles vulnérables. Pour cela on peut soit renforcer la défense des cibles, soit réduire la dangerosité des sources de danger.

***Prévention** : Ensemble de méthodes, de techniques et de mesures prises en vue de réduire la probabilité qu'un événement redouté ne se produise. Ces méthodes relèvent de la surveillance, la formation, la réglementation, la répartition des responsabilités, etc.

- **Évitement des risques** : certains risques peut être réduits par les stratégies de prévention et/ou protection, mais d'autres risques peuvent toujours se produire. Dans ces cas, la gestion des risques doit être dirigé pour trouver des moyens permettant d'éviter les risques, soit en modifiant le plans de projet, soit en utilisant une technologie alternative, etc. Ça pourrait aussi concerner la réduction des temps d'exposition et la multiplication des possibilités d'évitement des situations dangereuses. Cette stratégie consiste à accomplir les actions permettant d'éviter la situation qui génère le risque[70].
- **Transfert des risques** : transférer le risque ne veut pas dire le changer. Cette stratégie comporte presque toujours un prix. Les contrats à forfait sont l'exemple classique de transfert du risque à partir d'un propriétaire à un entrepreneur. Avant de décider pour le transfert du risque le propriétaire doit décider quel parti peut contrôler plus les activités qui mèneraient à la survenance du risque. La faible probabilité des risques élevés doit être définie pour pouvoir les transférer (les assurer).

L'assurance est essentiellement l'un des moyens de contrôle du risque, elle est un mécanisme de transfert contractuel des risques. Aussi, les garanties de bonne exécution et les garanties en général sont d'autres instruments financiers utilisés pour transférer les risques.

- **Partage des risques** : Certains risques peuvent être transférés, et d'autres risques peuvent être partagés. Le partage des risques fournit des proportions de risque pour les différentes parties. Le partenariat entre un propriétaire et des entrepreneurs a suscité le développement de procédures d'amélioration continue à encourager les entrepreneurs à proposer des moyens innovants pour la mise en œuvre du projet.
- **Acceptation du risque** : certain risques sont tellement importants qu'il n'est pas possible d'envisager de transfère ou de réduire l'événement à risque. Le maitre d'ouvrage assume le risque car la chance pour que l'événement se produise est minimal. Dans d'autres cas les risques identifiés dans la réserve budgétaire peuvent être simplement accepté s'ils se concrétisent. Le risque est retenu par le développement du plan de substitution à mettre en œuvre si le risque se concrétise[55].

Plus les efforts de réponse au risque sont donnés avant le début du projet, plus les chances sont pour réussir le projet.

V.4. Le plan de substitution

Le plan de substitution est un plan de rechange utile quand un risque prévu devient réalité. Le plan de substitution représente des actions préventives qui peuvent réduire l'impact négatif du risque. La négligence de mettre un plan de substitution peut causer au manager un retard ou de reporter la décision d'un recours à mettre en œuvre. La planification d'urgence évalue d'autres recours pour d'éventuelles manifestations prévues avant que l'événement à risque se produit, et sélectionne le meilleur plan parmi les alternatives. La disponibilité d'un plan d'urgence peut augmenter considérablement les chances de succès d'un projet[4].

MATRICE D'ANALYSE DES RISQUES			
ACTIONS A ENTREPRENDRE			
EVENEMENT A RISQUE	PREVENTIVES	STRATEGIES DE REPONSE	PLANS DE SUBSTITUTION
Glissement de terrain	-Cartographie des risques naturels -Plans d'exposition aux risques -Investigation sur les terrains et modélisation	reduction des risques /partage des risques	-Un system de renforcement avec la technique géosynthétique -Renforcement des talus par clouage - Renforcement des talus partirants d'ancrage
Coulée de boue	-Cartographie des risques naturels -Plans d'exposition aux risques -Adoucir la pente et construire un enrochement pour protéger le talus contre l'érosion -Reboisement des zones exposées au ravinement - bassins de rétention des eaux de pluie -Drainage des sols	partage des risques	-Mise en place des techniques pour modifier les comportements -Déblaiement de la chaussée - Remonter les protections
Retrait gonflement	-Cartographie des risques naturels -Plans d'exposition aux risques -Investigation sur les terrains -Traitement du sol (liants hydraulique ou organique) -Maintenir l'équilibre d'humidité -Adaptation les constructions	reduction des risques	
Eboulement	-Cartographie des risques naturels -Plans d'exposition aux risques -Stabiliser la masse rocheuse -Ancrage optimal au terrain (grillage, filets, béton projeté, etc.)	moyens permettant d'éviter les risques	

Affaiss ement/ effondrement	-cartographie des risques naturels -plans d'exposition aux risques -investigation sur les terrains -compactage -adaptation des ouvrages au contexte géologique -drainages des sols -suivi de l'état des cavités	réduction des risques	-Injections des coulis cendres- ciment -Comblement des cavités souterraines -Réparation et renforcement des chaussées
Instabilité des talus de déblais et remblais	-Investigation sur les terrains -Adapter les pentes de talus de remblais et déblais -Drainages des sols -Végétations	Réduction des risques/moye ns permettant d'éviter les risques	Réaliser un système de confortement basé sur l'utilisation des nappes en géosynthétique. -Réalisation d'un remblai stabilisant et un dispositif de drainage adéquat tout en renforçant la structure routière existante. -Construire un contre poids en enrochement pour stabiliser les talus -Mur de soutènement

Tableau V.1. Matrice d'analyse des risques de quelques risques géotechniques [4].

V.4.1. Le contrôle des stratégies de réponse aux risques.

Après avoir sélectionné la stratégie de réponse la plus susceptible d'être efficace pour chaque risque, des actions spécifiques et des plans de réponses doivent être développée pour mettre en œuvre chaque stratégie. Le plan de réponse au risque documente les stratégies convenues pour faire face à chaque risque, donne les détails des mesures prévues de gestion du risque et désigne les personnes responsables de la mise en œuvre des mesures prévues. Pour chaque stratégie de réponse une analyse des coûts et d'avantage doivent être envisagée pour la maîtrise des risques.

Au fur et à mesure que le projet se déroule, le portefeuille des risques potentiels doit être réajusté en fonction des nouvelles informations recueillies. Certains risques pouvant disparaître, d'autres apparaître ou d'autres encore, considérés initialement comme faibles, pouvant devenir rapidement inacceptables pour l'entreprise dès lors qu'ils n'ont pu être maîtrisés, le niveau d'exposition aux risques du projet est amené à changer. C'est pourquoi il est important de procéder périodiquement au suivi et au contrôle des risques encourus, et à la prise en compte de l'évolution de la situation de chaque risque.

