

Master Génie Littoral



Module : Risques telluriques et instabilités du littoral (S3)

2026-2027

Pr. Morad TAHER

m.taher@uae.ac.ma

Avant-propos

Les risques telluriques et littoraux représentent aujourd'hui un enjeu majeur pour l'aménagement durable des territoires et la protection des populations, en particulier dans les régions côtières où les pressions naturelles et anthropiques sont de plus en plus importantes. Leur compréhension est indispensable pour évaluer leur impact, mettre en œuvre des mesures de prévention adaptées et assurer une gestion durable des espaces exposés.

Ce support de cours, intitulé « Risques telluriques et instabilité du littoral », est destiné aux étudiants du Master Génie Côtier de la Faculté des Sciences et Techniques d'Al Hoceima. Il présente les notions fondamentales relatives à cinq grandes thématiques : l'érosion, les glissements de terrain, les inondations, les séismes et l'instabilité du littoral. Pour chacune d'elles, sont abordés les mécanismes, les facteurs de déclenchement, les conséquences ainsi que les principales méthodes de prévention et de cartographie.

Ce document a pour objectif de fournir aux étudiants les bases scientifiques et techniques nécessaires à la compréhension de ces phénomènes, tout en les sensibilisant aux enjeux liés à la gestion des risques naturels, et plus particulièrement dans les zones côtières.

Bien que ce support ait été élaboré avec le plus grand soin, il est possible que certaines erreurs, imprécisions ou omissions s'y soient glissées. Les remarques et suggestions des étudiants sont donc les bienvenues. Je les invite à me signaler toute correction ou amélioration qu'ils jugeraient utile, par courriel à l'adresse indiquée sur la page de garde, afin d'enrichir et d'améliorer la qualité de ce document dans ses prochaines éditions.

J'espère que ce cours constituera un support pédagogique utile et contribuera à la formation de futurs spécialistes capables d'analyser et de gérer efficacement les risques naturels.

Table des matières

Avant-propos	2
Table des matières.....	3
Liste des figures	8
CHAPITRE I : L'ÉROSION.....	10
Introduction	10
1- Définition de l'érosion	10
2- Typologie de l'érosion	11
2.1. L'érosion mécanique sèche	11
2.2. Erosion hydrique	11
2.3. Mécanisme de l'érosion hydrique.....	12
2.3.1. Impact des gouttes de pluies	13
2.3.2. La force de cisaillement exercée par le ruissellement	14
2.3.3. L'infiltration	16
2.4. Formes d'érosion hydriques	16
2.4.1. Erosion en nappe (Sheet erosion)	17
2.4.2. Erosion en rigoles (rill erosion)	18
2.4.3. Erosion par ravinement (Gully erosion).....	20
2.4.4. Erosion latérale des berges fluviales.....	21
2.5. Erosion éolienne	22
2.5.1. Facteurs de l'érosion éolienne	23
2.5.2. Les mécanismes de l'érosion éolienne (Fig. 10)	24
3- Les facteurs de risque de l'érosion hydrique	25
3.1. Le climat	26
3.2. La topographie	27
3.3. Le rôle de la végétation	27
3.4. Les facteurs anthropiques	28
4- Les conséquences de l'érosion hydrique	30
4.1. Conséquences sur le sol.....	30
4.2. Influence sur le régime des eaux.....	30
4.3. Dégradation des infrastructures	31
4.4. Envasement des barrages.....	31
5- Mesures de lutte contre l'érosion hydrique	33
6- Equation universelles des pertes de sol (USLE)	35
Conclusion	36
CHAPITRE II : GLISSEMENT DE TERRAIN	38

1- Qu'est-ce qu'un glissement de terrain ?	38
2- Les principaux types de glissements de terrain	39
2.1. Les chutes (Falls)	41
2.2. Basculement (Topple)	45
2.3. Glissements (Slides)	47
2.3.1. Glissement rotationnel (Rotational Landslide)	47
2.3.2. Glissement translationnel (Translational Landslide)	50
2.4. Étalements (Spreads)	53
2.5. Écoulements (Flows)	56
2.5.1. Coulées de débris (Debris Flows)	56
2.5.2. Avalanche de débris (Debris Avalanche)	59
2.5.3. Coulée de terre (Earthflow)	62
2.5.4. Coulée de terre lente (Fluage – Creep)	65
3- Où se produisent les glissements de terrain ?	67
4- Les causes des glissements de terrain	69
4.1. Causes naturelles	69
4.1.1. Les glissements de terrain et l'eau	69
4.1.2. Les glissements de terrain et l'activité sismique	71
4.1.3 Les glissements de terrain et l'activité volcanique	72
4.2. Les activités humaines	73
5- Effets et conséquences des glissements de terrain	74
5.1. Impacts des glissements de terrain sur l'environnement bâti	74
5.1.1. Impacts des glissements de terrain à mouvement rapide	75
5.1.2. Conséquences sur les infrastructures de transport	75
5.1.3. Augmentation de la vulnérabilité liée à la croissance démographique	76
5.2. Impacts des glissements de terrain sur l'environnement naturel	77
5.2.1. Glissements de terrain sous-marins	78
5.2.2. Recul des falaises côtières et érosion des versants littoraux	78
5.2.3. Barrages naturels formés par les glissements de terrain	79
6- cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain par le processus de hiérarchie analytique (AHP)	79
CHAPITRE III : LES INONDATIONS	81
Introduction	81
1- Quelques définitions	82
2- Types d'inondation	82
2.1. La montée lente des eaux en région de plaine	82

2.2. La formation rapide de crues torrentielles	83
2.3. Le ruissellement pluvial	84
3- Hydraulique des cours d'eau : débit et lit fluvial	86
3.1. Le débit de la rivière	86
3.2. Le lit de la rivière	87
4- Le processus de formation des crues	89
5- L'influence des facteurs naturels	89
6- L'aléa inondation	89
6.1. La période de retour de crues	90
6.2. La hauteur et la durée de submersion	90
6.3. La vitesse du courant	90
6.4. Le volume de matière transportée	91
7- Le risque d'inondation	92
7.1. L'influence des facteurs anthropiques	92
7.2. Les atteintes aux hommes, aux biens et aux activités	93
7.3. Les atteintes à l'environnement	94
8- Les actions de prévention et de secours	94
8.1. Les responsabilités	94
8.2. La prévision et la prévention	95
8.2.1. La prévision	95
8.2.2. La prévention	95
8.3. La prise en compte du risque dans l'aménagement	99
8.4. L'alerte et les consignes	99
8.5. Les moyens de protection	101
9- Modélisation hydraulique et cartographie des zones inondables avec HEC-RAS	101
CHAPITRE IV : SEISMES	103
Introduction	103
1- Définition de séismes	103
1.1. Les failles	104
1.2. Les ondes sismiques	105
1.2.1. Les ondes des volumes	106
1.2.2. Les ondes de surface	107
2- Les moyennes des mesures	107
2.1. Le sismographe	107
2.2. Le sismogramme	108
2.3. Le sismomètre	109

3- La source de séisme	110
3.1. Les mouvements des plaques	110
3.2. Les volcanismes	111
3.3. L'activité humaine	112
4- Le mécanisme au foyer des séismes et sa représentation en « beach ball »	112
4.1. Définition du mécanisme au foyer	112
4.2. Principe de détermination	112
4.3. Représentation en « Beach Ball »	113
4.4. Types de mécanismes au foyer	114
4.5. Application d'interprétation des mécanismes au foyer	117
4.6. Comment détermine-t-on un mécanisme au foyer ?	120
4.7. Définir la géométrie d'un mécanisme au foyer	123
4.8. Construire un mécanisme au foyer (« beachball ») à partir de 3 données d'entrée.....Error!	
Bookmark not defined.	
5- La conséquence des séismes	125
6- L'échelle de mesure des séismes	127
6.1. La Magnitude	128
6.2. Intensité	128
7- Localiser un tremblement de terre	130
7.1. Détermination de l'épicentre par la méthode des cercles	130
7.2. Détermination de l'épicentre par la méthode des hyperboles	131
7.3. Détermination de l'épicentre par les méthodes actuelles	133
Protection contre les séismes	133
Chapitre V : INSTABILITE DE LITTORAL	135
1- Définition de la zone côtière	135
2- Aléa naturel : érosion côtière	135
2.1. Qu'est-ce que l'érosion côtière ?	135
2.2. Les causes à l'origine de l'érosion côtière	135
2.3. La sensibilité des côtes à l'érosion côtière	136
3- La dynamique côtière	138
3.1. La dérive littorale et les apports sédimentaires	138
3.2. Le rôle de la plage	139
3.3. Les variations saisonnières de la plage	139
4- Les mouvements de terrain dans les falaises rocheuses	140
5- Incidence des interventions humaines	141
5.1. Les ouvrages de protection	142

5.2. Effet de bout	143
6- Analyse de l'évolution du trait de côte à l'aide de l'outil DSAS (Digital Shoreline Analysis System).....	143

Liste des figures

Figure 1: Processus d'érosion hydrique.	12
Figure 2: Effet des gouttes de pluies (effet splash)	13
Figure 3: Formes d'érosion hydrique.	17
Figure 4: Photo montrant les formes d'érosion en nappe.	18
Figure 5: Les différents types de rigoles (Sogon et al., 1999).	19
Figure 6: Photo montrant les formes d'érosion en rigole dans le bassin de Boudinar (© M. TAHER 2024).....	19
Figure 7: Photo illustrant les formes d'érosion en ravine dans le bassin de Boudinar (© M. TAHER 2024).....	20
Figure 8: Photo illustrant les formes d'érosion en badlands dans le bassin de Boudinar (© M. TAHER 2024).....	21
Figure 9: Photo montrant les formes d'érosion latérale des berges fluviales.	22
Figure 10: Photo montrant les formes d'érosion éoliennes (© Vadyuhin).....	23
Figure 11: Les mécanismes de l'érosion éolienne	25
Figure 12: Développement d'une végétation dense dans la retenue du barrage Mohammed Ben Abdelkrim El Khattabi en raison de l'envasement (© M. TAHER 2026).....	32
Figure 13: Ce glissement de terrain s'est produit à La Conchita, en Californie (États-Unis), en 2005. Il a causé la mort de dix personnes. (Photographie : Mark Reid, U.S. Geological Survey.)	38
Figure 14: Illustration schématisée d'un glissement de terrain rotationnel évoluant en coulée de terre. Les différentes parties du glissement sont identifiées selon la nomenclature proposée par Varnes (1978).	39
Figure 15: Schéma d'une chute de blocs (Rockfall).....	42
Figure 16: Chute d'un bloc rocheux sur la rocade méditerranéenne (M. TAHER 2026)	42
Figure 17: Construction de murs de soutènement dans les secteurs de la rocade méditerranéenne les plus exposés aux chutes de blocs rocheux (M. TAHER 2026)	44
Figure 18: Schéma d'un basculement (Toople).	45
Figure 19: Orthophoto UAV d'un paysage volcanique de Tiztoutine – Province de Nador- caractérisé par le basculement gravitaire des blocs (M. TAHER 2026)	46
Figure 20: Schéma illustratif d'un glissement rotationnel.	48
Figure 21: Schéma illustratif d'un glissement translationnel.	51
Figure 22: Schéma illustratif d'un étalement latéral (lateral spread). Une couche susceptible de liquéfaction est située sous la couche superficielle.	54
Figure 23: Schéma illustratif d'une coulée de débris (debris flow).....	57
Figure 24: Schéma illustratif d'une avalanche de débris (debris avalanche)	60
Figure 25: Schéma illustratif d'une coulée de terre (earthflow), (Geological Survey of Canada).	62
Figure 26: Schéma illustratif d'une coulée de terre lente, communément appelée fluage (creep).	65
Figure 27: : Photographie illustrant les dommages subis par une habitation construite sur un remblai artificiel à la suite d'un glissement de terrain induit par le séisme de la préfecture de Niigata (Japon) en 2004. (© Professeur Kamai, Université de Kyoto, Japon	72
Figure 28: Schéma illustratif d'une inondation par remontée de nappe.....	83
Figure 29: Schéma illustratif d'embâcle sur un torrent	84
Figure 30: Schéma illustratif d'une inondation pluvial.....	85
Figure 31: Schéma illustratif d'une Structure d'une lave torrentielle.....	86
Figure 32: Schéma illustratif d'un bassin versant.....	87
Figure 33: Schéma illustratif des différents lits d'une rivière.....	88
Figure 34: Le transport solide.....	91

Figure 35: Schéma illustrant l'influence de l'orientation des labours sur le ruissellement et l'érosion des sols.	93
Figure 36: Schéma illustrant les dispositifs temporaires de protection des ouvertures contre les inondations.....	97
Figure 37: Schéma illustrant les ouvrages de correction torrentielle : seuils et plages de dépôt	98
Figure 38: Schéma illustrant le rôle des digues et des zones d'expansion des crues dans la gestion des inondations.....	101
Figure 39: composantes d'un séisme	104
Figure 40: Sismographe	108
Figure 41: Exemple d'un sismogramme	109
Figure 42: Schéma illustrant l'évolution des instruments de détection et d'enregistrement des séismes, depuis le sismoscope de Zhang Heng jusqu'aux stations sismologiques modernes, ainsi que le principe de fonctionnement des sismomètres électromagnétiques vertical	110
Figure 43: Carte du monde montrant les principales plaques tectoniques. Les zones de sismicité élevée se trouvent aux lignes inter -plaques	111
Figure 44: Représentation d'un plan géologique sur une projection stéréographique de l'hémisphère inférieur,	114
Figure 45: Représentation du mécanisme au foyer d'une faille décrochante et interprétation des plans nodaux.	115
Figure 46: Mécanismes focaux des failles normale et inverse	116
Figure 47: Mécanismes focaux des failles obliques.	117
Figure 48: Identification du premier mouvement des ondes P sur un sismogramme.....	121
Figure 49: Construction du mécanisme au foyer à partir des premiers mouvements des ondes P. ...	122
Figure 50: Définition du rake (angle de glissement) sur un plan de faille selon la règle de la main droite.	124
Figure 51: Côte à falaise meuble et peu consolidée en érosion. Source : MSP, 2023	136
Figure 52: Côte à terrasse de plage affectée par l'érosion côtière	137
Figure 53: Côte à falaise rocheuse en érosion – formation de Cap-aux-Meules	137
Figure 54: Dérive littorale, un courant parallèle à la côte généré par l'action des vagues.....	138
Figure 55: Les variations saisonnières de la plage	140
Figure 56: Grande échancrure dans des falaises de grès rouge aux Îles-de-la-Madeleine, Formation d'une grotte et effondrement survenu à plus de 30 mètres de la falaise rocheuse. Source : UQAR, 2010.....	141
Figure 57: Érosion sévère créée derrière le mur par le franchissement de l'eau lors d'une tempête. Source : UQAR, 2010	142
Figure 58: Effet de bout entraîné par des travaux d'enrochement. Source : MSP, 2021	143

CHAPITRE I : L'ÉROSION

Introduction

Tous les sols sont naturellement exposés à l'érosion, un processus qui correspond à l'enlèvement progressif de la couche arable sous l'action des agents naturels, principalement l'eau et le vent, mais également sous l'effet de certaines activités humaines, notamment les pratiques agricoles et le travail du sol. Quel que soit l'agent responsable, l'érosion se déroule en trois étapes successives : le détachement des particules, leur transport, puis leur dépôt dans des zones où l'énergie du milieu diminue. La couche arable, riche en matière organique, en éléments nutritifs et en organismes vivants, est ainsi déplacée vers d'autres secteurs du terrain, où elle peut s'accumuler, ou être exportée hors de la parcelle vers les réseaux hydrographiques. Cette perte de sol fertile réduit la productivité des terres agricoles et favorise l'envasement ainsi que la pollution des cours d'eau, des zones humides et des lacs. L'érosion peut se manifester de manière progressive et peu perceptible sur de longues périodes, ou, au contraire, se produire rapidement lors d'événements extrêmes, entraînant des pertes importantes de sol. Plusieurs facteurs aggravent ce phénomène, notamment le compactage du sol, la diminution de la teneur en matière organique, la dégradation de la structure du sol, un mauvais drainage interne, ainsi que les processus de salinisation et d'acidification, qui rendent les sols plus vulnérables aux agents érosifs.

1- Définition de l'érosion

Le terme érosion provient du verbe latin « erodere », qui signifie « ronger ». En géosciences, il désigne l'ensemble des processus responsables de l'usure et de l'enlèvement progressif des matériaux constituant la surface terrestre. L'érosion des sols est l'une des formes les plus importantes de dégradation des terres. Elle correspond au détachement, au transport et au dépôt des particules du sol sous l'action d'agents naturels tels que l'eau, le vent ou la gravité. Parmi ces différents types, l'érosion hydrique, également appelée érosion pluviale ou érosion hydraulique, est provoquée par les précipitations et le ruissellement. Elle se caractérise par le détachement des particules du sol sous l'effet de l'impact des gouttes de pluie et de l'écoulement de l'eau, suivi de leur transport et de leur dépôt lorsque l'énergie du flux diminue. Cette forme d'érosion est l'une des principales causes de la perte de la couche arable et de la dégradation des sols dans de nombreuses régions du monde.

2- Typologie de l'érosion

L'érosion peut être classée selon l'agent responsable du détachement, du transport et du dépôt des particules du sol. Les principaux agents érosifs sont l'eau, le vent et la gravité, qui donnent respectivement naissance à l'érosion hydrique, à l'érosion éolienne et aux mouvements gravitaires. Parmi les facteurs climatiques, les précipitations et le vent jouent un rôle prépondérant dans la dégradation des sols. Leur action est particulièrement marquée dans les régions arides et semi-arides, où la faible couverture végétale et les conditions climatiques favorisent l'érosion et accélèrent la perte des sols.

2.1. L'érosion mécanique sèche

L'érosion mécanique sèche est une forme de dégradation des sols provoquée par les activités agricoles, notamment le travail du sol, en l'absence d'intervention directe des précipitations. Ce processus se traduit par un déplacement lent des horizons superficiels sous l'action des outils de labour et de préparation du sol. Il entraîne progressivement le décapage des parties sommitales des versants et l'accumulation des matériaux au pied des pentes. L'intensité de cette érosion dépend principalement de la pente, mais aussi de la fréquence, de l'intensité et des techniques de travail du sol employées. Bien que ses effets puissent être confondus avec ceux de l'érosion en nappe, l'érosion mécanique sèche s'en distingue par le fait que les matériaux sont déplacés en masse sous l'effet des pratiques culturales, sans n'être arrachés ni transportés par l'action de l'eau.

2.2. Erosion hydrique

L'érosion des sols résulte principalement de l'action des gouttes de pluie et du ruissellement, qui constituent les principaux agents de l'érosion hydrique à l'échelle des versants (Fig. 1). Lorsque les précipitations atteignent la surface du sol, l'énergie des gouttes provoque le détachement des particules de terre et de roche. Ces particules sont ensuite entraînées par les eaux de ruissellement. Le processus d'érosion hydrique comprend trois étapes principales : le détachement des particules sous l'effet de l'impact des gouttes de pluie et du ruissellement, leur transport par éclaboussure et écoulement de surface, puis leur dépôt lorsque la vitesse de l'eau diminue, en fonction de la taille, de la densité des particules et de la capacité de transport de l'écoulement. Le déplacement des sédiments le long des versants et dans les vallées engendre ainsi une dynamique complexe, influencée par les caractéristiques du terrain et des écoulements. Les mécanismes d'érosion et de sédimentation

varient selon la nature de l'agent érosif, qu'il s'agisse de la pluie, du ruissellement ou du vent, ainsi que selon l'origine des sédiments, provenant notamment des rigoles, des ravines, des berges de cours d'eau ou des plaines inondables.

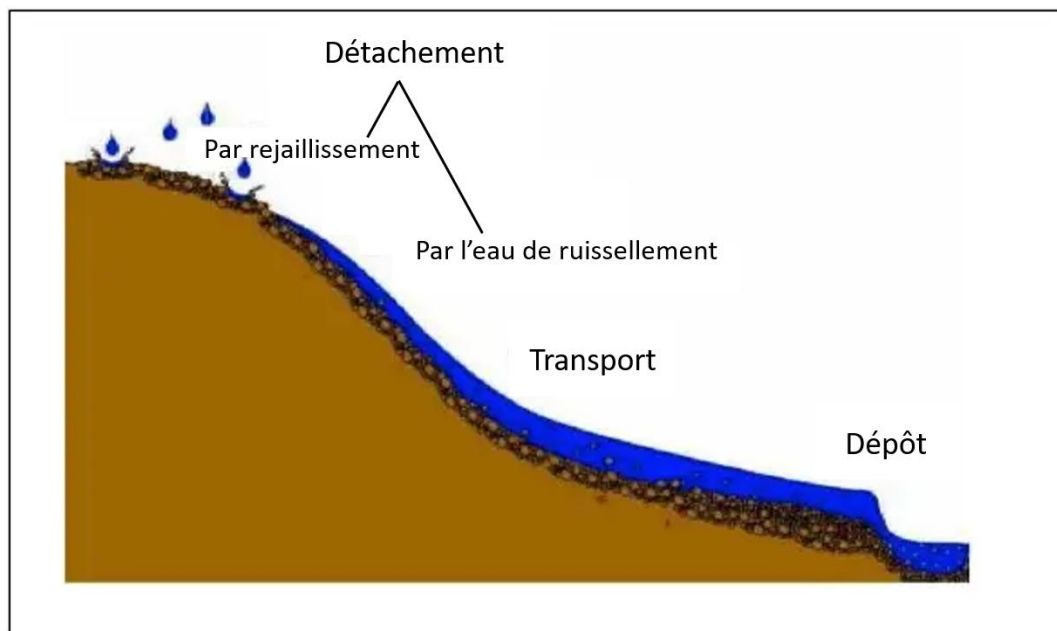


Figure 1: Processus d'érosion hydrique.

2.3. Mécanisme de l'érosion hydrique

La pluie est le principal facteur déclencheur de l'érosion hydrique. Son action débute dès l'impact des gouttes de pluie sur la surface du sol, qui désagrègent les agrégats et détachent les particules superficielles. Ce phénomène favorise également la formation d'une croûte de battance, réduisant la porosité du sol et limitant l'infiltration de l'eau.

Lorsque l'intensité des précipitations dépasse la capacité d'infiltration du sol, ou lorsque celui-ci est déjà saturé en eau, un ruissellement de surface se met en place. Sur les terrains en pente, cet écoulement concentre progressivement son énergie, entraînant les particules préalablement détachées et augmentant sa capacité d'arrachement.

Le mécanisme de l'érosion hydrique se déroule ainsi en trois étapes successives :

- Le détachement des particules du sol sous l'effet de l'impact des gouttes de pluie et des forces de cisaillement exercées par le ruissellement.
- Le transport des particules par le ruissellement de surface, sous forme d'écoulement diffus ou concentré.

- Le dépôt des sédiments lorsque la vitesse de l'écoulement diminue ou que sa capacité de transport devient insuffisante.

Ce processus est particulièrement intense lorsque les sols sont peu perméables, dépourvus de couverture végétale ou soumis à des précipitations de forte intensité. Il entraîne une perte progressive de la couche arable, une diminution de la fertilité des sols et un transfert de sédiments vers les cours d'eau et les retenues hydrauliques.

2.3.1. Impact des gouttes de pluies

Les gouttes de pluie constituent l'un des principaux agents du déclenchement de l'érosion hydrique. En frappant la surface du sol, elles transforment leur énergie cinétique en forces de cisaillement capables de désagréger les agrégats et de détacher les particules superficielles (Figure 2). Ce phénomène, appelé érosion par impact des gouttes de pluie ou érosion par splash, dépend de plusieurs facteurs, notamment de la taille et de la vitesse des gouttes, de l'intensité des précipitations, de la couverture végétale et des conditions de vent. Les particules ainsi détachées peuvent être projetées sur de courtes distances ou être ensuite transportées par le ruissellement. L'impact répété des gouttes favorise également la formation d'une croûte de battance en surface, ce qui réduit l'infiltration de l'eau et accentue le ruissellement. La sensibilité du sol à ce type d'érosion augmente avec sa teneur en eau et devient maximale lorsque le sol est saturé. Elle dépend également de ses propriétés physiques, notamment de la texture, de la stabilité structurale et de la teneur en matière organique. Les sols limoneux sont généralement les plus vulnérables en raison de la faible cohésion de leurs particules, tandis que les sols riches en matière organique présentent une meilleure résistance à l'action des gouttes de pluie.