On peut distinguer deux éléments différents dans le suivi :

- Le suivi de l'évolution des risques et des actions ,
- La détection du risque : elle s'appuie sur la surveillance des causes des risques et des valeurs des indicateurs.

- L'analyse du résultat des activités de suivi et des rapports qui en découlent pour chacun des risques visés ;
- Le choix d'un mode d'action par rapport à ces nouveaux risques ;
- La mise en œuvre des décisions qui ont été prises à l'égard de chacun des risques.

V.5. Résilience.

La résilience désigne la capacité à “revenir” ou à “rebondir” après un choc. La résilience de la communauté en ce qui concerne les risques potentiels des événements est déterminée dans la mesure où la collectivité a les ressources nécessaires et est capable de s'organiser elle-même avant et pendant les périodes de besoin.

V.5.1. La résilience comme outil de gestion des risques.

La résilience est un outil d'aide stratégique, car il existe un lien entre la vulnérabilité et la résilience : un système plus résilient est moins vulnérable. Or, si la vulnérabilité est un concept négatif, la résilience est un concept dont la connotation est positive. Elle est donc préférée dans de nombreuses études.

Une approche par la résilience favorise la mise en place de nouvelles pratiques pour lutter contre les risques. Les ingénieurs ont privilégié les solutions de résistance face à un risque (par exemple, stabiliser la masse rocheuse pour empêcher un éboulement).

Mettre en place une stratégie de résilience, c'est accepter la catastrophe, mais tout faire pour en réduire les impacts. Plus généralement, pour augmenter la résilience, les acteurs peuvent intervenir sur les actions préventives pour mitiger ou réduire les effets d'un événement à risques.

La notion de résilience s'inscrit donc comme un outil d'aide stratégique au service d'une nouvelle forme de gestion du risque, basée sur le lien existant entre vulnérabilité et résilience et visant à réduire au maximum les impacts de l'aléa[63].

V.5.2. proposition d'une méthode de gestion globale des risques.

Les ouvrages du génie civil ont des particularités qui imposent des méthodes de gestion des risques particulières. Le modèle MADS ou Méthodologie d'Analyse de Dysfonctionnement des Systèmes, est très recommandé dans le contexte du génie civil.

Les projets de construction sont soumis à de nombreux risques, qu'ils soient naturels ou anthropiques. La maîtrise de ces risques est l'un des enjeux importants de la gestion des risques. De nombreux travaux se sont attachés à identifier et évaluer ces risques. Cependant la complexité inhérente aux projets de

construction (multiplicité des acteurs, variété des risques, etc.) rend la gestion globale de ces risques extrêmement difficile. La gestion des risques passe par une bonne appréhension de ceux-ci. Pour cela, il faut nécessairement faire appel à des approches systémiques pour appréhender des événements non souhaités telque [5].

- Représenter les systèmes d'où sont issus (systèmes sources) et sur lesquels (systèmes cibles) s'appliquent les événements non souhaités ;
- Mettre en relation les systèmes source et cible afin de modéliser le processus de danger ;
- Identifier, évaluer, maîtriser, gérer et manager les événements non souhaités dans des systèmes complexes et variés, a priori (prévention) et a posteriori (retour d'expérience).

Dans une optique pragmatique, le danger peut être conçu comme un ensemble de processus potentiels conduisant à un événement non souhaité et pouvant avoir un impact destructeur sur une ou plusieurs cibles. C'est un état d'équilibre métastable dont le facteur de déclenchement éventuel est un événement initiateur qui génère un flux de matière ou d'énergie entre une source et une cible de danger .

Le processus de danger est le modèle de référence que l'on constitue en :

- Représentant de façon générale les systèmes source et cible (représentation de la structure ou du fonctionnement ou de l'évolution interne). Cette phase permet l'acquisition des connaissances sur les systèmes source et cible ;
- Représentant les processus de danger (processus source de danger et processus d'effet du danger);
- Modélisant le processus de danger. Il s'agit de relier les processus sources de danger aux processus susceptible d'être affectés au niveau de la cible du danger. La liaison s'opère en modélisant un flux de danger, liaison orientée source-cible. Cette représentation est immergée dans un champ de danger, tapissé de processus qui peuvent influencer l'état du système source, des processus sources du danger, du flux mais aussi du système cible.

V.5.3. Le flux de danger.

Le flux de danger peut être constitué d'énergie, de matière ou d'information. Il est généré par un événement (ou processus) initiateur d'origine interne ou externe. Ceci se déroule en plusieurs phases, d'abord l'occurrence d'un facteur de déclenchement (événement initiateur) qui génère un flux de danger entre les constituants du système global faisant de l'un d'eux une source et d'un autre une cible de danger. La figure V.2. illustre les modes de représentation.

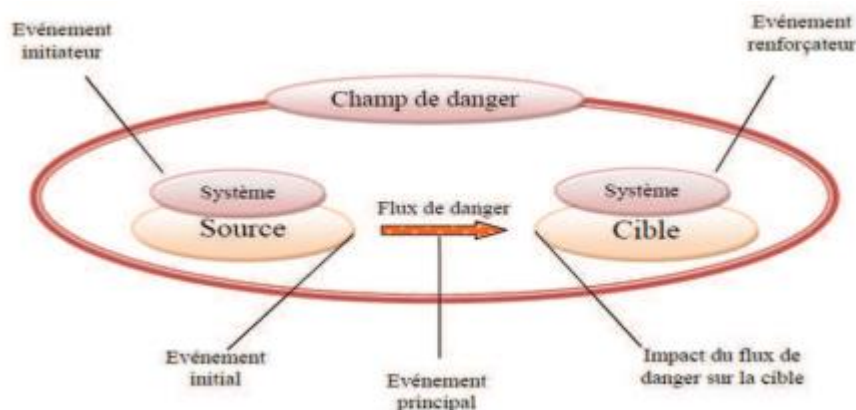


Figure V.2. Processus de danger du modèle MADS[22].