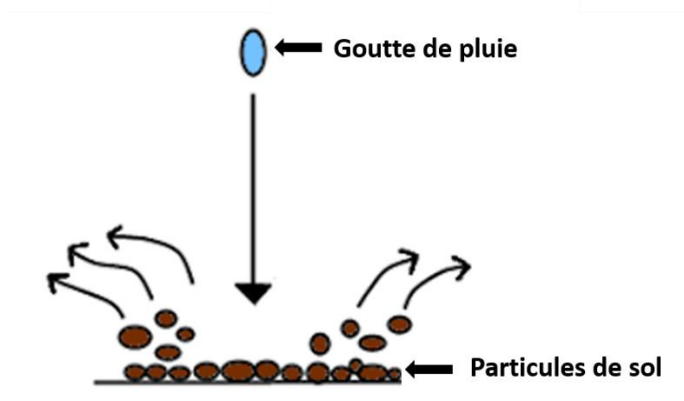


Figure 2: Effet des gouttes de pluies (effet splash)

L'impact des gouttes de pluie sur la surface du sol libère une énergie cinétique suffisante pour désagréger les agrégats et détacher les particules superficielles.

L'énergie cinétique est égale au demi-produit de sa masse par le carré de sa vitesse.

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

m : la masse de la goutte en Kg

v: la vitesse de la goutte en m/s

E_c : l'énergie cinétique en joule.

Le diamètre des gouttes de pluie, leur vitesse de chute et leur masse totale déterminant la capacité de détachement des particules du sol.

2.3.2. La force de cisaillement exercée par le ruissellement

Le ruissellement constitue le principal mécanisme de transport des particules détachées lors de l'érosion hydrique. Il se produit lorsque l'intensité des précipitations dépasse la capacité d'infiltration du sol, ou lorsque celui-ci est saturé en eau à la suite de pluies prolongées. Dans ces conditions, l'eau s'écoule en surface en entraînant les particules de sol, ce qui favorise leur déplacement vers l'aval. Le ruissellement peut se présenter sous la forme d'un écoulement diffus en nappe sur de vastes surfaces ou se concentrer dans des rigoles et des ravines, où l'augmentation de la vitesse d'écoulement accroît sa capacité d'arrachement et de transport des sédiments. Son intensité dépend de nombreux facteurs, notamment des propriétés du sol (texture, structure, porosité et teneur en matière organique), de la pente du terrain, de la couverture végétale et des caractéristiques des précipitations. Ces paramètres contrôlent la capacité d'infiltration du sol et déterminent ainsi l'importance du ruissellement et son pouvoir érosif.

Le ruissellement est exprimé normalement en volume (m^3) ou en hauteur (mm) par rapport à une superficie tandis que l'écoulement s'exprime par unité de temps ($m^3 s^{-1}$).

Le ruissellement peut être diffus ou concentré en fonction des cinq paramètres :

- L'intensité relative de la pluie
- L'indice de rugosité faible

- La pente
- La durée de la pluie
- L'infiltration dans le sol.

La force de cisaillement exercée par le ruissellement correspond à la contrainte de cisaillement exercée par l'eau en mouvement sur la surface du sol.

Elle résulte principalement du frottement entre l'écoulement d'eau et le sol. Si cette contrainte dépasse la résistance du sol, les particules peuvent être détachées et transportées.

Formule simplifiée : En hydraulique à surface libre, et pour un écoulement peu profond sur une pente on utilise souvent :

$$\tau = \rho g h S$$

Où, :

τ = contrainte de cisaillement exercée par l'eau (Pa)

ρ = masse volumique de l'eau (kg/m³)

g = accélération gravitationnelle (9,81 m/s²)

h = Profondeur de l'écoulement (m)

S = pente

Exemple

Si l'eau ruisselle sur une pente de 10 % ($S=0,10$) avec une hauteur d'eau de 5 mm ($h=0,005$ m) et $\rho=1000$ kg/m³ :

$$\tau = 1000 \times 9,81 \times 0,005 \times 0,10$$

$$\tau \approx 4,9 \text{ Pa}$$

Cette valeur peut ensuite être comparée à la contrainte critique de cisaillement du sol (τ_c)

Si : $\tau > \tau_c$

le ruissellement peut contribuer au détachement des particules.

2.3.3. L'infiltration

L'infiltration correspond à la fraction des précipitations qui pénètre dans le sol et alimente progressivement les horizons profonds. Elle constitue un processus essentiel du cycle hydrologique, car elle réduit le ruissellement de surface et, par conséquent, le risque d'érosion hydrique. La capacité d'infiltration varie selon l'état hydrique du sol : un sol sec absorbe généralement davantage d'eau qu'un sol déjà humide ou saturé.

L'infiltration est contrôlée par plusieurs facteurs, notamment :

- L'épaisseur de la zone saturée, qui conditionne la capacité du sol à absorber de nouvelles quantités d'eau.
- L'humidité initiale du sol, un sol saturé favorisant davantage le ruissellement.
- L'impact des gouttes de pluie (effet splash), qui peut provoquer la formation d'une croûte de battance réduisant la perméabilité de la surface.
- Le transport et le dépôt des particules fines, susceptibles d'obstruer les pores du sol et de limiter les échanges d'eau.
- Les activités humaines, telles que le compactage dû aux engins agricoles, le piétinement, le surpâturage ou l'urbanisation, qui diminuent la porosité du sol.
- L'état de surface du sol, notamment sa rugosité, sa structure et la présence d'une couverture végétale ou de résidus organiques.
- Le gel ainsi que la qualité de l'air contenu dans les pores du sol, qui influencent les conditions d'écoulement et la capacité d'absorption de l'eau.

Un faible capacité d'infiltration favorise l'apparition du ruissellement de surface, augmente le transport des particules détachées et contribue ainsi à l'intensification des processus d'érosion hydrique.

2.4. Formes d'érosion hydriques

Les différentes formes d'érosion hydrique peuvent être classées en trois grandes catégories selon le degré de dégradation du sol et les caractéristiques du ruissellement (Fig. 3) : l'érosion en nappe, l'érosion linéaire et l'érosion en masse. L'érosion en nappe correspond à l'enlèvement uniforme de la couche superficielle du sol, entraînant une perte importante de matière organique et d'éléments nutritifs. L'érosion linéaire se développe lorsque le ruissellement se concentre, donnant naissance à des rigoles puis à des ravines qui entaillent

progressivement les horizons plus profonds du sol. L'érosion en masse, quant à elle, se traduit par le déplacement de volumes importants de sol ou de roche sous l'effet de la gravité, souvent favorisé par une forte saturation en eau. À ces formes s'ajoute l'érosion latérale des berges, provoquée par l'action continue des écoulements qui sapent progressivement les rives des cours d'eau.

Ces différents types d'érosion se manifestent principalement lorsque les précipitations excèdent la capacité d'infiltration du sol ou lorsque celui-ci est saturé en eau. Ils peuvent également être favorisés par la présence d'obstacles limitant l'infiltration, ce qui accroît le ruissellement de surface et renforce le pouvoir érosif de l'eau.

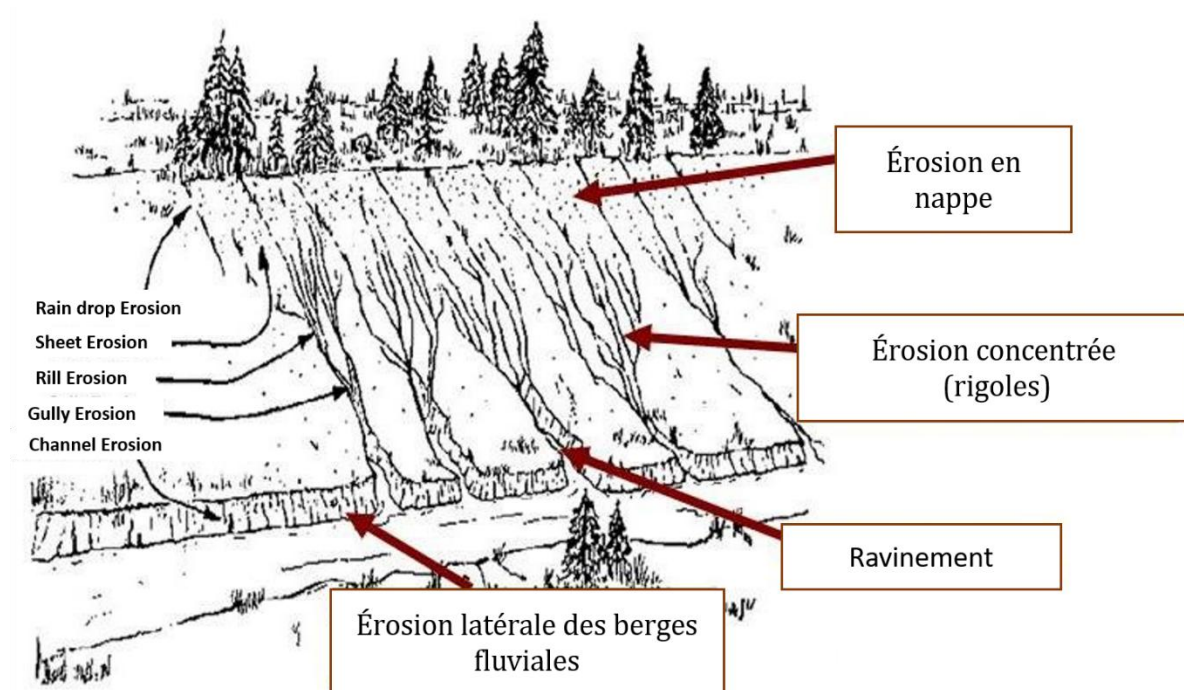


Figure 3: Formes d'érosion hydrique.

2.4.1. Erosion en nappe (Sheet erosion)

Les particules de sol dépourvues de protection végétale sont particulièrement vulnérables au détachement sous l'effet du piétinement, de l'érosion éolienne et surtout de l'impact des gouttes de pluie. Sur les faibles pentes, où le ruissellement reste initialement diffus, l'énergie des gouttes de pluie projette les particules dans toutes les directions. Toutefois, sous l'effet de la gravité, leur déplacement est principalement orienté vers l'aval, amorçant ainsi leur transport (Fig. 4).

Lorsque le ruissellement en nappe devient plus organisé, l'eau s'accumule d'abord dans de petites dépressions avant de s'écouler sous forme de filets. En augmentant de vitesse, ces écoulements concentrent progressivement leur énergie le long des lignes de plus forte pente. Leur pouvoir érosif devient alors suffisant pour arracher et transporter non seulement les particules fines (argiles et limons), mais également des éléments plus grossiers tels que les sables, les graviers, les cailloux, voire des blocs.

L'érosion linéaire

L'érosion linéaire est exprimée par tous les creusements linéaires qui entaillent la surface du sol suivant diverses formes et dimensions (griffes, rigoles, ravines, etc.). En fait, L'érosion linéaire apparaît lorsque le ruissellement en nappe s'organise, En effet, sur un bassin versant ou une parcelle, l'érosion en rigole succède à l'érosion en nappe par concentration du ruissellement dans Les creux. A ce stade, les rigoles ne convergent pas mais forment des ruisselets parallèles.



Figure 4: Photo montrant les formes d'érosion en nappe.

2.4.2. Erosion en rigoles (rill erosion)

L'érosion en rigoles est une forme d'érosion linéaire qui se développe lorsque le ruissellement de surface se concentre dans des écoulements préférentiels (Figure 5&6). Ce phénomène apparaît généralement lorsque la capacité d'infiltration ou de stockage de l'eau par le sol est insuffisante, favorisant l'accumulation et la concentration des eaux de ruissellement. Il est particulièrement fréquent sur les sols déjà fragilisés par l'érosion en nappe, le compactage ou le tassement liés à certaines pratiques agricoles ou au surpâturage.

Sous l'action des écoulements concentrés, de petites incisions se forment à la surface du sol. Avec l'augmentation du débit et de la vitesse de l'eau, ces incisions s'approfondissent et évoluent en rigoles. Celles-ci constituent des chenaux temporaires de faible profondeur qui peuvent généralement être éliminés par les opérations de travail du sol, telles que le labour ou le hersage.

Bien que les rigoles puissent être effacées par les pratiques culturales, leur réapparition répétée traduit une concentration persistante du ruissellement. En l'absence de mesures de conservation des sols, elles ont tendance à s'élargir et à s'approfondir, pouvant évoluer vers des ravines, beaucoup plus difficiles à restaurer et responsables d'une dégradation importante des terres agricoles.

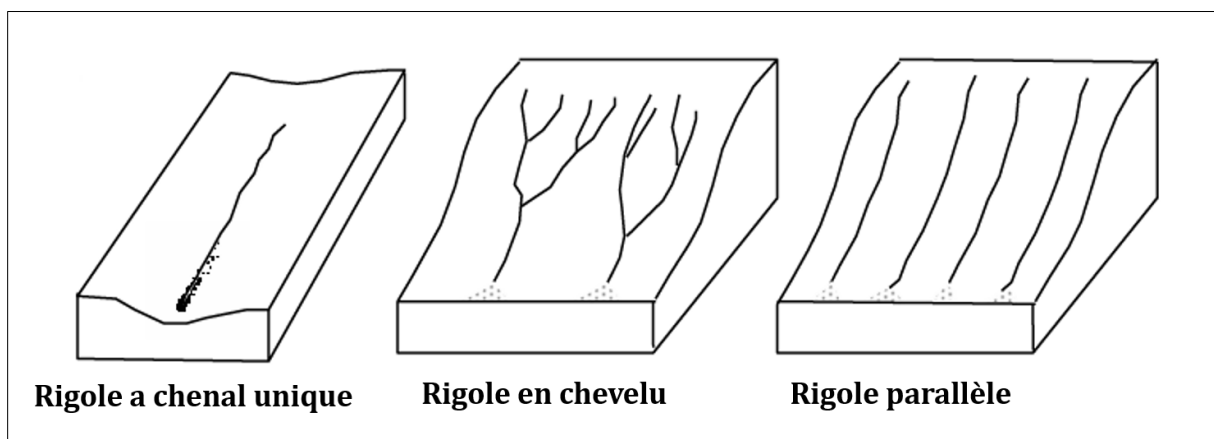


Figure 5: Les différents types de rigoles (Sogon et al., 1999).



Figure 6: Photo montrant les formes d'érosion en rigole dans le bassin de Boudinar (© M. TAHER 2024).

2.4.3. Erosion par ravinement (Gully erosion)

L'érosion par ravinement (Fig. 7) constitue le stade le plus avancé et le plus destructeur de l'érosion hydrique. Elle se développe lorsque le ruissellement de surface se concentre dans des chenaux où l'eau acquiert une énergie suffisante pour creuser profondément le sol. Les rigoles s'élargissent et s'approfondissent progressivement pour former des ravines, puis des ravins, dont la profondeur peut varier de quelques dizaines de centimètres à plusieurs dizaines de mètres.

Ce phénomène entraîne l'enlèvement rapide de grandes quantités de matériaux, provoquant une dégradation importante des terres agricoles. Les ravines et les ravins forment un réseau de chenaux séparés par des interfluves, avec des versants souvent très pentus et peu ou pas végétalisés. L'érosion continue peut conduire à la mise à nu de la roche mère, marquant un stade de dégradation très avancé appelé badlands ou ravinement généralisé, où les possibilités de restauration et d'aménagement deviennent extrêmement limitées.

L'érosion par ravinement est responsable d'importantes pertes de sols fertiles, réduit fortement la valeur et la productivité des terres agricoles, et constitue l'une des principales sources de production de sédiments à l'échelle des bassins versants. Les matériaux arrachés sont transportés vers l'aval, contribuant à l'envasement des cours d'eau, des retenues de barrages et des autres infrastructures hydrauliques. En raison de son caractère spectaculaire et de son évolution rapide, cette forme d'érosion est également la plus coûteuse à contrôler et à restaurer parmi tous les processus d'érosion hydrique.



Figure 7: Photo illustrant les formes d'érosion en ravine dans le bassin de Boudinar (© M. TAHER 2024).



Figure 8: Photo illustrant les formes d'érosion en badlands dans le bassin de Boudinar (© M. TAHER 2024).

2.4.4. Erosion latérale des berges fluviales

L'érosion latérale des berges fluviales est généralement présente dans la partie moyenne et aval des bassins. Elle se caractérise par le recul progressif des rives des cours d'eau sous l'effet des forces hydrodynamiques régulières ou violentes (lors des inondations). Ce processus modifie le tracé des rivières et peut entraîner des pertes de terres agricoles, la déstabilisation des infrastructures et une augmentation des apports sédimentaires dans les eaux fluviales.

Ce type d'érosion résulte principalement de l'action du courant qui fragilise les berges, du batillage provoqué par les vagues et les crues successives qui augmentent l'instabilité des sols des rivières. Il est étroitement lié au volume et à la vitesse de l'eau, ainsi que la composition du sol : les sols sableux ou limoneux sont plus vulnérables que les berges consolidées par une végétation dense ou des formations rocheuses.

Les conséquences de l'érosion latérale sont multiples. Elle contribue à l'élargissement des lits fluviaux, modifie les écosystèmes aquatiques en augmentant la turbidité de l'eau et peut causer l'effondrement des berges, et par conséquent l'affectation des activités humaines situées à proximité.



Figure 9: Photo montrant les formes d'érosion latérale des berges fluviales.

2.5. Erosion éolienne

L'érosion éolienne (Fig. 9) correspond au détachement, au transport et au dépôt des particules de sol sous l'action du vent. Elle se manifeste principalement dans les régions arides et semi-arides, où les précipitations annuelles sont généralement inférieures à 600 mm et où de longues périodes de sécheresse favorisent le dessèchement des sols. Toutefois, ce phénomène peut également se produire dans les régions plus humides lorsque des épisodes secs coïncident avec des sols fortement travaillés ou dépourvus de couverture végétale.

L'intensité de l'érosion éolienne dépend à la fois des caractéristiques du vent et des propriétés du sol. Les sols les plus vulnérables sont ceux dont les particules sont peu cohésives, notamment les sols riches en limons et en sables fins, pauvres en matière organique et présentant une faible stabilité structurale. Lorsque la vitesse du vent dépasse un seuil critique, généralement de l'ordre de 20 km/h (environ 6 m/s) sur un sol sec, les particules superficielles sont arrachées puis transportées sur des distances variables par suspension, saltation ou reptation.

La couverture végétale joue un rôle essentiel dans la protection des sols contre l'action du vent. Les pratiques telles que le surpâturage, la déforestation ou le travail intensif du sol réduisent cette protection naturelle, augmentent l'exposition des surfaces au vent et favorisent la désagrégation de la structure du sol. Comme pour l'érosion hydrique, l'érosion éolienne enlève en priorité la couche superficielle la plus fertile, riche en matière organique et en éléments nutritifs, ce qui entraîne une diminution de la fertilité des sols, une baisse de la productivité agricole et, dans les cas les plus sévères, une accélération des processus de désertification.

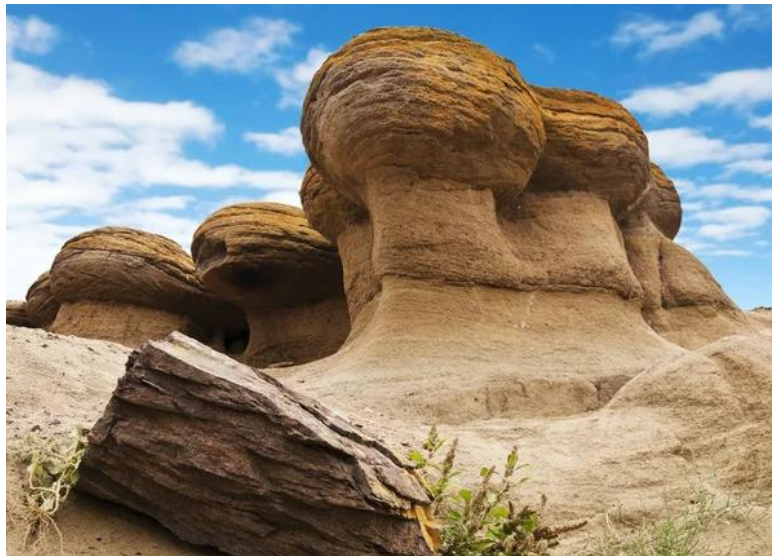


Figure 10: Photo montrant les formes d'érosion éoliennes (© Vadyuhin)

2.5.1. Facteurs de l'érosion éolienne

Le facteur déterminant dans la manifestation de l'érosion éolienne est particulièrement l'intensité érosive de la force du vent, qui agit sur la surface du sol.

- Nature du sol (texture, structure, teneur en M.O) : La texture et la structure du sol interviennent comme facteurs de risque de l'érosion éolienne. Les sols les plus fragiles et les plus sensibles à l'effet de l'érosion éolienne sont les sols sableux. Cependant, certaines particules de faible diamètre peuvent résister à l'action érosive du vent et ce, grâce à leur aptitude à la cohésion.
- La structure du sol est l'arrangement des particules individuelles du sol en agrégats. Les agrégats sont plus lourds que les particules individuelles à être transportées par le vent. Les processus d'agrégation dépendent étroitement des conditions climatiques et des phénomènes mécaniques qui interviennent en surface. La structure se modifie constamment et tout ce qui tend à réduire le degré d'agrégation aggrave par la suite

les risques d'érosion. Moins les sols comportent en surface de matières qui améliorent la structure (matières organiques, fer et alumine libre, calcaire), et plus ces sols sont fragiles.

- La Topographie : agit dépendamment de L'augmentation de la rugosité du terrain par la présence de billons ou des bandes de labour intervient à réduire l'effet de l'érosion éolienne et ce, en agissant comme un obstacle de réduction de la vitesse du vent (donc selon l'orientation par rapport au vent dominant). Aussi, la pierrosité à la surface du sol, en formant un "pavage", réduit les risques d'érosion éolienne. C'est le cas dans les regs.
- Le Couvert végétal : La couverture végétale protégé contre l'érosion éolienne par son action à réduire la vitesse du vent à la surface du sol. La plupart des sols ont besoin une couverture végétale d'au moins de 30% pour prévenir l'action destructrice de l'érosion éolienne. Aussi, à signaler que les chaumes et les résidus de culture étalés sur le sol pourraient représenter une alternative à adopter pour réduire la vitesse du vent au ras du sol.
- L'humidité du sol augmente la cohésion des particules du sol, rendant ceux-ci temporairement indisponibles pour l'arrachage.

2.5.2. Les mécanismes de l'érosion éolienne (Fig. 10)

La saltation

Le mouvement initial des particules du sol est une série de sauts. Le diamètre des particules en saltation est compris entre 0,5 et 1,1 mm. Après avoir sauté, les particules retombent sous l'action de la pesanteur. La partie descendante de la trajectoire est très inclinée vers le sol et pratiquement rectiligne. Peu de particules atteignent une altitude supérieure à 1 m et environ 90 % d'entre elles font des sauts inférieurs à 30 cm. L'amplitude horizontale d'un saut est généralement comprise entre 0,5 et 1 m.

Le phénomène de saltation est indispensable pour amorcer l'érosion éolienne. Il est la cause de deux autres modes de transport des éléments du sol par le vent : la reptation en surface et la suspension dans l'air.

La reptation en surface

Les particules de plus grande dimension roulent ou glissent à la surface du sol. Trop lourdes pour être soulevées, leur mouvement est déclenché par l'impact des particules en saltation plutôt que par l'action du vent. Les particules qui se meuvent ainsi ont des diamètres compris entre 0,5 et 2 mm suivant leur densité et la vitesse du vent.

La suspension

D'une façon générale les fines poussières ne peuvent être emportées que si elles ont été projetées dans l'air par l'impact des grains plus gros. Une fois parvenues dans la couche turbulente elles peuvent être soulevées à de grandes hauteurs par les courants d'air ascendants et former des nuages de poussière atteignant fréquemment des altitudes de 3 à 4.000 mètres. Même si leur aspect peut être impressionnant, le mécanisme essentiel de l'érosion éolienne demeure la saltation car sans elle de tels nuages ne pourraient se produire.

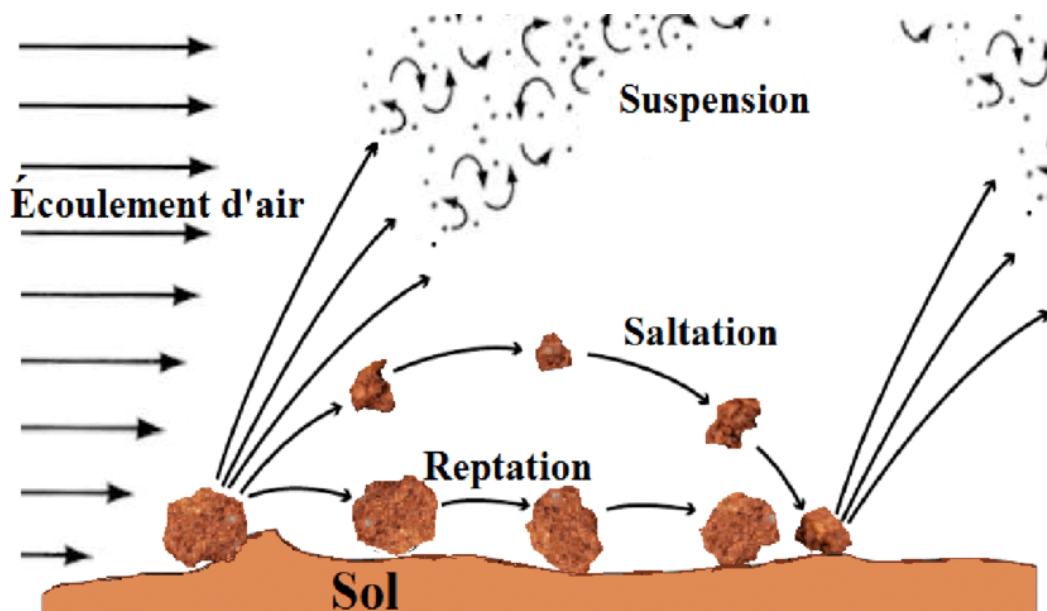


Figure 11: Les mécanismes de l'érosion éolienne

3- Les facteurs de risque de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique résulte de l'interaction de plusieurs facteurs naturels et anthropiques qui déterminent son déclenchement, son intensité et son évolution. Les principaux facteurs responsables de ce phénomène sont :

- Le climat
- La topographie
- La couverture végétale.
- Les facteurs anthropiques

3.1. Le climat

Le climat constitue l'un des principaux facteurs contrôlant les processus d'érosion. Son influence s'exerce principalement à travers les précipitations et le vent, qui sont les principaux agents responsables de l'érosion hydrique et de l'érosion éolienne.

Dans le cas de l'érosion hydrique, les précipitations jouent un rôle déterminant. Leur pouvoir érosif dépend de leur intensité, de leur durée, de leur fréquence et de la quantité totale d'eau tombée. L'impact des gouttes de pluie désagrège les agrégats du sol en particules fines facilement mobilisées par le ruissellement. Ce phénomène favorise également la formation d'une croûte de battance, qui réduit l'infiltration et augmente les écoulements de surface.

L'intensité des précipitations est souvent plus déterminante que leur hauteur totale. Ainsi, une averse orageuse de courte durée mais de forte intensité peut provoquer davantage d'érosion qu'une pluie de faible intensité, même plus abondante. Les précipitations peuvent être distinguées en deux catégories principales : les averses orageuses, brèves mais très intenses, capables de déclencher un ruissellement sur des sols non saturés, et les pluies longues et peu intenses, qui génèrent un ruissellement lorsque le sol est déjà saturé en eau.

Le vent constitue quant à lui le principal agent de l'érosion éolienne. Son pouvoir érosif dépend de sa vitesse, de sa durée, de la rugosité de la surface du sol et de l'absence de couverture végétale. Lorsque la vitesse du vent dépasse un seuil critique, les particules superficielles sont mises en mouvement selon trois modes de transport : la reptation (ou roulement) des particules les plus grosses, la saltation, correspondant à des déplacements par bonds des particules de taille intermédiaire, et la suspension, qui concerne les particules les plus fines pouvant être transportées sur de longues distances.

L'agressivité climatique est fortement amplifiée lorsque les sols sont dépourvus de couverture végétale. Dans ces conditions, les horizons superficiels sont directement exposés à l'action des pluies et du vent, ce qui favorise le détachement des particules, intensifie le ruissellement et accélère la dégradation des sols. Les régions caractérisées par des épisodes de fortes pluies, des vents fréquents ou de longues périodes de sécheresse sont donc particulièrement vulnérables aux phénomènes d'érosion.

3.2. La topographie

La topographie est un facteur déterminant de l'érosion hydrique, car elle contrôle la circulation des eaux de ruissellement et leur pouvoir érosif. Son influence dépend principalement de l'inclinaison, de la longueur et de la forme des versants, qui conditionnent la vitesse des écoulements, leur concentration et leur capacité à arracher et transporter les particules du sol.

Inclinaison de la pente : Plus la pente est forte, plus la vitesse du ruissellement augmente, ce qui accroît l'énergie de l'écoulement et sa capacité à détacher et transporter les sédiments. Toutefois, des phénomènes de ruissellement importants peuvent également se produire sur des pentes faibles lorsque la capacité d'infiltration du sol est limitée. En revanche, les pertes en sol augmentent généralement avec l'inclinaison du terrain.

Longueur de la pente : La longueur du versant influence principalement le volume d'eau qui s'accumule au cours de l'écoulement. Sur les longues pentes, le ruissellement concentré gagne progressivement en débit et en énergie, favorisant le développement de l'érosion linéaire, notamment la formation de rigoles et de ravines. Son effet est en revanche plus limité sur l'érosion en nappe, où les rugosités de la surface du sol freinent l'accélération des écoulements.

Forme de la pente : La géométrie du versant conditionne la répartition des écoulements et des sédiments. Les pentes convexes favorisent l'accélération du ruissellement et l'exportation des matériaux vers l'aval, tandis que les pentes concaves ralentissent les écoulements et favorisent le dépôt des sédiments, conduisant à la formation de sols colluviaux.

Ainsi, la combinaison de l'inclinaison, de la longueur et de la forme des pentes détermine en grande partie l'intensité et le type d'érosion observés sur un versant. Les longues pentes raides, peu protégées par la végétation, sont généralement les plus sensibles à l'érosion hydrique, en particulier lorsque les précipitations sont intenses.

3.3. Le rôle de la végétation

La couverture végétale constitue l'un des facteurs les plus efficaces de protection des sols contre l'érosion. Sa disparition, qu'elle résulte de changements climatiques, de la déforestation, des incendies ou du surpâturage, accroît fortement la vulnérabilité des sols aux processus d'érosion hydrique et éolienne. Cette situation est particulièrement préoccupante

dans les régions arides et semi-arides, où les précipitations sont peu fréquentes mais souvent très intenses, générant des épisodes de ruissellement particulièrement érosifs.

L'absence de végétation expose directement la surface du sol à l'impact des gouttes de pluie et à l'action du vent. Elle favorise ainsi le détachement des particules, augmente le ruissellement et accélère les pertes en sols. À long terme, cette dégradation entraîne une diminution de la fertilité, une baisse de la productivité agricole et une réduction de la capacité de charge des parcours pastoraux.

La végétation joue un rôle essentiel dans la lutte contre l'érosion grâce à plusieurs mécanismes :

- Protection du sol contre l'impact des gouttes de pluie, en interceptant une partie des précipitations et en dissipant leur énergie.
- Réduction du ruissellement de surface, en favorisant l'infiltration de l'eau grâce au système racinaire et à l'amélioration de la porosité du sol.
- Stabilisation des particules du sol, les racines renforçant la cohésion des horizons superficiels et limitant leur détachement.
- Accumulation de matière organique issue des résidus végétaux, ce qui améliore la structure, la stabilité des agrégats, la capacité de rétention en eau et la résistance du sol à l'érosion.

Ainsi, le maintien d'une couverture végétale permanente constitue l'une des mesures les plus efficaces pour limiter l'érosion, préserver la fertilité des sols et assurer une gestion durable des terres.

3.4. Les facteurs anthropiques

Les activités humaines constituent l'un des principaux facteurs d'accélération de l'érosion des sols. Par leurs interventions sur les milieux naturels, elles modifient les conditions de stabilité des sols et augmentent leur vulnérabilité aux agents érosifs. Parmi les principales causes figurent le déboisement, le défrichement, les incendies de végétation, le surpâturage, l'urbanisation, les travaux d'aménagement ainsi que certaines pratiques agricoles inadaptées, telles que le labour intensif, le travail du sol dans le sens de la pente ou l'absence de mesures de conservation.

Ces activités entraînent une réduction, voire une disparition, de la couverture végétale qui protège naturellement le sol. Elles favorisent également la dégradation de la structure du sol, diminuent sa teneur en matière organique et réduisent sa capacité d'infiltration. Il en résulte une augmentation du ruissellement de surface, une intensification du détachement des particules et une accélération des processus d'érosion hydrique et éolienne.

À l'échelle mondiale, l'action de l'homme est responsable d'importantes pertes de terres fertiles, compromettant durablement la productivité agricole, la sécurité alimentaire et le fonctionnement des écosystèmes. La mise en œuvre de pratiques de gestion durable des terres constitue ainsi un enjeu majeur pour limiter la dégradation des sols et préserver cette ressource essentielle.

La croissance démographique et l'intensification des activités humaines exercent une pression croissante sur les ressources naturelles et constituent des facteurs majeurs d'accélération de l'érosion des sols. L'extension des terres cultivées, l'augmentation de la pression pastorale, les incendies de végétation, l'urbanisation et les modifications du réseau de drainage contribuent à la dégradation progressive des sols et des écosystèmes.

Les principales activités humaines favorisant l'érosion sont :

- La mise en culture de terres fragiles ou à fortes pentes, souvent accompagnée de pratiques agricoles inadaptées.
- Le surpâturage, qui réduit la couverture végétale et expose directement le sol aux agents érosifs.
- Les incendies, qui détruisent la végétation protectrice et fragilisent les horizons superficiels.
- La modification des écoulements hydriques, liée aux aménagements, aux réseaux routiers et à l'urbanisation, qui favorise le ruissellement de surface.

Au cours de l'histoire, le développement des sociétés humaines s'est accompagné d'une transformation importante des paysages. Les villes, les routes, les zones industrielles et les surfaces fortement compactées sont généralement peu perméables. Elles limitent l'infiltration des eaux de pluie, augmentent les volumes de ruissellement et favorisent les inondations ainsi que le transport de sédiments et les dépôts de boue en aval.

Par ailleurs, la destruction des forêts, le défrichement, les pratiques agricoles intensives et la surexploitation des parcours accélèrent la dégradation de la structure des sols, réduisent leur fertilité et augmentent leur sensibilité à l'érosion. Une gestion durable des terres, fondée sur la conservation de la couverture végétale et l'adoption de pratiques agricoles adaptées, est donc indispensable pour limiter l'impact des activités humaines sur les processus érosifs.

4- Les conséquences de l'érosion hydrique

4.1. Conséquences sur le sol

L'érosion hydrique entraîne une dégradation progressive des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. En éliminant la couche arable, elle emporte une grande partie de la matière organique, des éléments nutritifs et des particules fines, qui sont les principaux supports de la fertilité. Cette perte réduit la disponibilité des nutriments essentiels à la croissance des plantes et diminue progressivement le potentiel de production des terres agricoles.

Sur le plan physique, l'érosion modifie la structure du sol en réduisant sa porosité et sa perméabilité. La formation de croûtes de battance et le colmatage des pores limitent l'infiltration de l'eau, favorisent le ruissellement de surface et diminuent la recharge des réserves en eau du sol. En conséquence, les sols deviennent plus sensibles au stress hydrique pendant les périodes sèches, ce qui affecte le développement des cultures et accroît leur vulnérabilité aux sécheresses.

À long terme, la dégradation continue des propriétés du sol peut conduire à une baisse importante de la productivité agricole, à une diminution de la biodiversité du sol et, dans les cas les plus sévères, à une perte durable de la capacité de production des terres.

4.2. Influence sur le régime des eaux

L'érosion hydrique modifie profondément le régime hydrologique des bassins versants en perturbant les processus d'infiltration et de ruissellement. La dégradation de la structure du sol et la formation de croûtes de battance réduisent la capacité d'infiltration, limitant ainsi la recharge des nappes phréatiques. Cette diminution de la recharge entraîne une baisse du niveau des eaux souterraines et peut provoquer le tarissement des sources ainsi qu'une réduction du débit des cours d'eau pendant la saison sèche. À l'inverse, lors des épisodes pluvieux, une plus grande proportion des précipitations s'écoule en surface, ce qui augmente

rapidement les débits des rivières et favorise l'apparition de crues soudaines, parfois particulièrement destructrices.

L'augmentation du ruissellement s'accompagne également d'un transport important de sédiments vers les cours d'eau et les retenues hydrauliques, contribuant à leur envasement, à la dégradation de la qualité de l'eau et à une réduction de la capacité de stockage des barrages. Ainsi, l'érosion hydrique perturbe durablement le fonctionnement hydrologique des bassins versants et accroît les risques d'inondation et de pénurie d'eau selon les saisons.

4.3. Dégradation des infrastructures

L'érosion hydrique exerce également des effets importants sur les infrastructures et les aménagements humains. Les eaux de ruissellement provoquent le ravinement des talus, l'affouillement des fondations et l'instabilité des ouvrages, entraînant une dégradation progressive des routes, des voies de communication, des ponts et des autres infrastructures.

Lors des épisodes de fortes précipitations, les phénomènes de ruissellement et de glissements de terrain peuvent interrompre temporairement la circulation en endommageant les chaussées, en provoquant des coupures de routes ou en fragilisant les ouvrages d'art. Ces dommages nécessitent des travaux de réparation et de stabilisation souvent coûteux, mobilisant des ressources financières importantes pour les collectivités territoriales.

Au-delà des pertes économiques, la dégradation des infrastructures perturbe les activités socio-économiques, limite l'accessibilité de certaines régions et accroît la vulnérabilité des populations face aux aléas hydrologiques. La mise en œuvre de mesures de protection des versants et de gestion des eaux de ruissellement constitue donc un élément essentiel pour réduire les impacts de l'érosion sur les infrastructures.

4.4. Envasement des barrages

L'envasement des barrages constitue l'une des principales conséquences de l'érosion hydrique et représente un défi majeur pour la gestion durable des ressources en eau. Le transport des sédiments par les cours d'eau entraîne leur accumulation dans les retenues, réduisant progressivement leur capacité de stockage, leur efficacité et leur durée de vie.

Ce phénomène est particulièrement marqué dans les régions montagneuses et semi-arides, où les fortes pentes, la fragilité des sols, les précipitations intenses et la faible couverture végétale favorisent une production importante de sédiments. Les activités humaines, telles

que le déboisement, le surpâturage et les pratiques agricoles inadaptées, accentuent également cette dynamique.

Au Maroc, les zones montagneuses, notamment le Rif, sont les principales sources de sédiments. Malgré leur superficie relativement limitée, elles contribuent à une part importante des apports solides vers les barrages. L'accumulation annuelle de plusieurs millions de tonnes de sédiments entraîne une diminution progressive de la capacité de stockage des retenues, réduit la disponibilité des ressources en eau et compromet le fonctionnement des ouvrages hydrauliques. Cette situation a également des répercussions économiques et environnementales importantes, notamment la perte de terres agricoles, l'augmentation des coûts de gestion des barrages et la réduction de la disponibilité en eau pour l'irrigation, l'alimentation en eau potable et la production d'énergie hydroélectrique.



Figure 12: Développement d'une végétation dense dans la retenue du barrage Mohammed Ben Abdelkrim El Khattabi en raison de l'envasement (© M. TAHER 2026).

Le barrage Mohamed Ben Abdelkrim El Khattabi (MBAK) constitue un exemple représentatif des conséquences de l'envasement des retenues hydrauliques dans le nord du Maroc. Mis en service en 1981, il joue un rôle important dans la mobilisation des ressources en eau destinées à l'alimentation en eau potable, à l'irrigation et à d'autres usages dans la province d'Al Hoceima. Son bassin versant, caractérisé par un relief accidenté, un ravinement prononcé, une faible couverture végétale et des crues torrentielles, produit d'importantes quantités de sédiments qui accélèrent l'envasement de la retenue. Cette accumulation réduit progressivement sa capacité de stockage et compromet son efficacité à long terme.

Afin de limiter les apports solides, plusieurs programmes d'aménagement des bassins versants ont été mis en œuvre, associant des actions de reboisement, de conservation des sols et de gestion intégrée des ressources en eau. Malgré ces interventions, les apports sédimentaires demeurent importants. Pour renforcer la sécurité hydrique de la région, les pouvoirs publics ont diversifié les sources d'approvisionnement en eau à travers la mobilisation des eaux souterraines de la nappe de Ghiss–Nekor, la mise en service d'une station de dessalement d'eau de mer, ainsi que la construction du barrage Oued Ghiss, destiné à compléter les ressources disponibles et à compenser la diminution progressive de la capacité du barrage Mohamed Ben Abdelkrim El Khattabi.

5- Mesures de lutte contre l'érosion hydrique

La lutte contre l'érosion hydrique repose sur un ensemble de mesures préventives et correctives visant à protéger les sols, réduire le ruissellement, limiter le transport des sédiments et préserver les ressources en eau. Ces actions doivent être mises en œuvre à l'échelle du bassin versant afin de traiter les causes de l'érosion et d'assurer une gestion durable des terres.

Le maintien d'une **couverture végétale permanente** constitue l'une des méthodes les plus efficaces pour limiter l'érosion. La reforestation, la restauration des parcours dégradés, l'enherbement et la préservation des forêts permettent de protéger le sol contre l'impact des gouttes de pluie, d'améliorer l'infiltration de l'eau, de stabiliser les versants grâce au système racinaire et de réduire le ruissellement.

Les **pratiques agricoles de conservation** jouent également un rôle majeur dans la protection des sols. Parmi les techniques les plus utilisées figurent la culture en courbes de niveau, les rotations culturales, l'agroforesterie, le semis direct, le maintien des résidus de culture ainsi que les apports de matière organique. Ces pratiques améliorent la structure du sol, augmentent sa capacité d'infiltration et réduisent sa sensibilité à l'érosion.

Les **aménagements mécaniques et hydrauliques** complètent ces mesures biologiques. La construction de terrasses, de banquettes, de murettes en pierres sèches, de seuils antiérosifs, de gabions, de fascines et d'ouvrages de correction torrentielle permet de ralentir les écoulements, de retenir les sédiments et de stabiliser les ravines et les berges des cours d'eau.

Ces ouvrages sont particulièrement adaptés aux zones de montagne et aux bassins versants fortement dégradés.

Enfin, une lutte efficace contre l'érosion hydrique nécessite une gestion intégrée des bassins versants, associant les actions de conservation des sols, la protection des ressources forestières, une gestion raisonnée des parcours et la sensibilisation des populations aux bonnes pratiques d'utilisation des terres. La combinaison de ces approches permet de réduire durablement les pertes en sols, de préserver la fertilité des terres agricoles, de limiter l'envasement des barrages et de protéger les ressources en eau.

Stratégies de lutte contre l'envasement des barrages

La lutte contre l'envasement des barrages repose sur une combinaison de mesures préventives et curatives visant à réduire les apports sédimentaires et à préserver la capacité de stockage des retenues. Ces interventions peuvent être mises en œuvre à l'échelle des bassins versants, des cours d'eau ou directement au niveau des ouvrages hydrauliques.

Aménagement des bassins versants

La stratégie la plus durable consiste à agir en amont des barrages en limitant la production de sédiments à la source. Les actions de conservation des sols, telles que la reforestation, la restauration des parcours dégradés, les aménagements antiérosifs, les terrasses, les seuils de correction torrentielle et la protection des berges, réduisent le ruissellement et limitent le transport des matériaux vers les retenues.

Barrages de décantation

La construction de barrages de décantation ou de retenues collinaires en amont des grands barrages permet de piéger une partie des sédiments transportés par les cours d'eau. Ces ouvrages jouent un rôle de filtres en favorisant la décantation des particules avant qu'elles n'atteignent la retenue principale, contribuant ainsi à ralentir son envasement.

Gestion des sédiments dans les retenues

Lorsque les sédiments atteignent les barrages, plusieurs techniques permettent d'en limiter l'accumulation. Le soutirage des courants de densité consiste à évacuer les eaux chargées en sédiments à travers les ouvrages de vidange de fond, notamment lors des crues. Cette

méthode réduit les dépôts vaseux tout en limitant les pertes d'eau, contribuant ainsi à prolonger la durée de vie des barrages.

Augmentation de la capacité de stockage

Dans certains cas, la surélévation des digues constitue une solution pour compenser la diminution progressive du volume utile causée par l'envasement. Cette opération permet d'accroître la capacité de stockage des retenues et de prolonger l'exploitation des ouvrages lorsque les conditions techniques et économiques le permettent.

Gestion intégrée des ressources en eau

La lutte contre l'envasement ne peut toutefois pas reposer uniquement sur les interventions réalisées au niveau des barrages. Elle doit s'inscrire dans une stratégie globale de gestion intégrée des ressources en eau, associant la conservation des sols, la protection des bassins versants, le suivi de l'évolution de l'envasement et la diversification des ressources hydriques. Cette approche permet de préserver durablement les capacités de stockage des barrages tout en garantissant la sécurité de l'approvisionnement en eau face aux effets conjugués de l'érosion hydrique et du changement climatique.

6- Equation universelles des pertes de sol (USLE)

L'équation universelle des pertes en sol (USLE) est un modèle à échelle réelle élaboré en 1960 et mis à jour en 1978 par WISCHMEIER et SMITH du ministère de l'agriculture des Etats-Unis.

L'USLE prévoit le taux moyen annuel d'érosion à long terme sur la pente d'un champ en fonction de la configuration des pluies de type de sol, de la topographie, de l'assolement et des pratiques de gestion des cultures.

$$A = R.K.LS.C.P$$

A : la perte de terre prévue par unité de surface.

R : facteur d'érosivité des pluies (indice d'agressivité climatique).

K : facteur d'érodibilité (Indice Sol).

LS : facteur topographie (indice de pente).

C : facteur du couvert végétal (indice culture), c'est le rapport des pertes d'une terre cultivée dans les conditions bien définies à celles d'une jachère continuellement travaillée ou $C=1$.

P : facteur lié à la gestion des terres et aux pratiques antiérosives (indice de conservation de l'eau et du sol).

Il existe un grand nombre de recherches dédiées à la révision et à la modification du modèle USLE :

- MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation)
- RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)

Etude de cas (1) : Estimation des zones sensibles à l'érosion hydrique par l'intégration de l'équation universelle des pertes en sol (USLE) et des systèmes d'information géographique (SIG) : application au barrage et au bassin versant du Ghiss (Nord-Est du Maroc).

L'article est disponible à l'adresse suivante :

<https://www.gaee.agh.edu.pl/gaee/article/view/230/104>

Etude de cas (2) : Analyse comparative des méthodes quantitatives et qualitatives d'évaluation de l'érosion hydrique des sols : application au bassin versant de Boudinar (Nord-Est du Maroc).

L'article est disponible à l'adresse suivante :

https://ajas.uoanbar.edu.iq/article_189368_53496c60a8461b4c072477c9278d9c4a.pdf

Conclusion

L'érosion hydrique constitue l'un des principaux processus de dégradation des sols à l'échelle mondiale. Sous l'action combinée des précipitations, du ruissellement, de la topographie, des caractéristiques des sols, de la couverture végétale et des activités humaines, elle entraîne le détachement, le transport et le dépôt des particules, provoquant une perte progressive de la couche arable et une diminution de la fertilité des terres.

Les conséquences de ce phénomène dépassent largement le cadre agricole. L'érosion hydrique perturbe le régime des eaux en réduisant l'infiltration et la recharge des nappes souterraines, favorise les crues et les inondations, dégrade les infrastructures, accélère

l'envasement des barrages et compromet la disponibilité des ressources en eau. Dans les régions méditerranéennes et semi-arides, comme le nord du Maroc, ces impacts sont particulièrement marqués en raison de la combinaison de fortes pentes, de précipitations parfois intenses, de la fragilité des formations géologiques et des pressions exercées par les activités humaines.

Face à ces enjeux, la lutte contre l'érosion hydrique doit privilégier une approche intégrée à l'échelle des bassins versants. La protection et la restauration de la couverture végétale, l'adoption de pratiques agricoles de conservation, les aménagements antiérosifs, la gestion durable des ressources naturelles et les techniques de réduction de l'envasement des barrages constituent des leviers essentiels pour limiter les pertes en sols et préserver les infrastructures hydrauliques.

Dans un contexte marqué par le changement climatique, l'augmentation de la demande en eau et la dégradation croissante des terres, la maîtrise de l'érosion hydrique représente un enjeu majeur pour le développement durable. Une gestion intégrée des bassins versants, fondée sur la prévention, la conservation des sols et la mobilisation durable des ressources en eau, demeure la stratégie la plus efficace pour protéger les écosystèmes, assurer la sécurité hydrique et garantir la pérennité des activités agricoles et socio-économiques.