Ce modèle est complètement transposable à un système global de gestion des risques. C'est vers le système cible que toute la stratégie de sécurité sera orientée. Le système source repose sur l'ensemble des risques définis et inventoriés après recensement ou analyse. Donc, cette méthodologie d'analyse de dysfonctionnement des systèmes (MADS) consiste à identifier, analyser, maîtriser, gérer et manager des événements non souhaités :

- L'identification des événements non souhaités consiste à les localiser au niveau du processus de danger ;
- L'analyse des événements non souhaités consiste à effectuer une analyse de risque à l'aide d'outils identifiés (probabilité, gravité).
- La maîtrise des événements non souhaités consiste à agir pour diminuer la probabilité d'occurrence ainsi que la gravité (au niveau du système source, c'est la prévention ; au niveau du flux de danger avant son effet sur la cible ou au niveau de la cible elle-même, c'est la protection); Gérer, manager des événements non souhaités dans le processus de danger, consiste à réfléchir aux actions à mettre en place pour augmenter l'efficacité de l'identification, de l'analyse et de la maîtrise des processus de danger.

La mise en œuvre pratique de MADS a été formalisée dans une méthode appelée MOSAR, méthode d'analyse des risques dont les objectifs sont d'identifier, d'évaluer et de maîtriser a priori les risques. Cette méthode nécessite une négociation des objectifs par les acteurs concernés, elle a vocation à intégrer les réglementations spécifiques sans s'en contenter. Elle peut être mise en œuvre selon une approche déterministe ou, quand c'est possible, une approche probabiliste. Par nature, elle met en œuvre des concepts logiques, systématiques et systémiques. Elle a recours aux outils classiques (matrice, tableaux de référence, etc.).

La méthode MOSAR contient deux modules hiérarchiques, un module macro « module A » et un module micro « module B ».

Le module 'A' a pour but d'identifier les dysfonctionnements techniques et opératoires provoquant un événement indésirable. Les scénarios d'accident sont examinés d'une manière macroscopique, autrement dit, sans traiter en détail des aspects fonctionnels du système et de ses interfaces. Principalement le module 'A' se décompose en 5 étapes (figure V.3):

1. Modélisation de l'installation ;
2. Identification des sources de danger et des scénarios d'accident ;
3. Evaluation des scénarios de risque ;
4. Négociation des objectifs ;
5. Définition des moyens de maîtrise des risques[6].

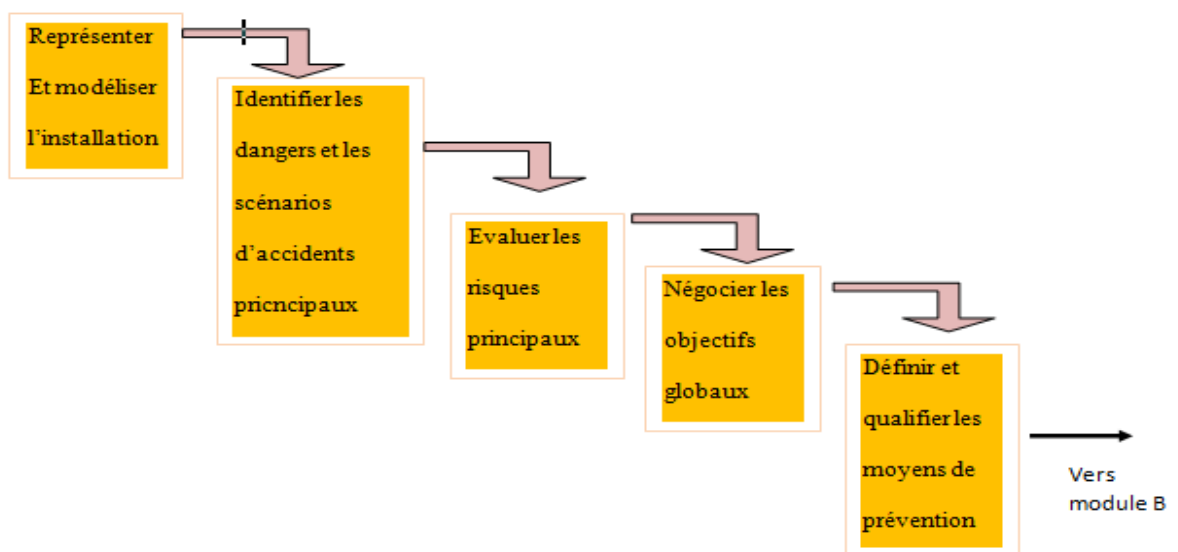


Figure V.3. Structure simplifiée de MOSAR module 'A'.

Le module 'A' s'appuie essentiellement sur modèle MADS dans la phase d'identification des sources, flux et cibles de dangers ainsi que les différents événements du processus de danger. Le module 'B' de la méthode MOSAR qui se présente d'ailleurs comme une suite logique du module 'A'. il permet d'effectuer une analyse plus détaillée des dysfonctionnements techniques et opératoires et aussi de l'impact qu'ils pourraient engendrer sur le système global. Ce module se décompose en 5 étapes (figure V.4).

1. Identification des risques de dysfonctionnement ;
2. Evaluation des risques en constituant des arbres de défaillances ;
3. Négociation des objectifs précis de maîtrise des risques ;
4. Définir les moyens de prévention complémentaires ;
5. Gérer les risques.