CHAPITRE II : GLISSEMENT DE TERRAIN

1- Qu'est-ce qu'un glissement de terrain ?

Les géologues, les ingénieurs et les autres spécialistes utilisent souvent des définitions légèrement différentes du glissement de terrain, en fonction de leur domaine d'expertise. Cette diversité reflète la complexité des processus impliqués dans l'étude des mouvements de versant. De manière générale, un glissement de terrain désigne le déplacement vers le bas d'une pente de matériaux tels que le sol, les roches ou les débris organiques sous l'effet de la gravité. Ce terme désigne également la forme de relief créée par ce déplacement (voir la Figure 13 pour un exemple de glissement de terrain).



Figure 13: Ce glissement de terrain s'est produit à La Conchita, en Californie (États-Unis), en 2005. Il a causé la mort de dix personnes. (Photographie : Mark Reid, U.S. Geological Survey.)

Les glissements de terrain peuvent être classés selon différents critères, notamment les mécanismes de rupture de la pente, la nature des matériaux impliqués et les caractéristiques du mouvement. Chaque type de glissement présente des propriétés spécifiques qui seront abordées dans les sections suivantes.

Plusieurs expressions sont employées comme synonymes de glissement de terrain, telles que mouvement de masse, instabilité de versant ou rupture de pente. Bien que ces termes soient

souvent utilisés de manière interchangeable, ils peuvent présenter des nuances selon le contexte scientifique ou technique.

Quelle que soit la définition retenue ou le type de glissement étudié, il est essentiel de connaître les principales parties qui composent un glissement de terrain. La Figure 2 présente la position ainsi que la terminologie des différents éléments caractéristiques d'un glissement de terrain, facilitant ainsi la compréhension de sa géométrie et de son fonctionnement.

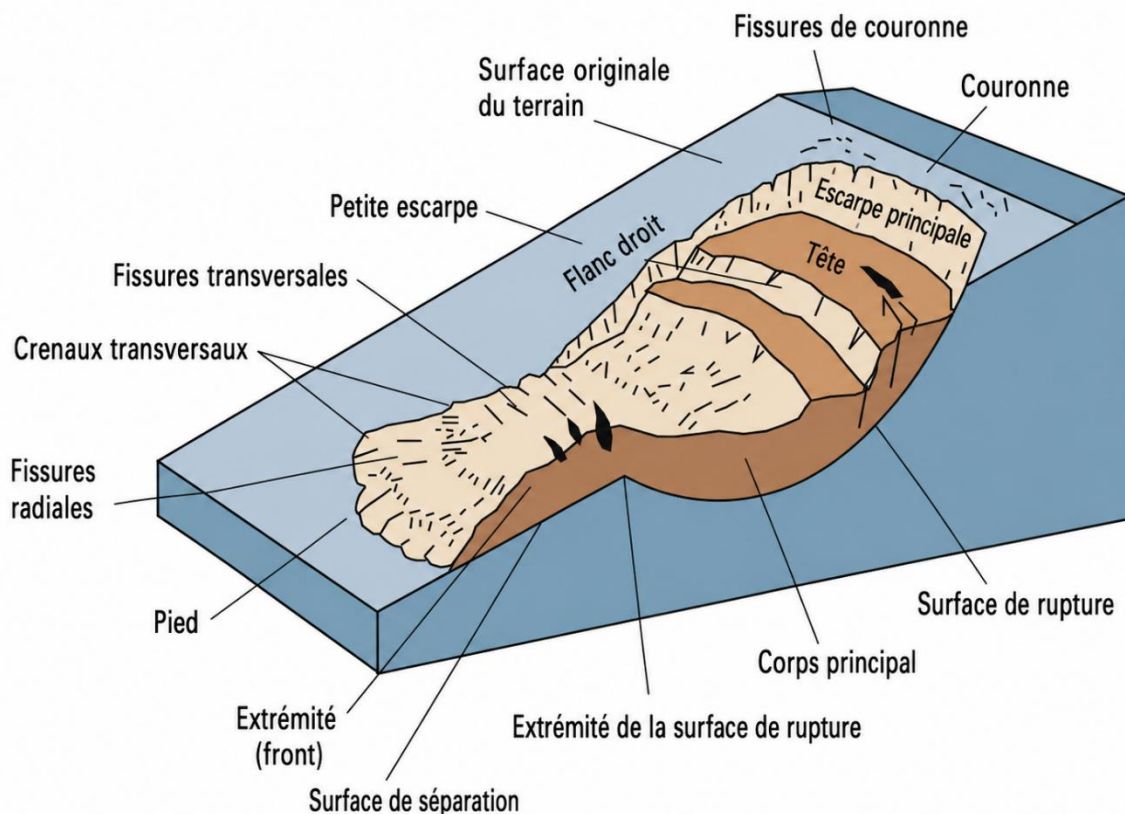


Figure 14: Illustration schématique d'un glissement de terrain rotationnel évoluant en coulée de terre. Les différentes parties du glissement sont identifiées selon la nomenclature proposée par Varnes (1978).

2- Les principaux types de glissements de terrain

Un glissement de terrain est un mouvement gravitaire de masses rocheuses, de sols ou d'un mélange des deux, se produisant le long d'une surface de rupture. Cette surface peut être courbe, dans le cas d'un glissement rotationnel, ou plane, dans le cas d'un glissement translationnel. Au cours de ce mouvement, la masse déplacée conserve généralement une structure cohérente ou semi-cohérente, avec une déformation interne relativement limitée.

Toutefois, dans certaines situations, un glissement de terrain peut évoluer vers d'autres types de mouvements au cours de son déplacement. Les caractéristiques mécaniques des matériaux

peuvent en effet se modifier progressivement, entraînant une transformation du phénomène, par exemple d'un glissement en une coulée de débris ou une coulée de boue.

Cette section présente les différents types de glissements de terrain ainsi que leurs principales caractéristiques. L'identification du type de mouvement dominant constitue une étape essentielle pour l'évaluation des aléas. Elle permet d'estimer la vitesse potentielle du déplacement, le volume des matériaux mobilisés, la distance de propagation, les dommages susceptibles d'être engendrés ainsi que les mesures de prévention et de protection les plus adaptées.

Les glissements de terrain sont généralement classés selon deux critères fondamentaux :

- la nature des matériaux mobilisés ;
- le mode de déplacement de la masse instable.

Les matériaux peuvent être constitués de roches, de sols ou d'un mélange des deux. Lorsque les matériaux sont principalement composés de particules fines (limons, argiles et sables), on parle de terre. Lorsqu'ils sont dominés par des éléments grossiers (blocs, galets, graviers), ils sont qualifiés de débris.

Le mode de déplacement correspond au mécanisme de rupture et de déplacement de la masse. Les principaux types de mouvements sont :

- La chute (Fall)
- Le basculement (Topple)
- Le glissement (Slide)
- L'étalement latéral (Spread)
- La coulée (Flow)

La désignation d'un mouvement de terrain associe généralement le type de matériau et le type de mouvement. On obtient ainsi des termes tels que :

- Chute de blocs (Rockfall)
- Glissement rocheux (Rock Slide)
- Glissement de terre (Earth Slide)
- Coulée de débris (Debris Flow)

- Coulée de boue (Mud Flow)

Dans de nombreux cas, un même phénomène combine plusieurs mécanismes successifs ou simultanés. On parle alors de glissement complexe, par exemple un glissement rocheux évoluant en coulée de débris (Rock Slide–Debris Flow).

Dans ce cours, le terme type de glissement de terrain est utilisé comme synonyme de type de mouvement. Chaque catégorie peut ensuite être subdivisée en fonction de critères plus spécifiques, tels que la géométrie de la surface de rupture, la vitesse du déplacement, la nature des matériaux ou encore le degré de déformation interne de la masse en mouvement.

2.1. Les chutes (Falls)

Une chute est un mouvement gravitaire caractérisé par le détachement soudain de blocs rocheux, de sols ou d'un mélange des deux à partir d'une pente très raide ou d'une falaise. Le détachement s'effectue le long d'une surface de rupture sur laquelle il n'y a pratiquement pas de déplacement par cisaillement. Après leur séparation, les matériaux descendent principalement par chute libre, puis peuvent rebondir ou rouler sur la pente sous l'effet de la gravité.

Chute de blocs (Rockfall)

La chute de blocs est l'un des mouvements de terrain les plus fréquents dans les reliefs rocheux. Elle correspond au détachement brutal de blocs rocheux ou de matériaux meubles depuis une paroi escarpée ou une falaise. Après l'impact sur la pente, les blocs peuvent se fragmenter, rebondir à plusieurs reprises ou rouler sur de longues distances jusqu'à atteindre une zone de faible pente où ils s'immobilisent.

Répartition et ampleur du phénomène

Les chutes de blocs sont observées dans de nombreuses régions du monde, principalement sur les falaises, les versants très escarpés, les parois rocheuses, les vallées encaissées, les berges rocheuses des cours d'eau ainsi que les falaises littorales.

Le volume des matériaux mobilisés est très variable. Il peut s'agir d'un simple bloc de quelques décimètres cubes ou, à l'inverse, de masses rocheuses atteignant plusieurs milliers de mètres cubes.

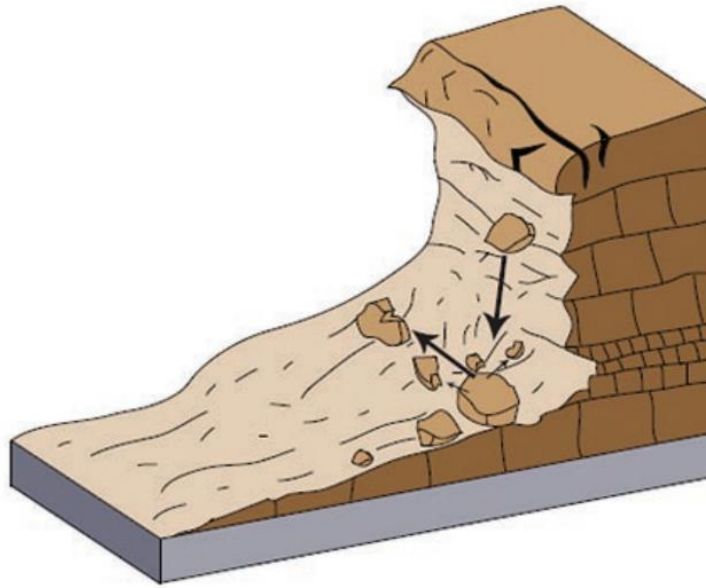


Figure 15: Schéma d'une chute de blocs (Rockfall).



Figure 16: Chute d'un bloc rocheux sur la rocade méditerranéenne (M. TAHER 2026)

Vitesse de déplacement

Les chutes de blocs figurent parmi les mouvements de terrain les plus rapides. Le déplacement est généralement :

Très rapide à extrêmement rapide en chute libre.

Suivi d'une phase de rebond et/ou de roulement sur la pente.

La vitesse de roulement dépend principalement de la pente, de la rugosité du terrain et de la taille des blocs.

Facteurs déclenchants

Les principaux facteurs susceptibles de provoquer une chute de blocs sont :

- L'érosion à la base des versants par les rivières, les torrents ou les vagues.
- L'altération physique et chimique des roches, notamment les cycles de gel-dégel.
- Les précipitations intenses et l'infiltration de l'eau dans les fractures.
- Les séismes et autres vibrations importantes.
- Les activités humaines telles que les excavations, les travaux routiers, les carrières ou les tirs de mines.

Conséquences

Les chutes de blocs représentent un aléa majeur en raison de leur vitesse élevée et de leur caractère imprévisible. Elles peuvent entraîner :

- Des pertes humaines.
- La destruction de bâtiments et d'infrastructures.
- L'endommagement des routes, des voies ferrées et des ouvrages d'art.
- L'interruption de la circulation.
- Des dommages importants aux véhicules frappés par les blocs.

Mesures de prévention et de protection

Plusieurs techniques permettent de réduire le risque lié aux chutes de blocs :

- Installation de filets et grillages pare-blocs.
- Mise en place de barrières ou écrans pare-blocs.
- Construction de murs de soutènement ou de merlons de protection.
- Purge des blocs instables avant qu'ils ne se détachent naturellement.
- Stabilisation des falaises par boulonnage, ancrages, clouage ou béton projeté lorsque cela est nécessaire.

- Surveillance des zones instables et installation d'une signalisation adaptée.
- Limitation ou interdiction du stationnement et de la circulation dans les secteurs fortement exposés.



Figure 17: Construction de murs de soutènement dans les secteurs de la rocade méditerranéenne les plus exposés aux chutes de blocs rocheux (M. TAHER 2026)

Prévisibilité

L'évaluation de la prévisibilité des chutes de blocs repose principalement sur l'identification et la cartographie des secteurs potentiellement instables. Dans plusieurs régions du monde, des cartes d'aléa de chute de blocs ont été élaborées afin de délimiter les zones les plus exposées.

Des modèles numériques et des méthodes de calcul permettent aujourd'hui de simuler les trajectoires, les rebonds et les distances de propagation des blocs rocheux. Ces outils facilitent la délimitation des zones susceptibles d'être affectées par les chutes de blocs et contribuent à la conception des ouvrages de protection.

Plusieurs indices de terrain permettent d'identifier un risque imminent de chute de blocs, notamment :

- La présence de surplombs rocheux.
- Des roches fortement fracturées, diaclasées ou très altérées.
- Des falaises et versants très escarpés soumis à une altération active.
- Des secteurs exposés à des cycles répétés de gel-dégel, favorisant l'ouverture des fractures et le détachement des blocs.

- Les talus artificiels, notamment les fronts de carrière, les tranchées routières et ferroviaires, qui présentent souvent une stabilité réduite.

La reconnaissance de ces indicateurs constitue une étape essentielle dans l'évaluation du risque et la mise en œuvre de mesures de surveillance ou de stabilisation.

Les Figures 3 et 4 présentent respectivement un schéma explicatif et une photographie illustrant un phénomène de chute de blocs (Rockfall).

2.2. Basculement (Topple)

Le basculement est un mouvement gravitaire caractérisé par la rotation vers l'avant d'un volume de sol ou de roche autour d'un point ou d'un axe situé sous le centre de gravité de la masse déplacée. Ce phénomène est généralement provoqué par l'action de la gravité exercée par les matériaux situés en amont de la masse instable. Il peut également être favorisé par la présence d'eau ou de glace dans les fissures, qui réduit la stabilité du massif. Les mouvements de basculement peuvent concerner des blocs rocheux, des débris grossiers ou des matériaux fins, et se présentent parfois sous des formes complexes ou composites.

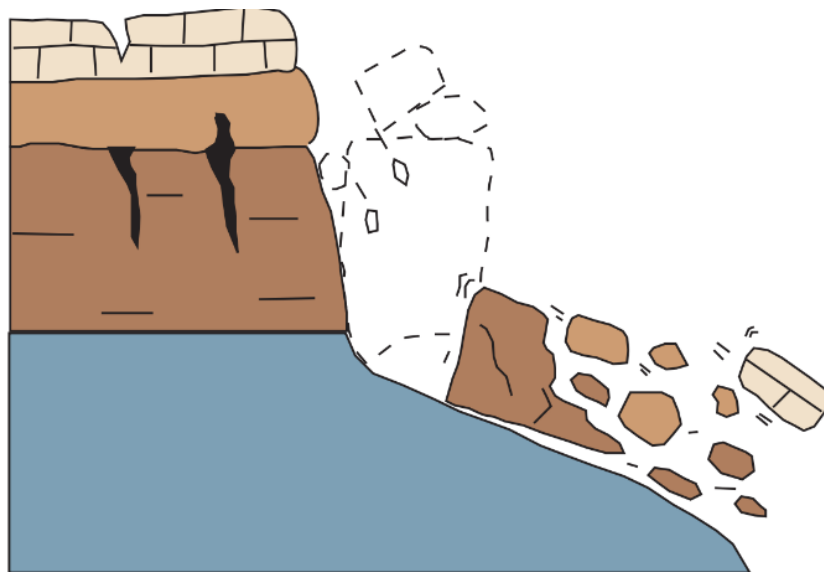


Figure 18: Schéma d'un basculement (Topple).

Occurrence

Le basculement est observé dans de nombreuses régions du monde. Il est particulièrement fréquent dans les terrains volcaniques présentant une structure en colonnes (prismation volcanique), ainsi que le long des vallées fluviales et des cours d'eau où les berges sont abruptes et fortement inclinées.



Figure 19: Orthophoto UAV d'un paysage volcanique de Tiztoutine – Province de Nador- caractérisé par le basculement gravitaire des blocs (M. TAHER 2026)

Vitesse de déplacement

La vitesse du mouvement peut varier d'extrêmement lente à extrêmement rapide. Dans certains cas, elle augmente progressivement au cours du déplacement en fonction de la distance parcourue et de l'évolution des conditions de stabilité.

Mécanismes déclencheurs

Le basculement est principalement déclenché par :

- La gravité exercée par les matériaux situés en amont de la masse instable.
- La présence d'eau ou de glace dans les fractures et les discontinuités.
- Les vibrations d'origine naturelle ou anthropique.
- Le sous-creusement de la base du versant.
- L'altération différentielle des matériaux.
- Les travaux d'excavation.
- L'érosion fluviale ou torrentielle.

Effets (directs et indirects)

Les mouvements de basculement peuvent engendrer des dommages considérables, en particulier lorsque la rupture se produit de manière brutale et que la vitesse de déplacement est élevée. Ils représentent une menace importante pour les infrastructures, les voies de communication et les personnes situées en contrebas.

Mesures correctives et de stabilisation

Dans les massifs rocheux, plusieurs techniques permettent de stabiliser les secteurs susceptibles au basculement. Les méthodes les plus couramment utilisées comprennent :

- Les boulons d'ancrage (rock bolts).
- Les ancrages mécaniques ou câblés.
- Les systèmes de soutènement adaptés.

La maîtrise des infiltrations d'eau constitue également une mesure essentielle, car l'eau contribue fortement à la diminution de la stabilité des versants. Ainsi, la mise en place de systèmes de drainage appropriés est souvent recommandée pour limiter les pressions interstitielles et améliorer la stabilité du massif.

Prévisibilité

Les mouvements de basculement font rarement l'objet de cartes de susceptibilité spécifiques, bien que des inventaires existent dans certaines régions. La surveillance des zones potentiellement instables est fortement recommandée. Parmi les techniques de suivi, l'utilisation d'inclinomètres de basculement (tiltmeters) permet de mesurer les variations d'inclinaison des versants, notamment à proximité des fissures et des secteurs présentant les plus importants déplacements verticaux. Des systèmes d'alerte précoce fondés sur ces mesures peuvent contribuer efficacement à la prévention des risques.

2.3. Glissements (Slides)

Un glissement est un mouvement gravitaire caractérisé par le déplacement d'une masse de sol ou de roche le long d'une ou de plusieurs surfaces de rupture, ou de zones relativement minces soumises à un cisaillement intense. Le mouvement ne se produit généralement pas de manière simultanée sur toute la surface de rupture. Il débute localement avant de s'étendre progressivement à l'ensemble de la masse instable.

2.3.1. Glissement rotationnel (*Rotational Landslide*)

Le glissement rotationnel est un type de glissement dont la surface de rupture est concave vers le haut, généralement en forme de cuillère. Le déplacement de la masse s'effectue par rotation autour d'un axe approximativement parallèle aux courbes de niveau du versant.

Dans certaines conditions, la masse déplacée conserve une cohésion relative et se déplace presque comme un bloc unique, avec une faible déformation interne. La partie supérieure de la masse (tête du glissement) s'abaisse presque verticalement, tandis que la surface du matériau déplacé s'incline vers l'arrière en direction de l'escarpement principal. Lorsque le glissement rotationnel se développe sur plusieurs surfaces de rupture courbes et parallèles, il est appelé slump (affaissement rotationnel).

Occurrence

Les glissements rotationnels se développent principalement dans des matériaux relativement homogènes. Ils sont particulièrement fréquents dans les remblais, les formations argileuses et les dépôts meubles homogènes, ce qui en fait l'un des types de glissements de terrain les plus courants.

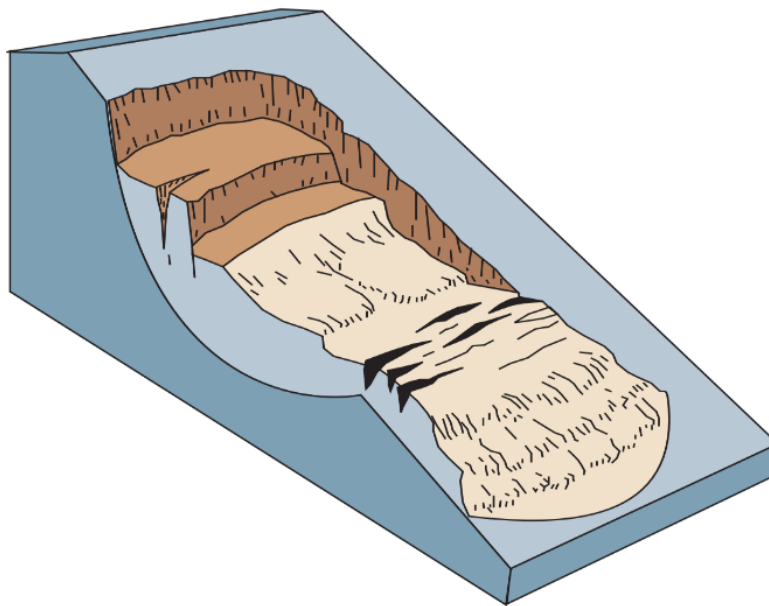


Figure 20: Schéma illustratif d'un glissement rotationnel.

Dimensions et caractéristiques géométriques

Les glissements rotationnels affectent généralement des versants dont la pente est comprise entre 20° et 40° . Dans les sols, la surface de rupture présente habituellement un rapport profondeur/longueur compris entre 0,1 et 0,3, ce qui traduit une rupture relativement profonde.

Vitesse de déplacement

La vitesse de déplacement peut varier considérablement :

- Extrêmement lente : inférieure à 0,3 m tous les cinq ans.
- Modérément rapide : jusqu'à environ 1,5 m par mois.
- Rapide, dans certaines conditions de déstabilisation.

Mécanismes déclencheurs

Les principaux facteurs favorisant le déclenchement d'un glissement rotationnel sont :

- Des précipitations intenses ou prolongées entraînant la saturation des sols.
- Une fonte rapide des neiges.
- L'élévation du niveau des eaux souterraines.
- Les variations rapides du niveau des rivières après une crue.
- La mise en eau de réservoirs provoquant une remontée de la nappe phréatique.
- L'augmentation du niveau des cours d'eau ou des lacs entraînant une érosion du pied du versant.
- Les séismes, qui peuvent provoquer ou accélérer la rupture.

Effets (directs et indirects)

Les glissements rotationnels peuvent provoquer des dommages importants aux bâtiments, aux routes, aux réseaux d'infrastructures et aux ouvrages d'art. Lorsque le déplacement est lent, ils représentent généralement un risque limité pour les personnes, mais les structures situées sur la masse en mouvement peuvent subir d'importantes déformations, basculements ou fissurations.

Les volumes de matériaux mobilisés étant souvent très importants, leur stabilisation définitive est particulièrement difficile. Dans certains cas, ces glissements peuvent obstruer le lit des rivières, entraînant la formation de barrages naturels susceptibles de provoquer des inondations en amont ou des ruptures brutales en aval.

Mesures de prévention et de stabilisation

La gestion du risque associé aux glissements rotationnels repose sur plusieurs mesures complémentaires :

- La mise en place d'une surveillance instrumentée (inclinomètres, extensomètres, piézomètres, systèmes GPS) afin de détecter les déplacements et d'en suivre la vitesse.
- La restauration ou la réhabilitation des réseaux de drainage afin d'éviter l'accumulation d'eau dans la masse instable.
- Le reprofilage et l'aménagement géotechnique des versants pour améliorer leur stabilité.
- La construction de murs de soutènement ou d'ouvrages de retenue au pied du versant, destinés à ralentir ou à dévier le mouvement. Toutefois, ces ouvrages peuvent être dépassés lorsque le volume mobilisé est important ou que le déplacement devient trop rapide.

Prévisibilité

Les glissements rotationnels présentent une forte probabilité de réactivation lorsqu'ils se sont déjà produits par le passé. Les anciens glissements constituent donc des secteurs particulièrement sensibles et doivent faire l'objet d'une surveillance régulière. L'apparition de fissures en tête de versant, notamment à proximité de l'escarpement principal, constitue l'un des principaux indicateurs précurseurs de l'initiation d'un glissement. Le suivi de ces fissures, associé à des dispositifs de surveillance géotechnique, permet de détecter les premiers signes d'instabilité et d'améliorer les systèmes d'alerte précoce.

2.3.2. Glissement translationnel (*Translational Landslide*)

Le glissement translationnel est un mouvement gravitaire dans lequel la masse de terrain se déplace vers le bas et vers l'extérieur le long d'une surface de rupture relativement plane, avec peu ou pas de rotation ni de basculement vers l'arrière. Contrairement aux glissements rotationnels, qui tendent à retrouver un certain équilibre après leur déplacement, les glissements translationnels peuvent parcourir de longues distances lorsque la surface de rupture présente une pente suffisante.

Les matériaux impliqués peuvent être constitués de sols meubles non consolidés, de larges dalles rocheuses, ou d'une combinaison des deux. Ce type de glissement se développe généralement le long de discontinuités géologiques telles que les failles, les diaclases, les plans de stratification ou les interfaces entre le substratum rocheux et les formations superficielles.

Dans les régions froides, le mouvement peut également se produire le long de la couche de pergélisol.

Occurrence

Les glissements translationnels figurent parmi les types de glissements de terrain les plus fréquents à l'échelle mondiale. Ils se rencontrent dans une grande variété de contextes géologiques, géomorphologiques et climatiques.

Dimensions et caractéristiques géométriques

Ces glissements sont généralement moins profonds que les glissements rotationnels. La surface de rupture présente un rapport profondeur/longueur inférieur à 0,1. Leur extension peut varier de petits glissements affectant une parcelle résidentielle à de très grands mouvements régionaux s'étendant sur plusieurs kilomètres.

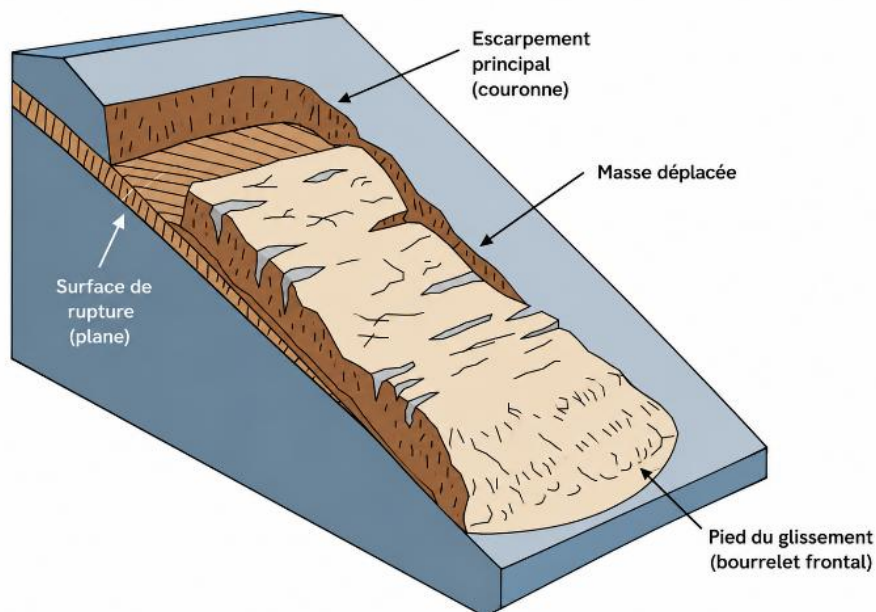


Figure 21: Schéma illustratif d'un glissement translationnel.

Vitesse de déplacement

La vitesse de déplacement est très variable :

- Lente : environ 1,5 m par mois.
- Modérée : environ 1,5 m par jour.

- Très rapide à extrêmement rapide dans certains cas.

Lorsque la vitesse augmente fortement, la masse en mouvement peut se désagréger et évoluer vers une coulée de débris (debris flow).

Mécanismes déclencheurs

Les principaux facteurs déclencheurs sont :

- Les précipitations intenses ou prolongées.
- La remontée du niveau de la nappe phréatique à la suite des pluies.
- La fonte rapide des neiges.
- Les inondations.
- Les infiltrations d'eau dues à l'irrigation ou aux fuites des réseaux de canalisations.
- Les modifications anthropiques du versant, notamment le sous-creusement de sa base.
- Les séismes, qui peuvent également provoquer ce type de glissement.

Effets (directs et indirects)

Les glissements translationnels peuvent initialement évoluer lentement, provoquant des dommages progressifs aux habitations, aux infrastructures routières et aux réseaux de transport ou de services. Toutefois, leur vitesse peut augmenter rapidement, les rendant particulièrement dangereux pour les populations.

Comme les glissements rotationnels, ils peuvent obstruer le lit des rivières et entraîner la formation de barrages naturels susceptibles de provoquer des inondations ou des ruptures catastrophiques.

Mesures de prévention et de stabilisation

La prévention repose principalement sur une bonne maîtrise des écoulements d'eau, afin d'éviter l'augmentation des pressions interstitielles et la réactivation des mouvements existants. Les principales mesures comprennent :

- La mise en place de systèmes de drainage efficaces.
- Le reprofilage et le terrassement des versants.

- L'amélioration des conditions de drainage superficiel et souterrain.
- La construction de murs de soutènement lorsque cela est approprié.

Dans les massifs rocheux, des techniques plus spécialisées peuvent être mises en œuvre, notamment :

- Les ancrages.
- Les boulons de roche (rock bolts).
- Les goujons (dowels).

Ces interventions doivent être conçues et réalisées par des spécialistes en géotechnique. Les glissements translationnels affectant des versants modérément à fortement inclinés demeurent toutefois particulièrement difficiles à stabiliser de manière permanente.

Prévisibilité

Les glissements translationnels présentent une forte probabilité de réactivation dans les secteurs où ils se sont déjà produits, notamment dans les régions soumises à une activité sismique récurrente. L'apparition et l'élargissement progressif de fissures en tête du glissement, ainsi que le gonflement du pied du versant (toe bulge), constituent des indicateurs importants d'une rupture imminente. Une surveillance régulière de ces signes précurseurs permet d'améliorer la détection des instabilités et de renforcer les systèmes d'alerte précoce.

2.4. Étalements (Spreads)

Les étalements sont des mouvements gravitaires caractérisés par l'extension latérale d'une masse cohésive de sol ou de roche, accompagnée de l'affaissement progressif de cette masse fracturée dans un matériau sous-jacent plus meuble et moins résistant. Ces mouvements résultent généralement de la liquéfaction, de l'écoulement ou de l'extrusion de la couche sous-jacente.

Les principaux types d'étalements comprennent les étalements en blocs (block spreads), les étalements par liquéfaction (liquefaction spreads) et les étalements latéraux (lateral spreads).

Étalement latéral (Lateral Spread)

L'étalement latéral se développe généralement sur des terrains faiblement inclinés, voire pratiquement horizontaux, où une couche superficielle relativement rigide de sol ou de roche

se fissure, s'étire et se déplace au-dessus d'une couche sous-jacente plus faible et plus déformable. Ce mouvement s'accompagne souvent d'un affaissement général de la couche supérieure dans le matériau sous-jacent.

Dans les massifs rocheux, le terrain se fracture progressivement et s'écarte de la partie stable, glissant sur la couche inférieure sans nécessairement former une surface de rupture clairement définie. Sous certaines conditions, le matériau sous-jacent, plus mou, peut remonter dans les fissures et diviser la couche supérieure en plusieurs blocs distincts.

Dans les sols, la couche superficielle relativement stable se déplace au-dessus d'un matériau sous-jacent qui s'est liquéfié ou a subi une déformation plastique. Lorsque cette couche faible est suffisamment épaisse, les blocs superficiels peuvent s'affaisser, se translater, pivoter, se fragmenter, se liquéfier ou évoluer vers un écoulement.

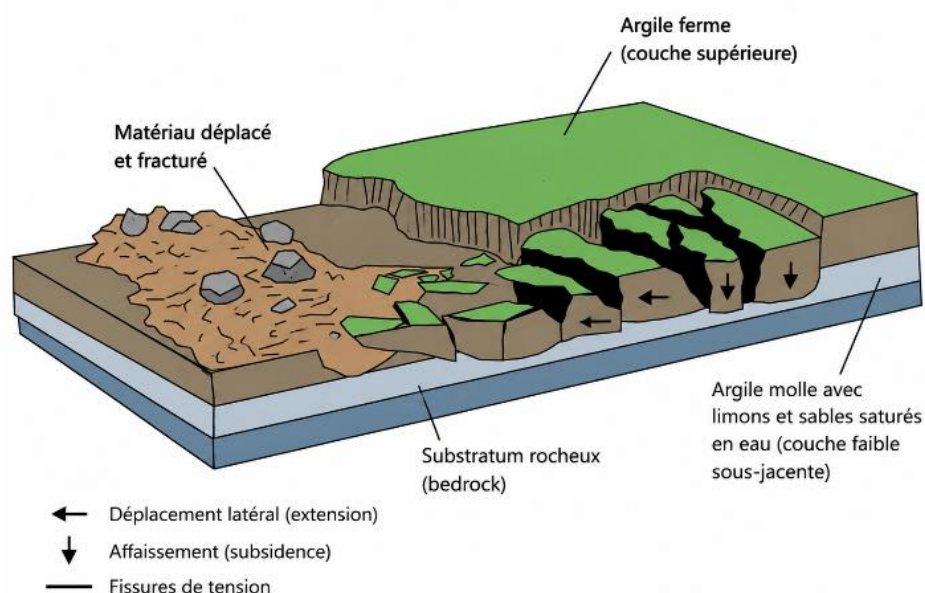


Figure 22: Schéma illustratif d'un étalement latéral (lateral spread). Une couche susceptible de liquéfaction est située sous la couche superficielle.

Occurrence

Les étalements latéraux sont observés dans de nombreuses régions du monde, principalement dans les secteurs où existent des sols susceptibles de se liquéfier. Bien qu'ils soient particulièrement fréquents dans les zones soumises à une forte activité sismique, ils peuvent également se produire dans d'autres contextes géologiques favorables.

Dimensions et caractéristiques

Les zones affectées peuvent être initialement limitées à quelques fissures localisées, avant de s'étendre rapidement sur plusieurs centaines de mètres de largeur lorsque les conditions deviennent favorables à la propagation du mouvement.

Vitesse de déplacement

La vitesse de déplacement varie généralement de lente à modérée, mais peut devenir rapide lorsqu'un facteur déclencheur majeur, comme un séisme, intervient. Après l'événement initial, le terrain peut continuer à s'étendre progressivement, avec des déplacements allant de quelques millimètres par jour à plusieurs dizaines de mètres carrés affectés quotidiennement.

Mécanismes déclencheurs

Les principaux facteurs susceptibles de déstabiliser la couche sous-jacente sont :

- La liquéfaction de la couche inférieure sous l'effet des secousses sismiques.
- Les surcharges naturelles ou anthropiques exercées sur un versant instable.
- La saturation en eau de la couche faible à la suite de fortes précipitations, de la fonte des neiges ou de variations du niveau de la nappe phréatique.
- La liquéfaction d'argiles marines sensibles provoquée par l'érosion de la base d'une berge ou d'un versant.
- La déformation plastique de matériaux instables situés en profondeur, tels que les formations salifères.

Effets (directs et indirects)

Les étalements latéraux peuvent provoquer d'importants dommages aux bâtiments, aux routes, aux voies ferrées et aux réseaux d'infrastructures (eau, gaz, électricité, télécommunications). Leur évolution peut être lente ou rapide selon le degré de saturation des différentes couches du sol. Dans certains cas, ils constituent une phase précurseur pouvant évoluer vers une coulée de terre (earthflow).

Mesures de prévention et de stabilisation

Dans certaines régions, des cartes d'aléa liées à la liquéfaction sont disponibles afin d'identifier les secteurs les plus exposés. Lorsque cela est possible, il est recommandé d'éviter

l'implantation d'infrastructures sur des terrains présentant un fort potentiel de liquéfaction, notamment dans les zones sismiques.

Lorsque la présence d'une nappe phréatique élevée constitue un facteur aggravant, des systèmes de drainage ou de dérivation des eaux peuvent être mis en œuvre afin de réduire la saturation des sols et d'améliorer leur stabilité.

Prévisibilité

Les étalements latéraux présentent une forte probabilité de réapparition dans les secteurs où ils se sont déjà produits. Ils sont particulièrement fréquents dans les régions exposées à un aléa sismique élevé et caractérisées par la présence de sols liquéfiables. Ce phénomène est également associé aux argiles marines sensibles et constitue un problème géotechnique récurrent dans les basses terres du Saint-Laurent, à l'est du Canada.

2.5. Écoulements (Flows)

Les écoulements sont des mouvements gravitaires continus dans lesquels les surfaces de cisaillement sont temporaires, rapprochées les unes des autres et généralement non conservées après le mouvement. La vitesse des différentes parties de la masse en déplacement est comparable à celle d'un fluide visqueux. Dans de nombreux cas, il existe une transition progressive entre les glissements et les écoulements, en fonction de la teneur en eau, de la mobilité des matériaux et de l'évolution du phénomène.

2.5.1. Coulées de débris (Debris Flows)

Les coulées de débris sont des mouvements rapides de matériaux meubles dans lesquels des sols, des blocs rocheux, des débris et parfois de la matière organique se mélangent à de grandes quantités d'eau pour former une masse boueuse qui s'écoule rapidement vers l'aval sous l'effet de la gravité. Elles sont souvent désignées, à tort, sous le terme de coulées de boue, alors qu'elles contiennent généralement une proportion importante de blocs rocheux et de matériaux grossiers.

Dans certains cas, un glissement rotationnel ou translationnel peut évoluer en coulée de débris lorsque sa vitesse augmente, que sa cohésion interne diminue ou que sa teneur en eau devient élevée. Des écoulements secs peuvent également se produire dans des sables non cohésifs (coulées sableuses).

Les coulées de débris représentent l'un des phénomènes gravitaires les plus dangereux en raison de leur vitesse élevée et de leur déclenchement souvent soudain, laissant très peu de temps pour l'évacuation.

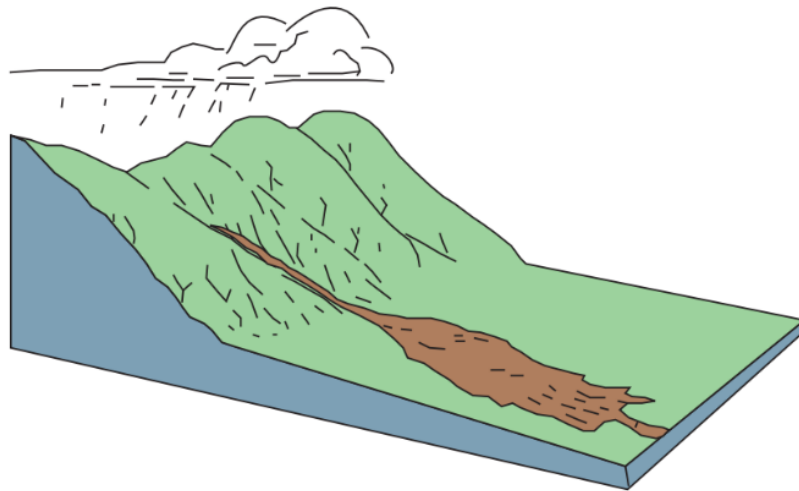


Figure 23: Schéma illustratif d'une coulée de débris (debris flow).

Occurrence

Les coulées de débris sont observées dans toutes les régions du monde. Elles se développent principalement dans les ravins, les chenaux torrentiels et les vallées encaissées présentant de fortes pentes. Leur fréquence augmente dans les secteurs où la couverture végétale a été détruite par les incendies de forêt, la déforestation ou d'autres activités humaines. Elles sont également très fréquentes dans les régions volcaniques caractérisées par des sols peu cohérents.

Dimensions et caractéristiques

Les coulées de débris peuvent être très fluides ou, au contraire, fortement chargées en sédiments et en blocs rocheux. Elles restent généralement confinées aux ravins ou aux chenaux naturels qui favorisent leur déplacement.

L'épaisseur de la masse mobilisée est généralement faible, mais la distance parcourue peut être importante, atteignant parfois plusieurs kilomètres dans les reliefs montagneux. À leur terminaison, les matériaux déposés forment souvent des cônes de déjection (debris fans), de forme triangulaire ou en éventail, qui peuvent eux-mêmes présenter une instabilité résiduelle.

Vitesse de déplacement

La vitesse de déplacement est généralement rapide à extrêmement rapide et peut atteindre environ 56 km/h, selon la pente du versant, la quantité d'eau et la consistance des matériaux transportés.

Mécanismes déclencheurs

Les principaux facteurs déclencheurs sont :

- Les précipitations intenses ou prolongées.
- La fonte rapide du manteau neigeux.
- Les écoulements superficiels concentrés qui érodent et mobilisent les matériaux meubles sur les versants abrupts.
- L'évolution de glissements de terrain préexistants, notamment lorsqu'ils sont presque saturés en eau et riches en limons et en sables.

Effets (directs et indirects)

Les coulées de débris comptent parmi les mouvements de terrain les plus destructeurs. Leur vitesse élevée, leur capacité à transporter des blocs de plusieurs mètres de diamètre ainsi que des troncs d'arbres et d'autres débris leur confèrent un pouvoir destructeur considérable.

Elles peuvent :

- Détruire ou emporter des habitations et des infrastructures.
- Ensevelir rapidement des bâtiments sous d'importantes quantités de sédiments.
- Endommager les routes, ponts et réseaux de transport.
- Provoquer des pertes humaines.
- Dégrader la qualité des eaux par l'apport massif de sédiments et de matières organiques.

Mesures de prévention et de stabilisation

Les coulées de débris sont particulièrement difficiles à empêcher. La prévention repose donc essentiellement sur une gestion appropriée de l'occupation du territoire.

Les principales mesures comprennent :

- Éviter toute construction dans les ravins et vallées présentant un historique de coulées de débris ou une forte susceptibilité.
- Mettre en place des ouvrages de déviation afin d'éloigner les écoulements des zones habitées.
- Construire des bassins de rétention ou des ouvrages de piégeage des matériaux solides.
- Installer des systèmes d'alerte précoce fondés sur les seuils critiques de précipitations.

Lorsque le risque est élevé, l'évacuation préventive des populations, l'évitement des zones exposées et, si nécessaire, la relocalisation des habitations constituent les mesures les plus efficaces pour limiter les pertes humaines.

Prévisibilité

Des cartes d'aléa relatives aux coulées de débris sont disponibles dans certaines régions. Ce phénomène est particulièrement fréquent dans les zones de fortes pentes soumises à des précipitations abondantes, qu'elles soient saisonnières ou ponctuelles. Le risque est encore plus élevé dans les secteurs récemment touchés par des incendies de forêt ou ayant subi une perte importante de leur couverture végétale.

2.5.2. Avalanche de débris (*Debris Avalanche*)

Une avalanche de débris est un mouvement gravitaire de très grande ampleur, extrêmement rapide, qui se produit lorsqu'un versant instable s'effondre brutalement. Les matériaux fragmentés, constitués principalement de roches, de sols et de débris, sont ensuite transportés à grande vitesse sur des versants ouverts. Dans certaines situations, lorsque de la neige, de la glace et une quantité importante d'eau sont impliquées, l'avalanche peut évoluer vers une coulée de débris ou un lahar dans les environnements volcaniques.

Occurrence

Les avalanches de débris sont observées dans les régions montagneuses à fortes pentes partout dans le monde. Elles sont particulièrement fréquentes sur les édifices volcaniques escarpés, où elles empruntent souvent les vallées et les chenaux de drainage.

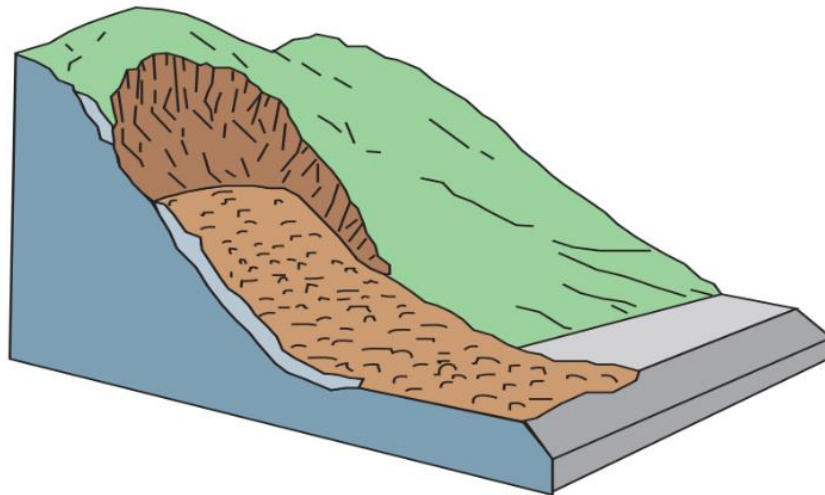


Figure 24: Schéma illustratif d'une avalanche de débris (debris avalanche)

Dimensions et caractéristiques

Les avalanches de débris figurent parmi les plus grands mouvements de terrain connus. Certaines ont transporté des blocs rocheux de plusieurs kilomètres de diamètre sur des distances de plusieurs kilomètres à partir de leur zone de départ.

Vitesse de déplacement

La vitesse de déplacement est rapide à extrêmement rapide et peut atteindre près de 100 m/s (environ 360 km/h), ce qui en fait l'un des phénomènes gravitaires les plus violents.

Mécanismes déclencheurs

On distingue généralement deux catégories d'avalanches de débris :

Les avalanches de débris « froides », qui résultent de l'instabilité d'un versant due à l'altération des roches, à l'effondrement de pentes abruptes ou à la désintégration d'un massif rocheux lors de l'accélération d'un glissement de terrain. Lorsque la cohésion des matériaux diminue fortement, le glissement peut évoluer en avalanche de débris.

Les avalanches de débris « chaudes », directement liées à l'activité volcanique. Elles peuvent être déclenchées par des séismes volcaniques, la remontée de magma ou toute autre activité provoquant une déstabilisation rapide des flancs du volcan.

Effets (directs et indirects)

Les avalanches de débris peuvent parcourir plusieurs kilomètres avant de s'immobiliser ou évoluer vers des lahars ou des coulées de débris plus riches en eau, capables de se propager sur plusieurs dizaines de kilomètres le long des vallées.

Leur passage peut entraîner :

- L'ensevelissement de villages et d'infrastructures.
- La destruction complète des réseaux de transport.
- L'obstruction des cours d'eau.
- La dégradation de la qualité des eaux.
- Des pertes humaines importantes en raison de leur vitesse exceptionnelle et du très faible délai disponible pour l'alerte et l'évacuation.

Mesures de prévention et de stabilisation

Les avalanches de débris ne peuvent généralement pas être arrêtées ni maîtrisées par des ouvrages de génie civil, leurs mécanismes de déclenchement étant difficilement contrôlables.

Les principales mesures de réduction du risque consistent à :

- Eviter l'urbanisation des vallées situées au pied des volcans ou des versants montagneux très instables.
- Mettre en place des systèmes de surveillance et d'alerte en temps réel dans les zones volcaniques actives.
- Élaborer des plans d'évacuation et des cartes d'aléa adaptées.

Toutefois, en raison de la vitesse extrêmement élevée de ces phénomènes, le temps disponible pour évacuer les populations reste souvent très limité.

Prévisibilité

Lorsque des traces d'anciennes avalanches de débris sont identifiées et datées, il est possible d'estimer leur fréquence de récurrence et d'évaluer probabilistiquement le niveau de risque. Dans les régions volcaniques, la probabilité d'occurrence augmente sensiblement durant les périodes d'activité éruptive, ce qui justifie le renforcement de la surveillance et l'application de mesures préventives spécifiques.

2.5.3. Coulée de terre (Earthflow)

Une coulée de terre est un mouvement gravitaire qui se développe généralement sur des versants à pente faible ou modérée. Elle affecte principalement des sols fins, riches en argiles ou en limons, ainsi que des roches fortement altérées contenant une proportion importante de minéraux argileux.

La masse mobilisée se déplace sous la forme d'un matériau plastique ou visqueux, accompagné d'importantes déformations internes. Certaines argiles marines sensibles (quick clays), lorsqu'elles sont perturbées, peuvent perdre brutalement leur résistance au cisaillement à la suite d'une légère variation de leur teneur en eau, entraînant leur liquéfaction soudaine. Ce phénomène peut provoquer la destruction de vastes superficies et permettre à la coulée de parcourir plusieurs kilomètres.

Le volume d'une coulée de terre augmente souvent par rétrogression de l'escarpement de tête, c'est-à-dire par un recul progressif de la zone de rupture. Dans certains cas, un glissement ou un étalement latéral évolue progressivement en coulée de terre au fur et à mesure de son déplacement vers l'aval.