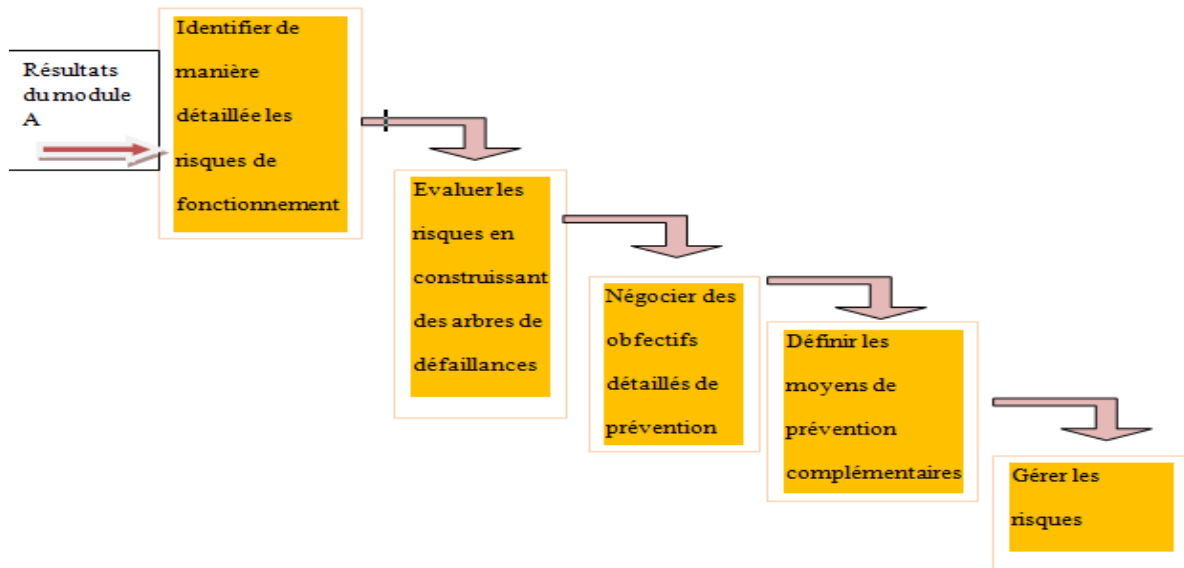


Figure V.4 Structure simplifiée de MOSAR module 'B'.

V.5.4. Résilience des risques naturels.

Les risques naturels tels que les mouvements de terrain ont un impact négatif sur les projets. On a vu dans le premier chapitre que les mouvements de terrain sont très variés par leur nature (glissements de terrains, éboulements, coulées de boues, effondrements, affaissements, gonflement ou retrait des sols) et par leurs dimensions (certains glissements peuvent atteindre plusieurs dizaines de millions de m³).

Afin de prévenir et protéger les infrastructures routières contre ces événements, des mesures sont mises en œuvre pour réduire les vulnérabilités. Des mesures préventives à long terme contre ces risques sont nécessaires en mettant en place une cartographie et une surveillance des risques afin de donner une vision globale des risques encourus. Aussi, il est nécessaire de mettre en œuvre des mesures de protection ou de diminution de la vulnérabilité afin de minimiser les conséquences négatives de ces risques. Une approche de la résilience des risques naturels peut être illustrée par la figure V.5 suivante :



Figure V.5. Résilience des risques naturels.

V.5.4.1. Prévenir la survenue d'un événement à risque.

Cette capacité repose d'une part, sur l'identification de la survenue d'un événement à risque et d'autre part sur l'aptitude à apprendre correctement du passé afin de définir les mesures de prévention.

V.5.4.1.1. La cartographie.

L'outil de cartographie constitue la première étape du plan global de gestion. La cartographie permet l'acquisition d'une connaissance détaillée du territoire, laquelle rend possible la réalisation d'interventions prévues aux autres niveaux du cadre de gestion des risques.

La cartographie est donc un outil qui permet d'estimer, dans un premier temps, la probabilité d'occurrence d'un phénomène donné en un endroit donné. Elle vise à délimiter les zones pouvant être exposées au risque naturel par une approche probabiliste (ou déterministe) basée sur une analyse fréquentielle de l'aléa. Elle s'appuie sur des analyses d'archives, des enquêtes de terrain, des études diverses hydrogéologiques, géotechniques, géologiques, afin de mieux connaître le risque et de le cartographier.

Dans le domaine des mouvements de terrain, le zonage cartographique d'aléa repose, de façon plus ou moins explicite, sur la méthode dite des facteurs de prédisposition. La prédisposition du site, en général évaluée sous forme qualitative, est considérée comme maximale lorsque tous les facteurs défavorables (pente, nature lithologique, régime hydrogéologique, etc.) sont présents ; elle est considérée comme nulle ou négligeable si aucun n'est présent.

Nous présentons des exemples de l'outil cartographique utilisés en Algérie pour la prévention des risques naturels en général.

En Algérie, l'outil cartographique est utilisé récemment pour le suivi de l'évolution des risques et pour agir en amont des catastrophes, dont le but de réduire leurs effets et donc pour une meilleure prévention des catastrophes naturelles. La réglementation algérienne exige un dossier cartographique devant être utilisée dans les documents techniques et administratifs et concerne la mise en forme des documents d'urbanisme, des études de « PDAU » et de « POS » et divers actes d'urbanisme.

L'outil cartographique vise à limiter, dans une perspective de développement durable, les conséquences humaines et économiques des catastrophes naturelles dont l'objectif est de :

- Délimiter les zones exposées aux risques en tenant compte de la nature et de l'intensité d'un risque encouru ;
- Délimiter les zones qui ne sont pas directement exposées aux risques ;
- Définir les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde qui doit être prise dans les zones vulnérables.

Cette approche novatrice en Algérie, de la gestion des risques et de prévention des risques naturelles est un outil important pour le développement durable du pays[22].

V.5.4.1.2. La surveillance.

Cette mesure de prévention a pour but d'avertir ou d'alerter du danger sans s'opposer au phénomène proprement dit. Elle fait appel à des techniques de surveillance et d'alerte dont le principe est de suivre l'évolution des mouvements de terrain et de prendre les mesures de sécurité conservatoires qui s'imposent en cas d'instabilité avérée.

La mise en place d'instruments de surveillance (inclinomètre, suivi topographique, etc.), associée à la détermination de seuils critiques, permet de suivre l'évolution du phénomène, de détecter une aggravation avec accélération des déplacements et de donner l'alerte si nécessaire. La prévision de l'occurrence d'un mouvement limite le nombre de victimes, en permettant le déplacement des populations ou la fermeture des voies de communication vulnérables.

Néanmoins, la combinaison de différents mécanismes régissant la stabilité, ainsi que la possibilité de survenue d'un facteur déclencheur d'intensité inhabituelle (fortes pluies, séismes, etc.) rendent toute prévision précise difficile.

V.5.4.2. Minimiser les conséquences négatives d'un événement à risques.

Cette aptitude relève de la capacité à détecter les risques, à y répondre et éventuellement à modifier son fonctionnement pour y faire face. Cette capacité repose sur l'aptitude du système à minimiser, éliminer et atténuer les effets négatifs causés par les risques. Pour cela, il faut donc se concentrer principalement sur l'environnement géologique et géotechnique de l'ouvrage afin de proposer des mesures pour atténuer les effets négatifs des phénomènes naturels.

V.5.4.2.1. Investigations géologiques et géotechniques.

La connaissance de l'environnement géologique et hydrogéologique d'un ouvrage est une condition préalable de l'estimation des risques géotechniques.