Les coulées de terre présentent une large gamme de vitesses, allant du fluage très lent (creep) à des mouvements rapides et catastrophiques.

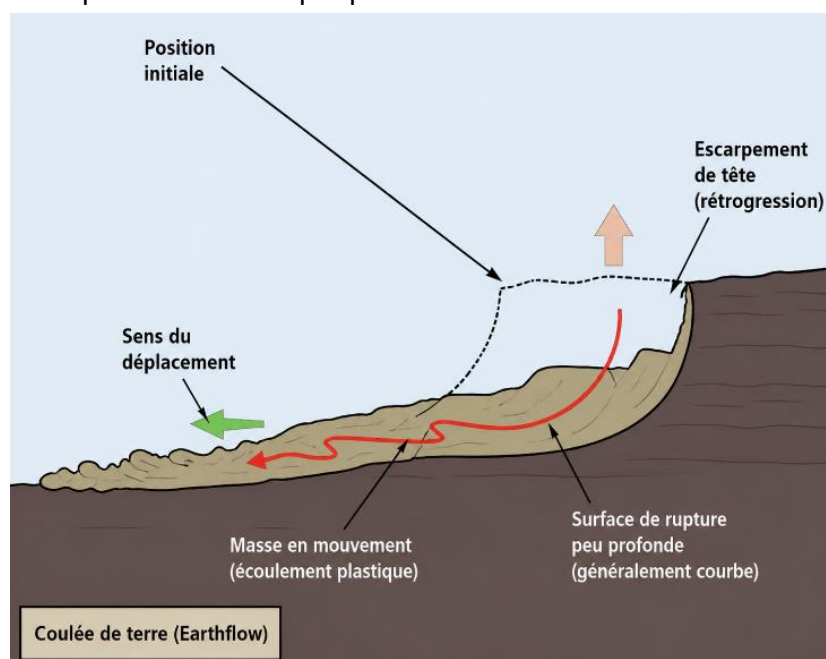


Figure 25: Schéma illustratif d'une coulée de terre (earthflow), (Geological Survey of Canada).

Occurrence

Les coulées de terre sont observées dans de nombreuses régions du monde où prédominent les sols fins ou les roches fortement altérées. Les coulées rapides et catastrophiques sont particulièrement fréquentes dans les dépôts d'argiles marines sensibles des basses terres du Saint-Laurent (Amérique du Nord), des régions côtières de l'Alaska, de la Colombie-Britannique ainsi que des pays scandinaves.

Dimensions et caractéristiques

Les coulées de terre peuvent affecter des superficies très variables, allant de quelques centaines de mètres carrés à plusieurs kilomètres carrés. Dans les terrains constitués d'argiles marines sensibles, elles peuvent parcourir plusieurs kilomètres à partir de leur zone d'origine.

La profondeur de la rupture varie de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres selon les conditions géologiques et géotechniques.

Vitesse de déplacement

La vitesse de déplacement est très variable et peut aller de lente à très rapide, selon la teneur en eau, la nature des matériaux et les conditions de déclenchement.

Mécanismes déclencheurs

Les principaux facteurs favorisant les coulées de terre sont :

- La saturation prolongée des sols due à des précipitations abondantes ou à la fonte des neiges.
- L'abaissement rapide du niveau des eaux de surface, entraînant une chute brutale de la nappe phréatique.
- L'érosion du pied du versant par les cours d'eau.
- Les travaux d'excavation et de terrassement.
- Les surcharges appliquées sur le versant.
- Les séismes.
- Les vibrations d'origine anthropique.

Effets (directs et indirects)

Les coulées de terre rapides, notamment celles impliquant des argiles marines sensibles, peuvent provoquer des catastrophes majeures en détruisant de vastes zones situées au-dessus du versant et en parcourant plusieurs kilomètres.

Elles peuvent entraîner :

- Des pertes humaines.
- La destruction d'habitations et d'infrastructures.
- L'endommagement des routes, voies ferrées et réseaux techniques.
- L'obstruction des cours d'eau, provoquant des inondations en amont.
- Une augmentation importante de la turbidité et de la sédimentation en aval.

Les coulées plus lentes causent principalement des déformations progressives des bâtiments, des routes et des réseaux d'infrastructures.

Mesures de prévention et de stabilisation

L'amélioration du drainage constitue l'une des principales mesures de stabilisation, permettant de limiter la saturation des sols et les pressions interstitielles.

D'autres interventions peuvent être mises en œuvre, notamment :

- Le reprofilage des versants.
- La protection du pied des pentes contre l'érosion ou les excavations.
- L'évaluation de la résistance au cisaillement des argiles.
- Le suivi des pressions interstitielles à l'aide d'instruments géotechniques.

Cependant, la mesure la plus efficace demeure l'évitement de toute urbanisation ou activité d'aménagement à proximité des versants reconnus comme instables.

Prévisibilité

La présence d'anciennes coulées de terre constitue le meilleur indicateur de la susceptibilité d'un site à ce type de mouvement. Dans certaines régions, les formations argileuses susceptibles de se liquéfier ont été cartographiées, notamment dans plusieurs secteurs de l'est de l'Amérique du Nord.

L'apparition de fissures en tête de versant représente également un signe précurseur important pouvant annoncer une rupture imminente.

2.5.4. Coulée de terre lente (Fluage – Creep)

Le fluage (creep) est la forme la plus lente des coulées de terre. Il correspond à un mouvement gravitaire continu, très lent et souvent imperceptible, affectant les sols ou les roches constituant un versant. Ce déplacement résulte de contraintes de cisaillement internes suffisantes pour provoquer une déformation progressive des matériaux, mais insuffisantes pour entraîner une rupture brutale.

On distingue généralement trois principaux types de fluage :

Le fluage saisonnier, qui affecte la couche superficielle du sol soumise aux variations saisonnières de température et de teneur en eau ;

Le fluage continu, lorsque les contraintes de cisaillement dépassent en permanence la résistance des matériaux ;

Le fluage progressif, qui correspond à une évolution lente du versant vers un état de rupture susceptible de conduire à d'autres types de mouvements de terrain plus rapides.

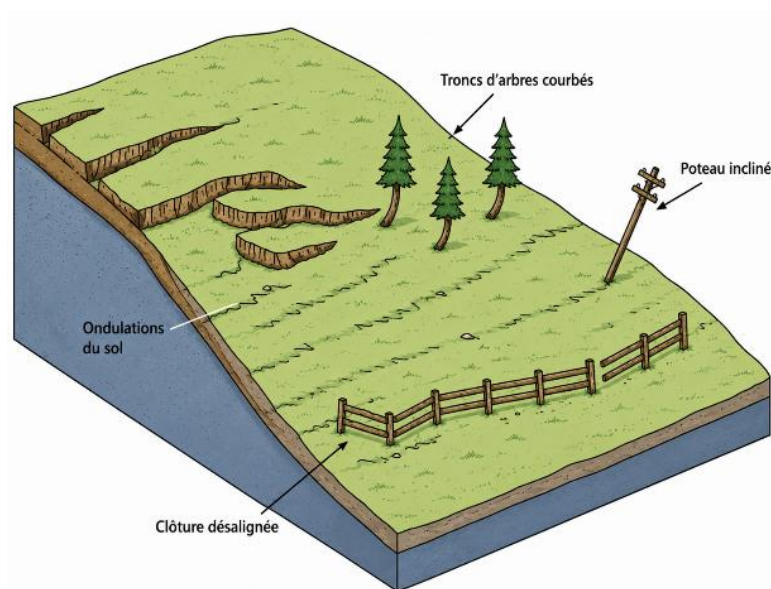


Figure 26: Schéma illustratif d'une coulée de terre lente, communément appelée fluage (creep).

Occurrence

Le fluage est un phénomène très répandu à l'échelle mondiale et constitue probablement le mouvement de terrain le plus fréquent. Il précède souvent des instabilités plus importantes et plus rapides.

Dans les régions de pergélisol, une forme particulière de fluage appelée solifluxion se développe dans la couche superficielle des sols riches en glace lors du dégel saisonnier.

Dimensions et caractéristiques

Le fluage peut affecter de très vastes superficies, couvrant plusieurs dizaines de kilomètres carrés, ou être limité à de petites zones localisées.

En raison de sa très faible vitesse, il est souvent difficile de délimiter précisément son extension, les déformations de surface étant généralement peu marquées.

Vitesse de déplacement

Le fluage est caractérisé par une vitesse très lente à extrêmement lente, généralement inférieure à un mètre par décennie.

Mécanismes déclencheurs

Les principaux facteurs favorisant le fluage sont :

- Les précipitations et la fonte des neiges (dans le cas du fluage saisonnier).
- L'altération physique et chimique des matériaux.
- Les fuites des réseaux d'eau.
- Un drainage insuffisant.
- Certains travaux de construction ou d'aménagement qui déstabilisent le versant.

D'autres facteurs modifiant progressivement l'équilibre mécanique du terrain.

Effets (directs et indirects)

En raison de sa lenteur, le fluage passe souvent inaperçu lors des études préalables à la construction. Pourtant, ses effets peuvent être importants à long terme.

Il peut provoquer :

- La déformation progressive des bâtiments.
- La rupture ou la déformation des canalisations.
- L'endommagement des routes et des voies ferrées.
- L'inclinaison des clôtures, des murs de soutènement et des poteaux.
- Une évolution progressive vers des mouvements de terrain beaucoup plus rapides et plus destructeurs.

Mesures de prévention et de stabilisation

La mesure de prévention la plus efficace consiste à assurer un drainage adéquat afin de limiter la saturation en eau des sols, notamment dans le cas du fluage saisonnier.

D'autres mesures peuvent être mises en œuvre, notamment :

- Le reprofilage des versants par réduction de leur pente.
- L'excavation partielle ou totale des matériaux instables lorsque cela est techniquement réalisable.
- La construction de murs de soutènement destinés à améliorer la stabilité du versant.

Prévisibilité

Le fluage peut être identifié grâce à plusieurs indices morphologiques caractéristiques, notamment :

- Des troncs d'arbres courbés à leur base.
- Des clôtures, murs de soutènement ou poteaux inclinés.
- De petites ondulations ou rides du sol à la surface du versant.

La vitesse du mouvement peut être mesurée à l'aide d'inclinomètres installés dans des forages ou par des levés topographiques de haute précision réalisés à intervalles réguliers.

3- Où se produisent les glissements de terrain ?

Contrairement à une idée largement répandue, les glissements de terrain peuvent se produire dans pratiquement toutes les régions du monde. L'idée selon laquelle ils se limiteraient aux versants très escarpés et aux zones montagneuses difficiles d'accès ne reflète pas la réalité. En effet, la majorité des pays ont été confrontés, à des degrés divers, à ce type de phénomène.

Cette large répartition géographique s'explique principalement par la diversité des mécanismes susceptibles de déclencher les mouvements de terrain.

Les précipitations intenses ou prolongées, les séismes, les éruptions volcaniques, les incendies de forêt ainsi que certaines activités humaines constituent parmi les principaux facteurs de déclenchement des glissements de terrain.

Les glissements de terrain peuvent se produire aussi bien à la surface des continents que sous les plans d'eau. Ils affectent aussi bien les massifs rocheux que les sols meubles et peuvent survenir dans des terres agricoles, sur des versants dénudés ou encore dans des forêts naturelles. De plus, ils ne sont pas exclusivement liés aux régions humides : des zones très sèches comme des régions fortement arrosées peuvent être concernées. Contrairement aux idées reçues, des pentes très fortes ne sont pas indispensables au déclenchement d'un mouvement de terrain ; des glissements ont été observés sur des versants dont l'inclinaison n'était que de 1 à 2°.

Bien que les glissements de terrain puissent survenir presque partout dans le monde, leur répartition présente certaines tendances spatiales. À l'échelle nationale, par exemple au Canada ou aux États-Unis, plusieurs types de glissements sont étroitement associés aux reliefs montagneux tels que les Rocheuses. D'autres tendances géographiques sont directement liées aux conditions climatiques, aux régimes météorologiques, aux incendies de forêt, aux réseaux hydrographiques ainsi qu'aux activités humaines, notamment le défrichement, la modification des versants et diverses pratiques d'aménagement urbain ou rural. Dans tous les cas, les types de mouvements de terrain dépendent étroitement des caractéristiques géologiques, géomorphologiques et environnementales propres à chaque région.

Certains mouvements présentent des conditions d'apparition très spécifiques. Les torrents de débris nécessitent l'existence de ravins ou de chenaux d'écoulement, tandis que les chutes de blocs ne peuvent se produire qu'en présence de falaises rocheuses abruptes ou de dépôts riches en blocs instables. La géologie constitue ainsi un facteur déterminant dans la genèse de nombreux mouvements de terrain.

Par ailleurs, les liens étroits entre l'activité sismique, le volcanisme et les glissements de terrain soulignent l'importance d'une approche multi-aléas dans l'évaluation des risques naturels. Cette approche consiste à prendre simultanément en compte l'ensemble des facteurs

susceptibles d'interagir — géologiques, hydrologiques, climatiques et anthropiques — afin d'obtenir une évaluation plus complète et plus fiable de l'aléa et du risque de glissement de terrain.

4- Les causes des glissements de terrain

Les glissements de terrain résultent principalement de deux grandes catégories de facteurs : les causes naturelles et les causes anthropiques (liées aux activités humaines). Dans de nombreux cas, ces deux catégories de facteurs agissent simultanément, les activités humaines pouvant favoriser, accélérer ou aggraver des instabilités d'origine naturelle.

4.1. Causes naturelles

Les causes naturelles des glissements de terrain reposent principalement sur trois mécanismes de déclenchement majeurs, qui peuvent intervenir indépendamment ou de manière combinée :

- L'eau.
- L'activité sismique.
- L'activité volcanique.

L'influence de chacun de ces mécanismes varie selon de nombreux paramètres, notamment :

- La pente du versant.
- La morphologie et la géométrie du relief.
- Les caractéristiques géotechniques des sols.
- La nature géologique du substratum.
- Ainsi que la présence d'infrastructures ou de populations dans les zones concernées.

Les conséquences de ces différents mécanismes peuvent donc être très variables, allant de mouvements lents et localisés à des glissements catastrophiques affectant de vastes territoires.

4.1.1. Les glissements de terrain et l'eau

L'eau constitue l'un des principaux facteurs responsables du déclenchement des glissements de terrain. La saturation des versants peut résulter de fortes précipitations, de la fonte des neiges, de variations du niveau des eaux souterraines ou encore des fluctuations du niveau

des eaux de surface le long des côtes, des barrages en terre, ainsi que des berges des lacs, des réservoirs, des canaux et des cours d'eau.

Les glissements de terrain et les inondations sont étroitement liés, car ils résultent souvent des mêmes processus hydrologiques, notamment les précipitations, le ruissellement et la saturation des sols. Les inondations peuvent provoquer des glissements de terrain en érodant le pied des berges des rivières et des cours d'eau, ou en augmentant la saturation des versants sous l'effet du ruissellement de surface.

Par ailleurs, les coulées de débris et les coulées de boue se développent généralement dans des ravins ou des chenaux torrentiels à fortes pentes. Elles sont souvent confondues avec les crues, alors qu'il s'agit de phénomènes distincts pouvant toutefois se produire simultanément dans une même région.

Inversement, les glissements de terrain peuvent également être à l'origine d'inondations. L'accumulation de roches et de débris peut obstruer les cours d'eau et former des barrages naturels, entraînant une retenue d'eau en amont. La rupture éventuelle de ces barrages peut provoquer des crues soudaines et particulièrement destructrices en aval.

Les matériaux transportés par les glissements augmentent également le volume et la densité des écoulements fluviaux, modifient le tracé des chenaux et favorisent la formation d'embâcles, susceptibles de provoquer des débordements, des inondations localisées ou une intensification de l'érosion.

Les glissements de terrain peuvent aussi générer des tsunamis lacustres (seiches), provoquer le dépassement de la capacité des réservoirs ou réduire leur volume utile par accumulation de sédiments.

Les versants récemment touchés par des incendies de forêt présentent une forte susceptibilité aux glissements de terrain. La disparition de la couverture végétale, les modifications des propriétés physico-chimiques du sol provoquées par la combustion et la saturation rapide des terrains lors des épisodes pluvieux augmentent considérablement leur instabilité. Dans ces conditions, les coulées de débris constituent le type de mouvement de terrain le plus fréquemment observé.

4.1.2. Les glissements de terrain et l'activité sismique

De nombreuses régions montagneuses fortement exposées aux glissements de terrain sont également situées dans des zones où une activité sismique modérée à importante a été enregistrée au cours de l'histoire. Les séismes augmentent considérablement la probabilité de déclenchement des mouvements de terrain, notamment en raison des secousses sismiques, de la liquéfaction des sols sensibles et de la dilatation des matériaux sous l'effet des vibrations, ce qui favorise l'infiltration rapide de l'eau dans le sol et réduit sa stabilité.

Un exemple marquant est celui du Grand séisme de l'Alaska de 1964, qui a provoqué de très nombreux glissements de terrain et autres ruptures du sol. Ces mouvements gravitaires ont été responsables d'une grande partie des pertes économiques associées à cet événement.

D'autres régions d'Amérique du Nord, notamment l'État de Californie, la région du Puget Sound dans l'État de Washington ainsi que les basses terres du Saint-Laurent, dans l'est du Canada, ont également connu des glissements de terrain, des étalements latéraux et d'autres formes de ruptures du terrain provoqués par des séismes de magnitude modérée à forte.

Les secousses sismiques peuvent également provoquer des chutes de blocs et des basculements rocheux, en déstabilisant les falaises et les formations rocheuses fracturées. La Figure 27 présente un exemple de glissement de terrain déclenché par un séisme.

Les séismes favorisent également la formation de barrages naturels de glissement (landslide dams). Ces barrages se forment lorsque des masses de roches et de débris, mobilisées par les secousses, obstruent totalement ou partiellement le lit d'une rivière ou d'un cours d'eau au pied d'un versant. L'eau s'accumule alors en amont de l'obstacle, provoquant des inondations parfois importantes.

Ces barrages naturels sont généralement instables. Ils peuvent être progressivement érodés ou céder brutalement après une période plus ou moins longue. Leur rupture libère soudainement les eaux retenues, générant une crue torrentielle extrêmement destructive capable de provoquer d'importants dégâts aux infrastructures, aux habitations et aux populations situées en aval.



Figure 27: : Photographie illustrant les dommages subis par une habitation construite sur un remblai artificiel à la suite d'un glissement de terrain induit par le séisme de la préfecture de Niigata (Japon) en 2004. (© Professeur Kamai, Université de Kyoto, Japon)

4.1.3 Les glissements de terrain et l'activité volcanique

Les glissements de terrain associés à l'activité volcanique comptent parmi les mouvements de terrain les plus destructeurs. Lors d'une éruption, les coulées de lave ou les matériaux volcaniques à haute température peuvent provoquer la fonte rapide de la neige et de la glace, générant un mélange d'eau, de cendres, de roches et de sols qui s'écoule à grande vitesse sur les pentes du volcan. Ces écoulements, appelés lahars (terme d'origine indonésienne), sont capables de détruire tout ce qui se trouve sur leur trajectoire.

Les lahars peuvent parcourir de très longues distances après avoir quitté les flancs du volcan et atteindre les plaines environnantes, où ils endommagent gravement les habitations, les infrastructures et les terres agricoles.

Les édifices volcaniques sont généralement des structures géologiquement jeunes, constituées de matériaux peu consolidés et mécaniquement fragiles. Cette faible cohésion favorise leur déstabilisation et peut entraîner des glissements rocheux, des glissements de terrain ou des avalanches de débris de grande ampleur.

De nombreuses îles d'origine volcanique connaissent également des effondrements périodiques de leurs flancs, en raison de l'instabilité des dépôts volcaniques superficiels. Les masses de roches et de sols ainsi mobilisées peuvent se déverser dans l'océan ou dans d'autres plans d'eau, tels que les baies ou les fjords.

Ces effondrements peuvent engendrer d'importants glissements sous-marins, qui déplacent brutalement de grandes quantités d'eau et provoquent des tsunamis particulièrement destructeurs. Ces vagues peuvent affecter aussi bien les zones côtières proches que des régions situées à de très grandes distances de leur origine.

4.2. Les activités humaines

L'expansion des populations vers de nouveaux espaces, ainsi que le développement de quartiers, de villes et d'infrastructures, constitue l'un des principaux facteurs par lesquels les activités humaines favorisent l'apparition des glissements de terrain.

Les interventions humaines modifiant les conditions naturelles des versants peuvent rompre leur équilibre et déclencher des instabilités. Parmi les principales causes anthropiques figurent :

- La modification des réseaux de drainage naturels.
- La déstabilisation des versants par des travaux de terrassement.
- Le déboisement et la suppression de la couverture végétale, qui réduisent la cohésion des sols et augmentent le ruissellement.

D'autres activités humaines peuvent également accroître le risque de glissement de terrain, notamment :

- Le surcreusement du pied des versants (undercutting), qui réduit leur stabilité.
- La surcharge au sommet des pentes par des remblais, des bâtiments ou d'autres infrastructures, lorsque les contraintes exercées dépassent la capacité portante des sols.
- L'irrigation excessive des terrains agricoles.
- L'arrosage intensif des espaces verts.
- La vidange ou, au contraire, la mise en eau de réservoirs.
- Les fuites des réseaux d'alimentation en eau.
- Les travaux d'excavation, de nivellement ou de terrassement réalisés sans études géotechniques appropriées.

Ainsi, des glissements de terrain peuvent se produire même dans des secteurs auparavant considérés comme stables lorsque les conditions d'équilibre naturel sont modifiées par les activités humaines.

La réduction de ce risque repose principalement sur une planification rigoureuse de l'aménagement du territoire. Avant toute nouvelle construction dans une zone potentiellement instable, il est indispensable d'évaluer la susceptibilité du site aux mouvements de terrain à l'aide d'études géologiques et géotechniques. Lorsque le développement est nécessaire, des mesures d'ingénierie adaptées — telles que le reprofilage des versants, les travaux de terrassement contrôlés, l'amélioration du drainage et le zonage des secteurs à risque — permettent de limiter significativement la probabilité de déclenchement des glissements de terrain.

5- Effets et conséquences des glissements de terrain

Les effets des glissements de terrain se manifestent principalement dans deux types d'environnements : l'environnement bâti et l'environnement naturel. Dans certains cas, ces deux milieux se chevauchent, notamment dans les zones agricoles ou forestières soumises à des activités humaines telles que le déboisement ou l'exploitation forestière.

5.1. Impacts des glissements de terrain sur l'environnement bâti

Les glissements de terrain peuvent affecter gravement les infrastructures et les constructions humaines, qu'elles soient directement implantées sur des versants instables ou situées à proximité de zones exposées. Les habitations construites sur des terrains instables peuvent subir des dommages allant de simples fissurations à une destruction complète, en raison de la déstabilisation ou de la rupture des fondations, des murs, des terrains environnants ainsi que des réseaux d'utilité publique, notamment les conduites d'eau, les réseaux d'assainissement, les lignes électriques et les infrastructures de communication.

Les conséquences peuvent concerner des secteurs résidentiels entiers, lorsque plusieurs habitations sont touchées à l'échelle d'une région, ou se limiter à une seule propriété affectée partiellement ou totalement. Par ailleurs, la dégradation des réseaux essentiels desservant une habitation (routes d'accès, réseaux d'eau, d'électricité ou d'assainissement) peut entraîner des perturbations pour les propriétés voisines et compromettre le fonctionnement global d'un quartier ou d'une communauté.

Les bâtiments commerciaux sont exposés aux mêmes types de dommages que les habitations. Cependant, les conséquences économiques et sociales peuvent être plus importantes lorsque les structures touchées assurent des fonctions essentielles pour la population. Par exemple, la fermeture temporaire d'un marché, d'un centre commercial ou d'un établissement de service public peut résulter non seulement des dommages directs au bâtiment, mais également de l'interruption des voies d'accès.

5.1.1. Impacts des glissements de terrain à mouvement rapide

Les glissements de terrain rapides, notamment les coulées de débris, figurent parmi les phénomènes les plus destructeurs. Ils se caractérisent généralement par une apparition soudaine, avec peu ou pas de signes précurseurs, laissant un temps très limité pour mettre en place des mesures de protection ou d'évacuation. Leur vitesse élevée et la quantité importante de matériaux transportés leur confèrent une grande capacité destructive, pouvant entraîner la destruction totale des constructions et des infrastructures.