La gestion des risques repose sur les investigations géologiques et géotechniques pour l'estimation de l'ampleur des mouvements de terrains, de leur genèse ainsi que leur impact sur les différentes infrastructures environnantes. Les investigations géologiques et géotechniques permettent de comprendre et de préciser les causes conduisant des événements à risque et de suggérer des mesures d'atténuation.

V.5.4.2.2. Protections et mitigations.

La mitigation est la mise en œuvre de mesures destinées à réduire les dommages des risques naturels. Les actions de mitigation incluent des techniques et des méthodes utilisées pour éviter, réduire et contrôler la probabilité d'occurrence du risque. Les risques sont suivis et, lorsqu'ils dépassent les seuils établis, Les actions de mitigation sont déployées afin de ramener l'effort concerné à un niveau de risque acceptable.

Donc, les risques qui dépassent le niveau d'acceptabilité doivent faire l'objet d'actions de traitement (ou de mitigation) pour les « réduire ». On peut alors définir une stratégie de réponse pour chaque risque. Le choix de réponse émane de la décision collégiale des acteurs impliqués dans la maîtrise du risque.

Le traitement des risques incluent le développement d'alternatives pour traiter les risques, le suivi des risques et la réalisation des activités de traitement des risques lorsque les seuils définis sont dépassés. Les mesures de protection des risques sont développées et mis en œuvre afin de réduire proactivement l'impact potentiel de l'occurrence des risques.

Les mesures de protection consistent à minimiser la gravité du phénomène redouté, en rendant impossible son occurrence (dans certaines limites) ou en réduisant ses effets potentiels (vulnérabilité), jusqu'à ce que le risque soit ramené dans le domaine considéré comme acceptable.

V.6. Surmonter la survenue d'un événement à risques.

Cette aptitude repose sur la capacité à retrouver un fonctionnement normal à l'issue de la survenue d'un événement à risque. Elle dépend de l'échelle des dommages et de la fréquence de l'événement.

V.6.1. Réparations et renforcements.

Il s'agit de limiter les conséquences d'un risque sur les infrastructures routières en intervenant avec des moyens et des mesures planifiés dans les plans de substitution pour faire face à des risques particuliers.

En effet, pour gérer les cas où le niveau de risque est trop élevé et pour les cas où des mesures de prévention et de protection ne permettent pas de réduire le risque à un niveau jugé acceptable, il convient de déclencher un plan de substitution afin de faire face à l'impact des risques qui peuvent se produire en dépit des tentatives de les mitiger.

Les mouvements de terrain rapides et discontinus (effondrement de cavités souterraines, éboulement, coulées boueuses), par leur caractère soudain, augmentent la vulnérabilité des infrastructures routières, allant de la dégradation à la ruine totale.

Dans ce cas les opérations de sauvetage, reconstruction, évacuation et déblaiement peuvent se déployer pour réparer les dommages.

V.6.2. Retour d'expérience.

Le retour d'expérience est une composante forte de la prévention et de la protection des risques qui s'inscrit dans une démarche de capitalisation et de gestion des connaissances et recouvre de ce fait plusieurs notions : la collecte et la mémorisation des informations, le traitement et l'analyse des données, l'exploitation et la transmission des résultats[6].

Le retour d'expérience, à travers l'analyse détaillée d'un événement passé doit permettre de comprendre son déroulement et de tirer les enseignements utiles pour améliorer la gestion des risques correspondants et renforcer, si nécessaire, la chaîne de prévention. Il se base sur l'expérience acquise afin d'en tirer des enseignements permettant d'améliorer la gestion des risques ; la capitalisation d'expérience semble donc être un outil essentiel à l'amélioration de la gestion des risques.

Toutefois, nous avons pu constater que chaque mouvement de terrain implique une gestion de risques différente en fonction du type de phénomène, du sol et de ses caractéristiques. Le retour d'expérience contribue à impulser une réflexion basée sur l'expérience, utile pour la gestion des risques mouvement de terrain. En effet, il permet de synthétiser et de capitaliser une multitude d'informations concernant un événement.

Finalement, nous constatons que le retour d'expérience contribue à réduire la vulnérabilité face aux risques car l'expérience acquise et conservée, permet d'améliorer les pratiques de gestion des risques au fil des événements à risques.

V.6.3. Sensibilisation du public.

La sensibilisation du public est un facteur clé dans la réduction effective des risques de catastrophe. Son développement est soutenu, par exemple, par l'élaboration et la diffusion de l'information par les médias et les canaux de l'éducation, la création de centres d'information, les réseaux et les actions communautaires ou la participation et la sensibilisation du public par des hauts fonctionnaires et des dirigeants communautaires.

V.7. Difficulté de la gestion des catastrophes.

La difficulté de la gestion des catastrophes, des risques et tout particulièrement des catastrophes relève de plusieurs causes qui sont autant de défis que doivent affronter les décideurs en charge de la sécurité et de la protection civile.

Si les causes « naturelles » des catastrophes, induites ou non par l'activité humaine, sont aujourd'hui largement étudiées en termes d'aléas et de risques par différentes disciplines scientifiques (géophysique, climatologie, géomorphologie, hydrogéologie, géochimie...), elles le sont beaucoup moins en termes de vulnérabilité et de prévention, sauf selon une approche mercantile ou politique par les compagnies d'assurance, les collectivités, les aménageurs et les services techniques des Etats qui n'ont toutefois pas toujours la possibilité d'intégrer les connaissances scientifiques acquises, faute de temps, faute de communication scientifique adaptée, de compétences partagées et surtout, faute de synergie et de coopération suffisantes entre les services d'Etat et ceux de la recherche[2].

La difficulté de faire face aux catastrophes est aussi directement liée à la complexité des interactions entre systèmes naturels et systèmes sociaux et sociétaux. L'enjeu majeur du siècle réside non seulement dans la compréhension des modes de fonctionnement de systèmes géographiques complexes (écosystèmes et anthroposystèmes ou sociosystèmes combinés) pour en déterminer les contraintes et faiblesses et agir autant de manière préventive en amont, que curative en aval, au moment des événements, mais également, dans le développement et la mise en place de stratégies efficaces de gestion de crise portant sur une hiérarchie de priorités et d'urgences exigeant rapidité et efficacité. Cette hiérarchisation existe déjà, mais les priorités ne sont pas forcément les mêmes pour les différents acteurs, dans les différents contextes de crise et dans les différents pays selon les chaînes de décisions et les décideurs impliqués.