À l'inverse, les glissements de terrain lents peuvent provoquer initialement des dommages limités, offrant davantage de temps pour la surveillance et la mise en œuvre de mesures de stabilisation. Toutefois, en l'absence d'intervention, ces mouvements progressifs peuvent également conduire à la dégradation complète des structures sur le long terme.

Dans les régions montagneuses à fortes pentes, des phénomènes tels que les avalanches de débris et les lahars peuvent provoquer des dégâts considérables aux villes, villages et réseaux d'infrastructures en raison de leur vitesse, de leur énergie et du volume important de matériaux mobilisés.

La poursuite du mouvement d'un glissement de terrain pendant plusieurs jours, semaines ou mois peut rendre impossible la reconstruction dans les zones affectées, sauf après réalisation de travaux de stabilisation adaptés. Cependant, même après la mise en œuvre de mesures de mitigation, la stabilité à long terme n'est pas toujours garantie.

5.1.2. Conséquences sur les infrastructures de transport

Les infrastructures de transport constituent l'un des secteurs les plus vulnérables face aux glissements de terrain. Leurs impacts peuvent concerner un grand nombre de personnes en raison de leur rôle essentiel dans les déplacements, le commerce, le tourisme et les interventions d'urgence.

Les principales formes de dommages comprennent :

- Les ruptures de talus en déblai ou en remblai le long des routes et des voies ferrées.
- L'affaissement ou l'effondrement des chaussées reposant sur des sols faibles ou instables.
- Les chutes de blocs rocheux pouvant provoquer des accidents, endommager les véhicules et dégrader les infrastructures.

Tous les types de glissements de terrain peuvent entraîner la fermeture temporaire ou prolongée d'axes de circulation stratégiques par obstruction des routes et des voies ferrées par des matériaux tels que les sols, les débris rocheux ou les blocs.

Même les mouvements très lents, comme le fluage des sols, peuvent affecter les infrastructures linéaires en provoquant des déformations progressives nécessitant des opérations fréquentes d'entretien et de réparation.

Certaines obstructions peuvent être rapidement éliminées par des opérations simples de déblaiement, tandis que d'autres nécessitent des travaux lourds d'excavation, la mise en place de déviations temporaires de la circulation, voire la fermeture complète de l'axe concerné.

5.1.3. Augmentation de la vulnérabilité liée à la croissance démographique

L'augmentation continue de la population mondiale contribue à accroître l'exposition des sociétés aux risques liés aux glissements de terrain. La raréfaction des espaces disponibles pousse de nombreuses populations à s'installer dans des zones auparavant considérées comme trop dangereuses, notamment sur des versants instables ou dans des régions montagneuses.

L'absence de politiques efficaces d'aménagement du territoire et le manque de réglementation peuvent favoriser la construction d'habitations et d'infrastructures dans des secteurs à forte susceptibilité aux mouvements de terrain. Ces espaces seraient parfois plus adaptés à des usages moins vulnérables, tels que l'agriculture, les espaces naturels protégés ou les zones non urbanisées.

De nombreuses collectivités ne disposent pas toujours des moyens techniques, institutionnels ou réglementaires nécessaires pour contrôler les pratiques de construction et limiter l'occupation des zones à risque.

Ainsi, l'urbanisation non planifiée, associée à une gestion inadéquate du territoire, contribue à augmenter considérablement la vulnérabilité des populations, des infrastructures et des activités économiques face aux aléas liés aux glissements de terrain.

5.2. Impacts des glissements de terrain sur l'environnement naturel

Les glissements de terrain exercent des impacts importants sur l'environnement naturel en affectant plusieurs composantes majeures des systèmes terrestres, notamment :

- La morphologie de la surface terrestre, incluant les systèmes montagneux et les vallées, aussi bien sur les continents que dans les environnements sous-marins. Les formes du relief sont particulièrement influencées par le déplacement vers l'aval de grandes masses de matériaux mobilisées lors des glissements de terrain, pouvant modifier durablement la topographie des versants et des vallées.
- Les forêts et les formations herbacées, qui couvrent une grande partie des continents et qui peuvent être perturbées ou détruites localement par les mouvements de terrain.
- La faune et les écosystèmes naturels, présents à la surface de la Terre ainsi que dans les cours d'eau, les lacs et les milieux marins.

Certains glissements de terrain peuvent couvrir de très grandes superficies et entraîner des transformations importantes du paysage. Ils peuvent modifier la configuration du relief, perturber l'écoulement des rivières, affecter les terres agricoles et dégrader temporairement ou durablement les écosystèmes forestiers.

Les forêts, les prairies et les habitats de la faune sauvage sont souvent affectés négativement par ces phénomènes. Les habitats forestiers et aquatiques, notamment ceux des poissons, figurent parmi les milieux les plus sensibles et peuvent être fortement dégradés, voire exceptionnellement détruits. Cependant, étant généralement des phénomènes localisés, les glissements de terrain permettent souvent une recolonisation progressive des espèces végétales et animales avec le temps.

Par ailleurs, des études écologiques récentes montrent que, dans certaines conditions, les glissements de terrain peuvent avoir des effets positifs à moyen et long terme sur certains habitats naturels. Ils peuvent notamment créer de nouveaux environnements favorables au

développement d'organismes servant de source alimentaire pour les poissons et la faune sauvage, contribuant ainsi indirectement à l'amélioration de certains écosystèmes.

Principaux types de glissements de terrain affectant l'environnement naturel :

5.2.1. Glissements de terrain sous-marins

Les glissements de terrain sous-marins correspondent au déplacement gravitaire de masses de matériaux géologiques depuis des zones peu profondes vers des régions plus profondes des océans, des lacs ou des rivières.

Ces phénomènes peuvent modifier significativement la morphologie des fonds marins et des zones côtières, affectant notamment les infrastructures portuaires, les activités de navigation et les zones de mouillage.

Les grands glissements sous-marins, notamment ceux déclenchés par des séismes, peuvent générer des tsunamis destructeurs. Un exemple historique est le tsunami provoqué en 1929 par un glissement sous-marin dans la région des Grands Bancs au large de Terre-Neuve (Canada).

5.2.2. Recul des falaises côtières et érosion des versants littoraux

Le recul des falaises côtières constitue une autre conséquence fréquente des mouvements de terrain dans les environnements naturels. Les principaux phénomènes impliqués sont les :

- Chutes de blocs rocheux ;
- Glissements de terrain ;
- Avalanches rocheuses ou de débris.

Des phénomènes tels que les basculements de blocs (topples) et les coulées peuvent également se produire dans les zones côtières.

Les chutes de blocs provenant de falaises instables représentent un danger important pour les populations et les infrastructures situées au pied des falaises ou sur les plages adjacentes.

L'accumulation rapide de grandes quantités de matériaux issus des glissements peut également perturber les écosystèmes aquatiques, notamment les habitats des poissons et des algues marines. Le dépôt massif de sédiments dans les plans d'eau peut modifier la qualité de l'eau, augmenter la turbidité et affecter les organismes aquatiques vivant dans les zones côtières vulnérables.

5.2.3. Barrages naturels formés par les glissements de terrain

Les barrages naturels liés aux glissements de terrain apparaissent lorsqu'une masse importante de matériaux glissés obstrue le lit d'une rivière, empêchant temporairement l'écoulement de l'eau et entraînant la formation d'un lac en amont.

La plupart de ces barrages sont temporaires, car l'eau finit généralement par éroder progressivement la structure créée par le glissement. Cependant, lorsque le barrage résiste aux processus d'érosion naturelle ou n'est pas modifié par les activités humaines, il peut donner naissance à une nouvelle forme du paysage : un lac permanent.

Les lacs formés derrière des barrages naturels peuvent persister pendant plusieurs siècles, mais ils peuvent également subir une rupture brutale, provoquant des crues soudaines et potentiellement catastrophiques en aval.

La gestion du risque associé à ces barrages naturels repose sur différentes stratégies, telles que la surveillance, l'évaluation de la stabilité du barrage et la mise en œuvre éventuelle de mesures de drainage ou de stabilisation.

Un exemple remarquable est celui du glissement de terrain de Slumgullion, considéré comme l'un des plus grands glissements de terrain au monde. Le barrage naturel associé à ce glissement est suffisamment vaste pour avoir persisté pendant environ 700 ans, illustrant la capacité de certains mouvements de terrain à modifier durablement les paysages naturels.

6- cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain par le processus de hiérarchie analytique (AHP)

La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process), développée par Thomas L. Saaty (1980), est une méthode d'aide multicritère à la décision qui permet de hiérarchiser et de pondérer différents critères en réalisant des comparaisons par paires. En cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain, elle sert à déterminer l'importance relative des facteurs de prédisposition (pente, lithologie, occupation du sol, pluviométrie, etc.) afin de produire une carte de susceptibilité.

Les principales étapes de la méthode AHP

- Définition de l'objectif : Déterminer le problème à résoudre (ex. : cartographier la susceptibilité aux glissements de terrain).

- Sélection des critères : Choisir les facteurs influençant le phénomène (pente, lithologie, altitude, distance aux failles, occupation du sol, précipitations, etc.).
- Construction de la matrice de comparaison par paires : Comparer chaque critère à tous les autres en utilisant l'échelle de Saaty (de 1 à 9).
- Calcul des poids des critères : Déterminer l'importance relative de chaque critère à partir de la matrice de comparaison.
- Vérification de la cohérence : Calculer le Ratio de Cohérence (CR) pour vérifier la fiabilité des jugements. Si $CR < 0,10$, les comparaisons sont considérées comme cohérentes.
- Combinaison des critères dans un SIG : Intégrer les critères pondérés à l'aide d'une combinaison linéaire pondérée (Weighted Overlay) pour produire la carte de susceptibilité.
- Validation des résultats : Comparer la carte obtenue avec les glissements de terrain observés afin d'évaluer sa précision.

Etude de cas (1) : Cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain dans le bassin de Boudinar (Maroc) à l'aide des systèmes d'information géographique (SIG) et de la méthode du processus analytique hiérarchique (AHP).

L'article est disponible à l'adresse suivante :

<https://oiccpres.com/ijes/article/view/8449/9528>

Etude de cas (2) : Cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain dans le massif des Bokoya (Nord du Maroc) à l'aide d'une analyse géospatiale multifactorielle et de la méthode du processus analytique hiérarchique (AHP).

L'article est disponible à l'adresse suivante :

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468227625004508>

CHAPITRE III : LES INONDATIONS

Introduction

Les inondations constituent l'un des aléas naturels les plus fréquents et les plus destructeurs à travers le monde. Elles sont responsables chaque année de pertes humaines importantes, de dégâts matériels considérables et de lourdes conséquences économiques, sociales et environnementales. Ces phénomènes peuvent résulter de précipitations intenses, de crues torrentielles, de la fonte des neiges, de submersions marines ou encore d'événements météorologiques extrêmes tels que les tempêtes et les cyclones.

Au Maroc, les inondations représentent l'un des principaux risques naturels en raison de la diversité des contextes climatiques et géomorphologiques du pays. Les régions montagneuses du Rif, du Moyen et du Haut Atlas, ainsi que plusieurs plaines et vallées, sont régulièrement exposées à des crues parfois violentes, provoquées par des épisodes pluvieux intenses. Ces événements entraînent fréquemment des pertes humaines, la destruction d'infrastructures, des dommages aux terres agricoles et des perturbations des activités économiques. Les inondations survenues au cours des dernières décennies dans plusieurs régions du Royaume ont mis en évidence la forte vulnérabilité de certains territoires face à ce risque.

L'intensification de l'urbanisation, l'occupation des zones inondables, l'imperméabilisation croissante des sols, la dégradation des bassins versants et les effets du changement climatique contribuent à accentuer la fréquence et l'intensité des inondations. Ces facteurs modifient le fonctionnement hydrologique des bassins versants en favorisant le ruissellement rapide des eaux et en augmentant les débits de crue.

Face à ces enjeux, la prévention et la gestion du risque d'inondation constituent des priorités pour assurer la sécurité des populations et protéger les infrastructures et les ressources naturelles. Elles reposent sur une approche intégrée combinant l'aménagement des bassins versants, la préservation des zones d'expansion des crues, la réalisation d'ouvrages de protection, le développement de systèmes de prévision et d'alerte précoce, ainsi que l'utilisation des technologies de télédétection, des systèmes d'information géographique (SIG) et de la modélisation hydrologique et hydraulique. L'implication des pouvoirs publics, des

collectivités territoriales et des citoyens demeure indispensable pour renforcer la résilience des territoires face aux inondations et réduire durablement leurs impacts.

1- Quelques définitions

Une inondation correspond à la submersion temporaire, partielle ou totale, d'une zone habituellement hors d'eau, résultant d'un débordement des cours d'eau, d'un ruissellement intense, d'une remontée de nappe phréatique, d'une submersion marine ou de la rupture d'un ouvrage hydraulique. Selon les conditions hydrologiques et météorologiques, elle peut se produire de manière progressive ou soudaine, avec une intensité et une durée variable.

Le risque d'inondation résulte de l'interaction entre un aléa et la vulnérabilité des enjeux exposés. L'aléa correspond à la probabilité d'occurrence d'un phénomène de submersion, tandis que la vulnérabilité désigne la sensibilité des populations, des infrastructures, des activités économiques et des écosystèmes face à cet événement. Ainsi, une inondation ne devient un risque majeur que lorsque des personnes, des biens ou des activités sont présents dans les zones susceptibles d'être inondées.

L'augmentation de l'urbanisation dans les plaines alluviales, l'imperméabilisation des sols, l'occupation des zones inondables et les modifications apportées aux cours d'eau contribuent à accroître la vulnérabilité des territoires. Par conséquent, une gestion efficace du risque d'inondation repose non seulement sur la maîtrise de l'aléa, mais également sur la réduction de la vulnérabilité par des politiques d'aménagement, de prévention et de sensibilisation adaptées.

2- Types d'inondation

2.1. La montée lente des eaux en région de plaine

Les inondations de plaine se produisent lorsque le débit d'un cours d'eau augmente progressivement à la suite de précipitations prolongées ou d'une succession d'épisodes pluvieux. Lorsque le débit dépasse la capacité du lit mineur, la rivière déborde lentement et envahit les plaines alluviales avoisinantes. Selon l'importance de la crue, les eaux peuvent occuper le lit moyen puis le lit majeur, provoquant une submersion qui peut durer plusieurs jours, voire plusieurs semaines.

Les inondations de plaine peuvent également résulter d'une remontée de la nappe phréatique (Fig. 28). Ce phénomène survient après une période prolongée de fortes précipitations, lorsque les nappes souterraines atteignent la surface du sol ou s'en rapprochent fortement. Les terrains les plus bas, les zones mal drainées et les plaines alluviales sont particulièrement exposés à ce type d'inondation, dont l'évolution est généralement lente mais persistante, pouvant durer plusieurs semaines.



Figure 28: Schéma illustratif d'une inondation par remontée de nappe

2.2. La formation rapide de crues torrentielles

Les crues torrentielles se produisent à la suite de précipitations très intenses et de courte durée qui affectent un bassin versant. L'eau de pluie, ne pouvant s'infiltrer suffisamment rapidement dans le sol, ruisselle et converge rapidement vers le réseau hydrographique, entraînant une montée brutale du niveau des cours d'eau.

Ces crues se caractérisent par des écoulements très rapides et fortement énergétiques, capables de transporter d'importantes quantités de sédiments, de blocs rocheux, de troncs d'arbres et d'autres débris. Cette charge solide accentue l'érosion des berges et du lit des cours d'eau, tout en favorisant le dépôt de matériaux dans les zones où la vitesse de l'écoulement diminue.

Les matériaux transportés peuvent également s'accumuler au niveau des ponts, des ouvrages hydrauliques ou dans les sections étroites des vallées, formant des embâcles. La rupture soudaine de ces obstacles peut libérer un important volume d'eau et de matériaux, générant une vague destructrice susceptible d'aggraver considérablement les conséquences de la crue en aval.

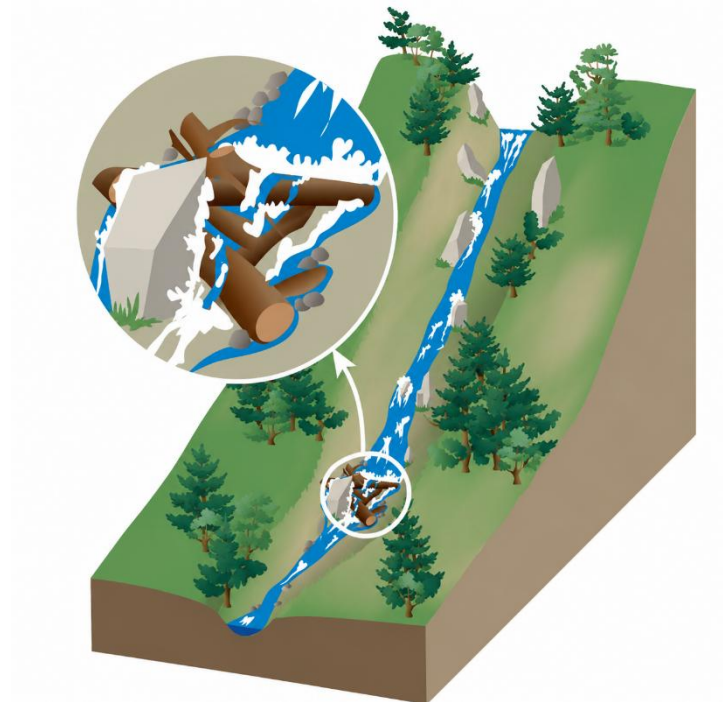


Figure 29: Schéma illustratif d'embâcle sur un torrent

2.3. Le ruissellement pluvial

L'imperméabilisation du sol par les aménagements (bâtiments, voiries, parkings, etc.) et par les pratiques culturales limite l'infiltration des précipitations et accentue le ruissellement. Ceci occasionne souvent la saturation et le refoulement du réseau d'assainissement des eaux pluviales. Il en résulte des écoulements plus ou moins importants et souvent rapides dans les rues.

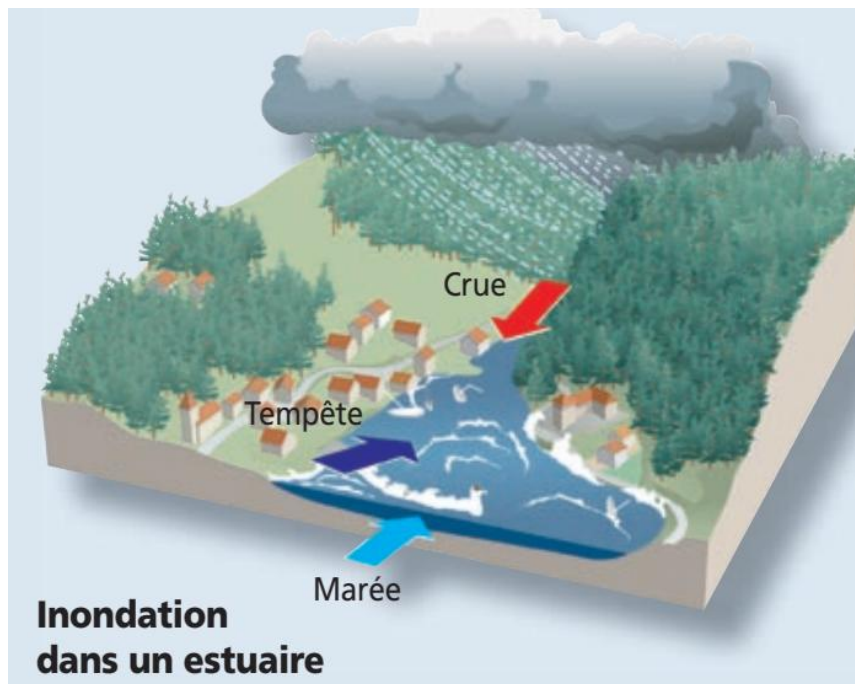


Figure 30: Schéma illustratif d'une inondation pluviale

Un cas particulier : les laves torrentielles

Les laves torrentielles constituent des écoulements gravitaires particulièrement destructeurs qui se développent dans le lit des torrents lors de crues, lorsque d'importantes quantités de matériaux meubles (éboulis, colluvions, sols, blocs rocheux et débris divers) sont mobilisées par l'eau. Ces écoulements se caractérisent par une forte concentration en matériaux solides, généralement supérieure à 50 % en volume, comprenant des particules de tailles très variées, depuis les éléments fins jusqu'à des blocs de plusieurs mètres de diamètre.

En raison de cette forte charge sédimentaire, la lave torrentielle se comporte comme un fluide visqueux à haute densité, dans lequel les blocs rocheux sont transportés au sein d'une matrice boueuse constituée d'eau, d'argiles et de particules fines. Comparativement à une crue torrentielle classique de débit équivalent, elle possède un pouvoir destructeur beaucoup plus important, lié à sa densité élevée, à sa vitesse de propagation — pouvant atteindre plusieurs dizaines de kilomètres par heure selon la pente du torrent — ainsi qu'au volume considérable de matériaux transportés. Les blocs charriés peuvent peser plusieurs dizaines de tonnes, augmentant considérablement les dommages potentiels sur les infrastructures et les zones habitées.

Lors du passage d'une lave torrentielle, l'écoulement liquide du torrent est généralement interrompu et remplacé par une succession de bouchons de matériaux solides (embâcles) et de coulées boueuses (débâcles) qui progressent de manière discontinue le long du chenal. Par ailleurs, les importants volumes de sédiments déposés peuvent entraîner le colmatage du lit du torrent, provoquant son débordement et sa divagation vers les zones voisines. Ce phénomène représente un risque majeur dans les vallées urbanisées, notamment au niveau des cônes de déjection torrentiels, où les écoulements peuvent modifier brutalement leur trajectoire et causer des dégâts humains, matériels et environnementaux considérables.

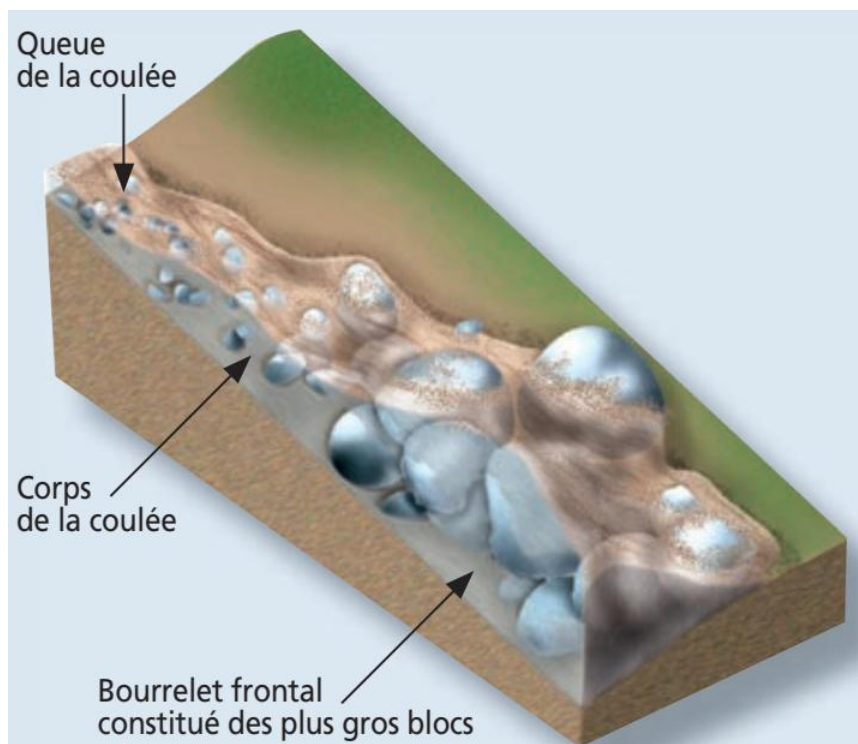


Figure 31: Schéma illustratif d'une Structure d'une lave torrentielle

3- Hydraulique des cours d'eau : débit et lit fluvial

3.1. Le débit de la rivière

La crue

La crue correspond à l'augmentation de la quantité d'eau qui s'écoule dans la rivière (débit) et peut concerner l'ensemble du lit majeur de la rivière. L'importance de l'inondation dépend de trois paramètres : la hauteur d'eau, la vitesse du courant et la durée de la crue.

Ces paramètres sont conditionnés par les précipitations, l'état du bassin versant et les caractéristiques du cours d'eau (profondeur, largeur de la vallée, etc.). Ces caractéristiques naturelles peuvent être aggravées par la présence d'activités humaines.

Le débit (Q) d'un cours d'eau en un point donné est le volume d'eau passant en ce point pendant une unité de temps ; il s'exprime en m^3/s ou en l/s .