Les phénomènes d'origine naturelle, par exemple des cycles et crises climatiques, ou les jeux de la tectonique terrestre, deviennent aujourd'hui des catastrophes majeures du fait de la vulnérabilité accrue par la croissance démographique mondiale, par la forte concentration des populations en zones urbaines (plus de 50% de la population mondiale) et sur les littoraux (80%). Leur large médiatisation, si elle sensibilise plus les populations, contribue également à exercer une forte pression sur les décideurs qui n'ont plus droit à l'erreur dans la gestion des crises

V.7. Conclusion générale

Tous les pays dans le monde sont ou seront exposés à des catastrophes se traduisant par des pertes en vies humaines, à un degré plus ou moins élevé.

Après une catastrophe, il est nécessaire de panser les plaies. Les collectivités mettent alors en route simultanément trois catégories d'actions. Le premier acte évalue les pertes et recherche les mécanismes qui ont conduit à cette catastrophe. C'est le retour d'expérience. L'indemnisation des victimes est un deuxième acte non moins nécessaire. Elle est de plus en plus le fait des sociétés d'assurances, privées ou publiques, dont le rôle ne se borne plus seulement à distribuer des financements. La politique adoptée par les sociétés d'assurance a des effets sur la prévention ou la gestion des désastres.

Enfin, il faut en même temps reconstruire les habitations détruites et restaurer le lien social entre les familles et les communautés. Ces trois formes d'action ordonnent le plan de ce dernier chapitre.

L'évaluation de la catastrophe est généralement difficile, car quelques responsables ne souhaitent pas toujours que la lumière soit faite sur le déroulement d'un désastre. De plus, trop souvent, les données précises sont difficiles à collecter. On ignore, par exemple, le nombre exact de victimes de grandes catastrophes[10].

De plus il faut que de nouvelles stratégies d'intervention doivent donc être imaginées et adaptées aux différents stades de développement économique et social, ainsi qu'aux systèmes politiques et institutionnels parfois très différents d'un pays à un autre. Par ailleurs, les populations des pays industrialisées acceptent de moins en moins le risque quel qu'il soit, et la demande "d'assurance tous risques" (catastrophe naturelle, risque technologique, terrorisme,) se généralise dans la quête utopique du "risque zéro". Il est évidemment indispensable de travailler sur la prévention et la gestion des catastrophes dans un réseau mondial et intégré, de coopération scientifique et technologique.

Listes des Figures

Chapitre I		Page
Figure I.1	Classification de Farmer	4
Figure I.2	Définition du risque naturel	5
Figure I.3	Types des incertitudes des propriétés du sol	8
Figure I.4	Glissements de versants instables	10
Figure I.5	Chutes de pierres	12
Figure I.6	Affaissement de chaussée	13
Figure I.7	Affaissement de terrain	13
Figure I.8	Effondrement à Saint-Pierre-les- par Martigues	13
Figure I.9	Inondations de bab el oued (Alger) en 2001, 800 morts	15
Figure I.10	Coulée de boue	15
Figure I.11	Phénomène de retrait-gonflement	16
Figure I.12	Fissuration due au retrait-gonflement	17
Chapitre II		
Figure II.1	Méthodologie générale : étape d'une analyse de risque	21
Figure II.2	Approches d'analyse de risque	22
Figure II.3	Typologie des méthodes d'analyse de risque	23
Figure II.4	Classification des principales méthodes d'analyse de risque qualitatives	25
Figure II.5	Processus de danger du modèle MADS	29
Figure II.6	Les principaux éléments pour développer la compréhension de risque	31
Figure II.7	Démarche ISO pour l'étude du risque	32
Figure II.8	Etapas de gestion des risques	32
Chapitre III		
Figure III.1	Notion de télédétection : le principe physique	41
Figure III.2	Définition des paramètres : (A) source d'énergie (B) rayonnement et atmosphère (C) cible (D) capteur (E) transmission, réception et traitement (F) interprétation (G) application	42
Figure III.3	Le spectre électromagnétique	43
Figure III.4	Fréquence de spectre électromagnétique	43
Figure III.5	Signatures spectrales	45
Figure III.6	Signatures spectrales des surfaces naturelles dans le domaine du visible, du proche infrarouge et de l'infrarouge moyen	45
Figure III.7	Capteur utilisé en télédétection	46
Figure III.8	Familles des capteurs	47
Figure III.9	Capteurs passifs.	47
Figure III.10	Capteurs actifs	47
Figure III.11	Les vecteurs ou plate-forme	49
Figure III.12	Une antenne radar longue portée ALTAIR	50
Figure III.13	Composantes d'un radar	50
Figure III.14	Types de satellite	51
Figure III.15	Satellites utilisés pour la télédétection	52
Figure III.16	Domaines d'application des SIG	57
Figure III.17	Les composants d'un SIG	57
Figure III.18	Carte d'occupation du sol	58
Figure III.19	Carte de gestion des espaces verts d'une ville	58
Figure III.20	Carte de gestion des espaces forestiers	59
Figure III.21	Carte de gestion des risques géotechnique	59
Figure III.22	Carte de gestion des risques géotechnique	60

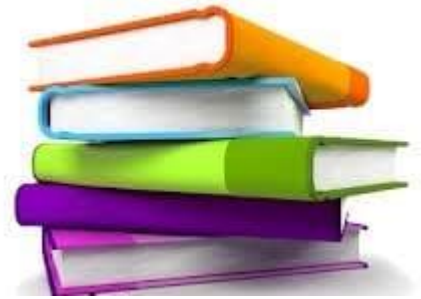
Figure III.23	Carte de gestion des risques géotechnique	60
Chapitre IV		
Figure IV.1	Principe de la méthode du Nœuds papillon	66
Figure IV.2	Diagramme de Farmer (gravité – probabilité).	68
Figure IV.3	Exemple de diagramme ALARP, reliant la probabilité d'accident pour 1 km de tunnel au nombre de victimes, d'après Knoflacher.	69
Figure IV.4	Limites ALARP : influence de l'aversion au risque	69
Figure IV.5	Graphique reliant la probabilité à la valeur de l'indice de fiabilité b	71
Figure IV.6	Système de parades	74
Figure IV.7	Systèmes de parades par approche douce	74
Figure IV.8	Systèmes de parades par approche dure	74
Figure IV.9	Techniques de stabilisation	75
Figure IV.10	Dispositifs de protection contre le ravinement et les charriages torrentiels à Entraunes	76
Figure IV.11	Injection d'un mélange de sable et d'eau (facilitant le transport) dans la cavité. Le mur en parainge à pour role de contenir le sable infecté dans la cavité tout en laissant circuler l'eau	76
Figure IV.12	Renforcement par piliers	77
Figure IV.13	Boulonnage du toit	77
Figure IV.14	Solutions technique pour la lutte contre le retrait – gonflement	77
Figure IV.15	Exemple de nuage de points obtenu par ZEB-Revo (scan laser terrestre 3D rotatif léger) pour un glissement de terrain de type rotationnel dans les vignes de Champagne (Commune de Le Mesnil-le Huttier-2018	79
Chapitre V		
Figure V.1	Processus de gestion des risques simples	82
Figure V.2	Processus de danger du modèle MADS	88
Figure V.3	Structure simplifiée de MOSAR module 'A'	89
Figure V.4	Structure simplifiée de MOSAR module 'B'.	90
Figure V.5	Résilience des risques naturels.	90

Listes Des Tableaux

Chapitre I		Page
Tableau I.1	Classification des types de risques selon la gravité et la fréquence	5
Tableau I.2	Classification des risques selon Rowe	6
Tableau I.3	Classification des risques selon MISE	7
Chapitre II		
Tableau II.1	Classes d'interaction des sources/cibles de danger	30
Tableau II.2	Niveau de risque en fonction du couple gravité/probabilité	34
Chapitre IV		
Tableau IV.1	Niveau de gravité des conséquences avec la probabilité	62
Tableau IV.2	Niveau de gravité avec la probabilité	64
Tableau IV.3	Exemple de matrice de la gravité des risques[65
Tableau IV.4	Exemple de classes de probabilité	66
Tableau IV.4	Cotation des niveaux de probabilité d'occurrence	67
Tableau IV.5	Valeurs de l'indice de fiabilité en fonction du mode de défaillance et de la nature des enjeux	72
Chapitre V		
Tableau V.1	Matrice d'analyse des risques de quelques risques géotechniques[4].	85

Références

Bibliographiques



1. **Abdelkarim .D**, Université de Sfax. Tunisie. Les inondations dans l'agglomération de Sfax (Tunisie méridionale) de 1982 à 2009 : de la prévention à la territorialisation du risque. (2013).
2. **André .D, Damienne P.** Risques et catastrophes- Observer, spatialiser, comprendre, gérer, Collection : Collection U. (2013).
3. **Aroua .N, , Ewa .B**, Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme d'Alger, Algérie. Le risque intrinsèque à la gestion locale des risques liés à l'eau en Algérie.(2013).
4. **Benachenhou .K** , Approche systémique du management des risques dans l'ingénierie géotechnique. Pour une interopérabilité des acteurs dans l'environnement algérien. Thèse de doctorat, Université aboubekr belkaid Tlemcen. (2019).
5. **Cécile LIEVAL, UL, France.** « Nouveaux risques », controverse environnementale et démocratie participative: l'exemple de l'opposition grenobloise aux nanotechnologies.(2013).
6. **Chuvieco, E.** Fundamentos de Teledetección Espacial. Ediciones Rialp S.A. Madrid. 568 pp.(1996).
7. **Diouf M. O., Gueye M. K.,** « étude de comportement et de dégradation des chaussées en béton bitumineux : cas des dentelles de rive », Mémoire d'Ingénieur en Génie Civil, Université de Dakar, (SENEGAL).(2005).
8. **Ferber V.,** « sensibilité des sols fins compactés à l'humidification apport d'un modèle de microstructure », Thèse de doctorat en Génie Civil, Université de Nantes, (France).(2005).
9. **Formation à la gestion des risques OFFP.** Glossaire des risques. Office fédéral de la protection de la population OFFP et le bureau d'ingénieurs-conseils Ernst Basler + Partenaires SA.
10. **Francisco E.G, JAVIER M. R, FERRAN .M ; ACOST.A** : manuel de télédétection spatiale telecan, universidad de las palmas de Gran Canaria. (2013).
11. **Frédéric L., Nancy M.** Aléas naturels et gestion des risques par (Amazonie).(2010).
12. **Fumey M.,** « Méthode d'Evaluation des Risques Agrégés : application au choix des investissements de renouvellement d'installations », Thèse de Doctorat en Systèmes Industriels, Institut National Polytechnique de Toulouse, (France). (2001).
13. **Girard M.C., C.M. Girard** ,Traitement des données de télédétection, Dunod. (1999).
14. **Guyot G.** Signatures spectrales des surfaces naturelles, coll « Télédétection satellitaire », Paradigme. (1989).
15. **Grasso P. E. Chiriotti S. XU Geodata Spa Corso Duca degl Abruzzi.** 48/E 10129 Turin, Italie La maîtrise des risques : une approche indispensable dans le développement des études de tunnels en terrains difficiles. REVUE FRANÇAISE DE GÉOTECHNIQUE N° 109 4e trimestre 2004.

16. **Hammoum H. et Bouzida R.** Pratique des systèmes d'information géographiques (S.I.G). Cours et applications. Copyright Eurl Pages Bleues Internationales. **(2010)**.
17. **INERIS**, « Analyse du Retrait-Gonflement et de ses Incidences sur les Constructions », (France). **(2009)**.
18. **Introduction à la gestion des catastrophes**, Copyright Le présent Manuel est disponible (en anglais) au Creative Commons Lisence ; Université Virtuel des petits états du Commonwealth (VUSSC) Gestion des catastrophes Version 1.0.
19. **Jean Paul B.** Géotechnique et risques naturels. Durabilité des géomembranes - Vieillissement physico-chimique et endommagement mécanique. Publications de LCPC. Paris, **(2008)**.
20. **Kergomard. Claude**, Professeur Ecole Normale Supérieure Paris, LA TÉLÉDÉTECTION AÉRO-SPATIALE : UNE INTRODUCTION.
21. **Marques G.**, « Management des risques pour l'aide à la gestion de la collaboration au sein d'une chaîne logistique: une approche par simulation », Thèse de Doctorat en Systèmes Industriels, Université de Toulouse, (France). **(2010)**,
22. **Mazouni M. H.**, « Pour une meilleure approche du management des risques : De la modélisation ontologique du processus accidentel au système interactif d'aide à la décision », Thèse de doctorat en Automatique, Institut National Polytechnique de Lorraine, (France). **(2008)**,
23. **Mezhoud L.**, « La vulnérabilité aux glissements de terrain et les enjeux dans la partie Ouest et Sud Ouest de la ville de Constantine », Mémoire de magister en Sciences de la terre, Université de Constantine, (Algérie). **(2007)**.
24. **NF P 94-500**, « missions d'ingénierie géotechnique classification et spécification », Norme française, AFNOR, (France). **(2006)**,
25. **Minvielle E.** et Souiah S. L'analyse statistique et spatiale : Statistiques, cartographie, télédétection, SIG. Editions du Temps. 255p. ISBN-10: 2842742249.**(2003)**.
26. **Pornon H.** Système d'information géographique, des concepts aux réalisations, Hermès. **(1990)**.
27. **Pairet J.Y.**, « Méthodologie d'évaluation de la résilience », Mémoire de magister en Sciences Appliquées, Université de Montréal, (canada). **(2009)**,
28. **Pascale M.**, Jérémy ROBERT, Alexis SIERRA, Robert D'ERCOLE, Sébastien HARDY, Pauline GLUSKI, IRD, Lima, Pérou. Dimensions spatiales et territoriales de la gestion de crise : les ressources de décision et d'intervention à Lima et Callao. **(2013)**.
29. **Pascal D.**, Université de la Nouvelle-Calédonie, France, et. al. Le risque de feux de brousse sur la Grande Terre de Nouvelle-Calédonie : l'Homme responsable, mais pas coupable. **(2013)**.
30. **Pierre T, UL**, France. Les dispositifs juridiques de prévention des risques majeurs naturels en France.
31. **Stéphane P** , UL, France. Le régime de la responsabilité environnementale et le secteur agricole en France, une portée limitée par le droit communautaire. **(2013)**.

32. **Tompkins E. L., ADGER W. N.**, « Does adaptive management of natural resources enhance resilience to climate change? », *Ecology and Society*, (2004).
33. **Verdel T.**, « Méthodologie d'évaluation globale des risque : Application potentielles au génie civil », Ecole des Mines de Nancy, (France). (1999),
34. **Wakim J.**, « Influence des solutions aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses », Thèse de doctorat en Technique et Economie de l'Exploitation du Sous-sol, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, (France). (2005),
35. **Zerhouni M. I.**, « Pour une bonne réalisation des Ouvrages géotechniques », Salon de la Géotechnique du Forage et des Fondations, (France). (2011).

Webographie

36. http://gpp.oiq.qc.ca/le_cycle_de_vie_d_un_projet.htm
37. <http://www.piarc.org/ressources/documents/170,RA2000-20>
38. <http://www.scribd.com/doc/33131067/Gestion-Risques>
39. http://wikigeotech.developpementdurable.gouv.fr/index.php/Wikigeotech:Risques_g%C3%A9otechnique_et_Terrassement
40. <http://observatoire-regional-risques-paca.fr/article/eboulements-chutes-pierres-blocs>
41. <http://observatoire-regional-risques-paca.fr/article/coulees-boue>
42. <https://www.qualitiso.com/risques-definition-types-evaluation-gestion/>
43. <http://www.levif.be/info/actualite/belgique/intemperies-orp-jauche-villagemaudit/article-1195087707906.htm>
44. http://www.auto-utilitaire.com/actualites/actualites_algerie/4312-remise-enl%E2%80%99%C3%A9tat-de-la-rn-24-dans-un-d%C3%A9lai-de-10-jours.html
45. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03477903/document>
46. http://ressources.unit.eu/cours/cyberriques/etage_3_aurelie/co/Module_Etage_3_synthese_75.html
47. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-th5/methodes-d-analyse-des-risques-42155210/>
48. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/teledetection/2-les-systemes-de-teledetection/>
49. <https://fr-academic.com/dic.nsf/frwiki/1670747>
50. <https://www.esrifrance.fr/sig11.aspx>
51. <https://fsnv.univ-setif.dz/images/telecharger/BEV/M1%20protec%20eco%2019-20%20Syst%C3%A8me%20d%E2%80%99Informations%20G%C3%A9ographiques%20SIG%20khaznadar.pdf>
52. https://ft.univtlemcen.dz/assets/uploads/pdf/departement/hyd/Polycopi%C3%A9_Boukli_Hac%C3%A8ne_Ch%C3%A9rifa_Hydraulique.pdf

53. https://www.geotechnique56.journal.org/articles/geotech/full_html/2018/03/geotech180016/geotech180016.html<https://www.rhone.gouv.fr/content/download/26762/153862/file/Annexe%20%20-%20M%C3%A9thodologie.pdf>
54. [http://ressources.unit.eu/cours/cyber risques/etage_1/co/Module_Etage_1_36.html#:~:text=Principe%20de%20l'approche%20ALARP.&text=\(As%20Low%20As%20Reasonably%20Practicable,%C3%AAtre%20affect%C3%A9s%20par%20la%20menace](http://ressources.unit.eu/cours/cyber risques/etage_1/co/Module_Etage_1_36.html#:~:text=Principe%20de%20l'approche%20ALARP.&text=(As%20Low%20As%20Reasonably%20Practicable,%C3%AAtre%20affect%C3%A9s%20par%20la%20menace).
55. <http://observatoire-regional-risques-paca.fr/article/coulees-boues-mesures-protection>
56. <http://observatoire-regional-risques-paca.fr/article/mesures-protection-contre-effondrements-affaissements>
57. https://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologyFrench.pdf
58. https://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologyFrench.pdf

Acronymes et abréviations

AFNOR : Association Française de Normalisation

AMDE : Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets

ADD : Arbre De Défaillance ;

APR : Analyse Préliminaire des Risques

AMDEC : Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité

AIPCR : Association Mondiale de la Route

AMDE : Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets

AMDEC : Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leurs Criticités ;

D.T.U : Document Technique Unifié

ISO : Organisation Internationale de Normalisation

LNBT : Laboratoire National de Bâtiment et Travaux Publics

LTPP : Laboratoire des Travaux Publics de Polynésie (France)

SETRA : Service d'Etudes sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements.

SIG : système d'information géographique

a : aversion (plus ce facteur est élevé plus les pentes des droites sont élevées)

k : coefficient lié au niveau de vie (pays développés $k = 5$)

ALARP : As Low As Reasonably Practicable

G : gravité des conséquences ;

F : Probabilité d'apparition ;

p (E) : probabilité de l'événement et

(V -v) : espérance des pertes

V : valeur des enjeux ;

v : vulnérabilité des enjeux

β : probabilité cible