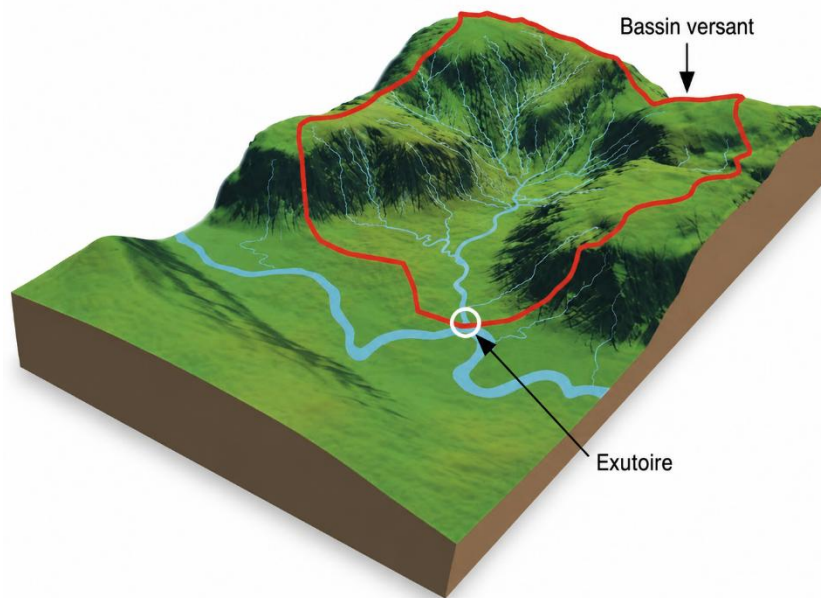


Figure 32: Schéma illustratif d'un bassin versant

Le bassin versant d'une rivière est son aire géographique d'alimentation en eau.

L'exutoire est le point le plus en aval du réseau hydrographique, par lequel passent toutes les eaux de ruissellement drainées par le bassin versant.

L'étiage

Le débit d'étiage est le débit minimum d'un cours d'eau, observé sur un temps donné en période de basses eaux.

3.2. Le lit de la rivière

Le lit mineur

Le lit mineur est constitué par le lit ordinaire du cours d'eau, pour le débit d'étiage ou pour les crues fréquentes (crues annuelles).

Le lit majeur

Le lit majeur comprend les zones basses situées de part et d'autre du lit mineur, sur une distance qui va de quelques mètres à plusieurs kilomètres. Sa limite est celle des crues exceptionnelles.

On distingue deux types de zones :

- les zones d'écoulement, au voisinage du lit mineur ou des chenaux de crues, où le courant a une forte vitesse.
- les zones d'expansion de crues ou de stockage des eaux, où la vitesse est faible. Ce stockage est fondamental, car il permet le laminage de la crue, c'est-à-dire la réduction du débit et de la vitesse de montée des eaux à l'aval.

Le lit moyen

Sous certains climats, notamment méditerranéens, il peut être identifié un lit moyen. Pour les crues de période de retour de 1 à 10 ans, l'inondation submerge les terres bordant la rivière et s'étend dans le lit moyen. Il correspond à l'espace fluvial ordinairement occupé par la ripisylve, sur lequel s'écoulent les crues moyennes.

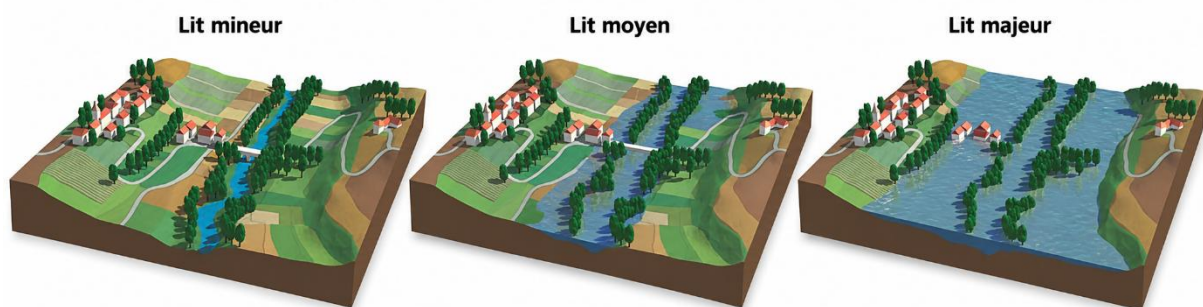


Figure 33: Schéma illustratif des différents lits d'une rivière

La ripisylve est la végétation abondante et variée qui borde les rivières. On distingue trois étages :

- Arborescent (frêne, peuplier, saule blanc, etc.).
- Arbustif (fusain, troène, cornouiller, saules buissonnants, etc.).
- Herbacé (ortie, « roseaux », etc.).

4- Le processus de formation des crues

Comprendre ce processus revient à analyser les différents facteurs concourant à la formation et à l'augmentation temporaire des débits d'un cours d'eau. En simplifiant, on distingue :

- L'eau mobilisable, constituée de l'eau reçue par le bassin versant.
- Le ruissellement, qui correspond à la part de l'eau qui n'a pu s'infiltrer dans le sol. Il dépend de la nature du sol, de son occupation de surface et de l'intensité de l'épisode pluvieux.
- Le temps de concentration, qui est défini par la durée nécessaire pour qu'une goutte d'eau partant du point le plus éloigné de l'exutoire du bassin versant parvienne jusqu'à celui-ci.
- La propagation de l'onde de crue, qui est fonction de la structure du lit et de la vallée alluviale, notamment de la pente et des caractéristiques du champ d'inondation.

5- L'influence des facteurs naturels

De nombreux paramètres influencent l'apparition d'une crue. Tout d'abord la quantité et surtout la répartition spatiale et temporelle des pluies, par rapport au bassin versant, sont déterminantes. Il peut s'agir de pluies répétées et prolongées de régime océanique (celles affectant par exemple les grands bassins de la Loire ou de la Seine) ou d'averses intenses de courte durée, qui touchent de petits bassins versants.

La nature et l'occupation du sol dictent l'évaporation et la consommation d'eau par les plantes. L'absorption d'eau par le sol, l'infiltration dans le sous-sol ou le ruissellement influencent fortement le temps de concentration des eaux. Enfin, la topographie du lit, la pente et la forme du bassin versant jouent également. Ainsi, pour une même quantité de pluie, une crue apparaîtra ou non.

À ces paramètres s'ajoutent des facteurs naturels aggravants, comme la formation et la rupture d'embâcles ou la fonte des neiges. Les matériaux flottants transportés par le courant peuvent en effet s'accumuler en amont des passages étroits. La rupture éventuelle de ces embâcles provoque une onde puissante et destructrice en aval. Concernant la fonte des neiges, il est rare en France que des crues importantes soient provoquées uniquement par ce phénomène, même s'il demeure un facteur aggravant.

6- L'aléa inondation

Quatre paramètres principaux sont nécessaires pour qualifier l'aléa inondation.

6.1. La période de retour de crues

On associe souvent à la notion de crue la notion de période de retour (crue décennale, centennale, millennale, etc.) : plus cette période est grande, plus les débits et l'intensité sont importants.

On distingue par ordre croissant :

- les crues fréquentes, dont la période de retour est comprise entre un et deux ans ;
- les crues moyennes, dont la période de retour est comprise entre dix et vingt ans ;
- les crues exceptionnelles, dont la période de retour est de l'ordre de cent ans ;
- la crue maximale vraisemblable, qui occupe l'intégralité du lit majeur.

Les événements les plus souvent représentés sur la carte d'aléa sont la crue décennale (Q10) et la crue centennale (Q100).

L'aléa de référence servant de base à l'élaboration des documents réglementaires correspond à l'événement centennal ou au plus fort événement connu, s'il présente une fréquence supérieure à cent ans.

6.2. La hauteur et la durée de submersion

La hauteur de submersion peut avoir un impact important sur le bâti, notamment lorsqu'elle dépasse la cote de référence. La structure porteuse de l'habitation peut être endommagée et les sols et murs gorgés d'eau.

Lorsque la durée de submersion est importante (supérieure à 24 h voire 48 h), des problèmes sanitaires peuvent survenir, l'eau étant souvent sale, contaminée par les égouts ou parfois le mazout échappé des cuves. Pour l'homme, on considère généralement que des hauteurs d'eau supérieures à 50 cm sont dangereuses. À titre d'exemple, une voiture commence à flotter à partir de 30 cm d'eau.

6.3. La vitesse du courant

La vitesse d'écoulement est conditionnée par la pente du lit et sa rugosité. Elle peut atteindre plusieurs mètres par seconde. La dangerosité de l'écoulement dépend du couple hauteur / vitesse.

À titre d'exemple, à partir de 0,50 m / s, la vitesse du courant devient dangereuse pour l'homme, avec un risque d'être emporté par le cours d'eau ou d'être blessé par des objets charriés à vive allure.

6.4. Le volume de matière transportée

Ce volume est communément appelé « transport solide ». Il s'agit de matériaux (argiles, limons, sables, graviers, galets, blocs, etc.) se trouvant dans les cours d'eau, et dont le transport peut s'effectuer soit par suspension dans l'eau, soit par déplacement sur le fond du lit, du fait des forces liées au courant.

Le terme de transport solide ne comprend pas le transport des flottants (bois morts...).



Figure 34: Le transport solide

Chacun des trois derniers paramètres a plus ou moins d'importance selon les caractéristiques morphodynamiques de la rivière. Par exemple, l'aléa inondation d'une rivière, dont la pente en long est faible (inférieure à 0,1 %) sera surtout caractérisé par la hauteur et la durée de submersion. L'aléa inondation d'une rivière torrentielle sera essentiellement caractérisé par une vitesse du courant élevée et un fort transport solide.

Morphodynamique : ensemble des paramètres morphologiques (tracé du cours d'eau, pente en long, etc.) et dynamiques (vitesse de montée des eaux, érosion, alluvionnement, etc.) d'une rivière.

Pente en long : pente longitudinale d'un cours d'eau.

7- Le risque d'inondation

7.1. L'influence des facteurs anthropiques

Les facteurs anthropiques constituent des facteurs aggravants et ont un rôle fondamental dans la formation et l'augmentation des débits des cours d'eau.

L'urbanisation et l'implantation d'activités dans les zones inondables

Elles constituent la première cause d'aggravation du phénomène. En parallèle, l'augmentation du niveau de vie et le développement des réseaux d'infrastructures ont accru dans des proportions notables la valeur globale des biens et la fragilité des activités exposées (vulnérabilité).

La diminution des champs d'expansion des crues

Consécutives à l'urbanisation et parfois aggravées par l'édification de digues ou de remblais, elles ont pour conséquence une réduction de l'effet naturel d'écrêtement des crues, bénéfique aux secteurs habités en aval des cours d'eau.

L'aménagement parfois hasardeux des cours d'eau

Beaucoup de rivières ont été modifiées localement sans se soucier des conséquences en amont ou en aval. Ces aménagements (suppression de méandres, endiguement, etc.) peuvent avoir pour conséquences préjudiciables l'accélération de crues en aval et l'altération du milieu naturel.

La défaillance des dispositifs de protection

Le rôle des dispositifs de protection (digues, déversoirs) peut être limité. Leur mauvaise utilisation et leur manque d'entretien peuvent parfois exposer davantage la plaine alluviale que si elle n'était pas protégée.

L'utilisation ou l'occupation des sols sur les pentes des bassins versants

Toute modification de l'occupation du sol (déboisement, suppression des haies, pratiques agricoles, imperméabilisation) empêchant le laminage des crues et la pénétration des eaux, favorise une augmentation du ruissellement, un écoulement plus rapide et une concentration des eaux.

Les pratiques agricoles : le sens des cultures joue un rôle important dans le phénomène de ruissellement, non seulement du point de vue de la quantité d'eau ruisselée mais également

de la quantité de matériaux emportés. L'idéal est de cultiver dans un sens parallèle aux lignes de niveau.

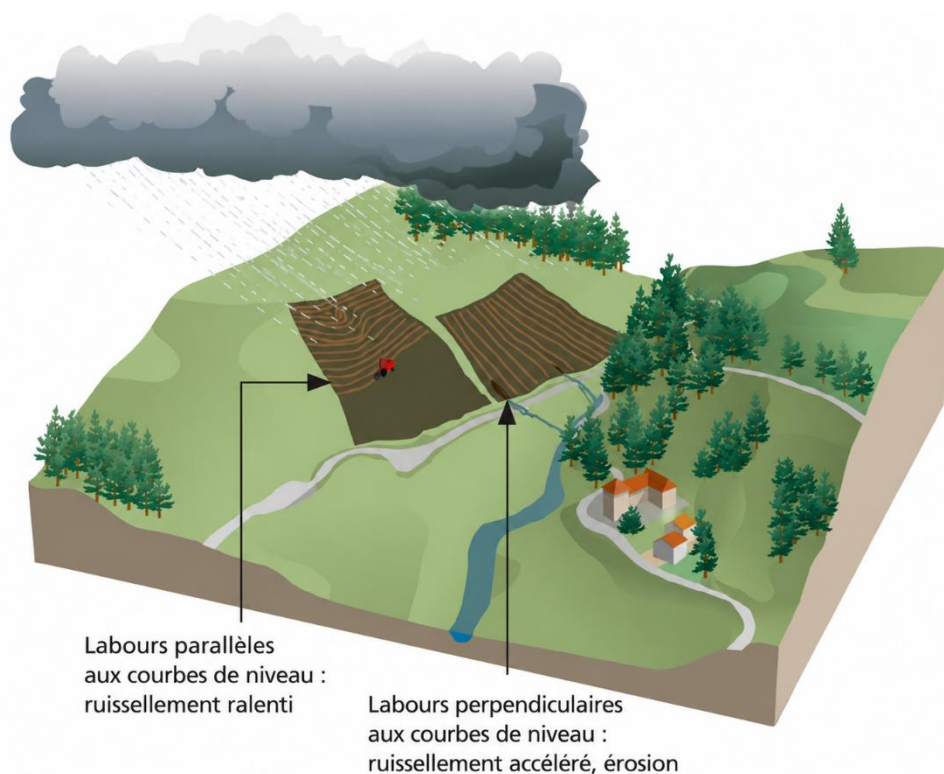


Figure 35: Schéma illustrant l'influence de l'orientation des labours sur le ruissellement et l'érosion des sols.

7.2. Les atteintes aux hommes, aux biens et aux activités

La vulnérabilité de la population est provoquée en particulier par sa localisation en zone inondable. Sa mise en danger survient surtout lorsque les délais d'alerte et d'évacuation sont trop courts ou inexistants, lors des crues rapides ou torrentielles.

Le danger se traduit par le risque d'être emporté ou noyé, ainsi que par l'isolement sur des îlots coupés de tout accès. Lors des inondations du Sud-Est des dix dernières années, plus du tiers des victimes étaient des automobilistes surpris par la crue.

L'interruption des communications peut gêner, voire empêcher l'intervention des secours. Par ailleurs, on estime que les dommages indirects (perte d'activité, chômage technique, etc.) sont souvent plus importants que les dommages directs occasionnés aux biens mobiliers et immobiliers.

7.3. Les atteintes à l'environnement

Les dégâts au milieu naturel sont dus à l'érosion, aux déplacements du lit ordinaire, aux dépôts de matériaux, etc. Les phénomènes d'érosion, de charriage, de suspension de matériaux et d'alluvionnement participent à l'évolution du milieu naturel dans ces aspects positifs comme négatifs.

Pour les zones industrielles situées en zone inondable, un risque de pollution et d'accident technologique est à prendre en compte.

8- Les actions de prévention et de secours

8.1. Les responsabilités

Face au risque d'inondation, l'État et les collectivités territoriales ont un rôle de prévention qui se traduit notamment par des actions d'information et une politique d'entretien et de gestion des cours d'eau domaniaux.

De plus, les collectivités territoriales ont à leur charge la prise en compte du risque dans les documents d'urbanisme et l'État la réalisation des plans de prévention des risques naturels (PPR) pour les communes les plus menacées.

Cependant, les propriétaires riverains de cours d'eau non domaniaux ont aussi un rôle essentiel à jouer. Ils ont l'obligation :

- de curer régulièrement le lit, pour rétablir le cours d'eau dans sa largeur et sa profondeur naturelles ;
- d'entretenir les rives leur appartenant ;
- d'enlever les embâcles et débris, pour maintenir l'écoulement naturel des eaux et assurer la bonne tenue des berges.

8.2. La prévision et la prévention

8.2.1. La prévision

L'inondation est un risque prévisible dans son intensité, mais il est difficile de connaître le moment où il se manifesterait. Les paramètres concourant à la formation des crues sont nombreux, cependant l'un d'eux est déterminant : la pluie.

La prévision des inondations consiste donc principalement en une observation continue des précipitations. Le centre météorologique de Toulouse publie quotidiennement une carte de vigilance à quatre niveaux, diffusée par les médias. Il est cependant difficile de quantifier avec précision les précipitations et surtout de localiser le ou les petits bassins versants qui seront concernés.

8.2.2. La prévention

La prévention regroupe l'ensemble des dispositions à mettre en œuvre pour réduire l'impact d'un phénomène naturel prévisible sur les personnes et les biens.

Les inondations

En matière d'inondation, il est difficile d'empêcher les événements de se produire. De plus, les ouvrages de protection collectifs, comme les digues, ne peuvent garantir une protection absolue et procurent un faux sentiment de sécurité. En conséquence, le meilleur moyen de prévention contre les risques d'inondation est d'éviter d'urbaniser les zones exposées. Pour autant, de nombreuses habitations existent déjà dans ces zones.

Face à ce constat, il faut agir sur la réduction de la vulnérabilité des enjeux, c'est-à-dire sur la limitation des éventuels dommages : on parle de mitigation. Celle-ci concerne uniquement les biens économiques : les constructions (privées et publiques), les bâtiments industriels et commerciaux, ceux nécessaires à la gestion de crise, les réseaux de communication, d'électricité, d'eau, de communication, etc.

La mitigation suppose notamment la formation des divers intervenants (architectes, ingénieurs en génie civil, entrepreneurs etc.) en matière de conception et de prise en compte des phénomènes naturels (climatiques et géologiques), ainsi que la définition de règles de construction. Leur application doit par ailleurs être garantie par un contrôle des ouvrages. Cette action sera d'autant plus efficace quand tous les acteurs concernés, c'est-à-dire

également les intermédiaires tels que les assureurs et les maîtres d'œuvre, y seront sensibilisés.

Si l'État et les communes ont des responsabilités dans ce domaine, les propriétaires, locataires ou plus simples citoyens, peuvent contribuer à se protéger efficacement et diminuer leur propre vulnérabilité. Pour cela, il est primordial que chacun connaisse au préalable le phénomène auquel il est exposé, en s'informant sur sa description, l'accident possible et les dommages potentiels.

Une bonne anticipation de la crise est ensuite nécessaire. La meilleure réponse permettant de faire face à la gravité d'une inondation en attendant les secours est un plan familial de mise en sûreté (PFMS). Un tel plan se prépare à l'avance, afin d'éviter la panique au moment de l'événement. Il est recommandé d'y faire figurer des informations sur le signal d'alerte et les consignes de sécurité, les numéros utiles (urgence, services de l'État, compagnie d'assurance, etc.), les fréquences radio et tout autre élément à adapter à chaque situation familiale.

Le PFMS comprend la préparation d'un kit inondation, composé d'une radio avec ses piles de rechange, d'une lampe de poche, d'eau potable, des médicaments urgents, des papiers importants, de vêtement de rechange et de couvertures. Il peut également être nécessaire de posséder des dispositifs de protection temporaires, comme les batardeaux ou les couvercles de bouche d'aération. Une réflexion préalable sur les itinéraires d'évacuation, les lieux d'hébergement et les objets à mettre à l'abri en priorité en cas d'inondation, complètera ce dispositif. Pour être efficace, un PFMS doit être testé en famille AVANT une inondation, lors d'exercices de simulations.

La capacité d'anticipation des maîtres d'ouvrages privés (particuliers et entrepreneurs) est primordiale. Pour réduire leur vulnérabilité, de nombreux moyens existent, tant au niveau des matériaux utilisés que des méthodes de construction. Par exemple des matériaux imputrescibles peuvent être privilégiés pour réaliser les parties des constructions ou les installations situées au-dessous de la cote de référence. La mise en place de dispositifs de mise hors circuit automatique permet également de protéger les réseaux électriques situés au-dessous de cette cote. Enfin, toutes les installations fixes sensibles, telles qu'appareillages électriques et électroniques, moteurs compresseurs, machineries d'ascenseur, appareils de

production de chaleur ou d'énergie peuvent être implantés à une cote supérieure à la cote de référence.

Le but de toutes ces démarches est de rendre le coût de la remise en état après l'inondation le plus faible possible.

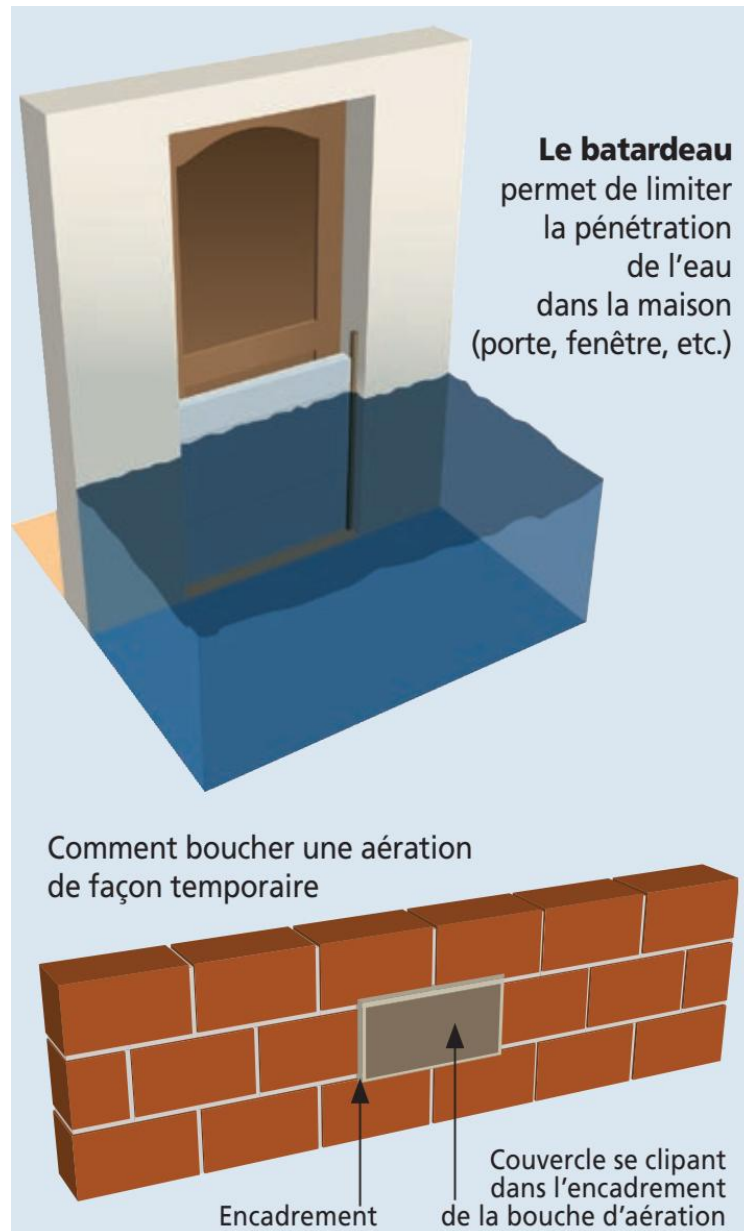


Figure 36: Schéma illustrant les dispositifs temporaires de protection des ouvertures contre les inondations.

Les crues torrentielles

La prévention en matière de crues torrentielles consiste à effectuer des travaux de correction active ou passive pour réduire le transport solide en provenance du lit et du bassin versant.

Enfin, l'entretien des cours d'eau (curage régulier, entretien des rives et des ouvrages, etc.) est une nécessité pour éviter l'aggravation des inondations. Cet entretien est à la charge du propriétaire, c'est-à-dire l'État ou les collectivités territoriales et leurs regroupements pour les cours d'eau domaniaux et les propriétaires riverains pour les cours d'eau non domaniaux.

Dans certains cas de carence, la commune peut se substituer aux propriétaires privés. La création d'associations syndicales regroupant les propriétaires ou de syndicats intercommunaux selon les enjeux, est à encourager.

La correction active dispositions visant à réduire les transports solides en agissant directement sur les processus d'érosion et leur cause (exemple : reforestation).

La correction passive consiste seulement à se protéger du phénomène en contrôlant le déroulement et les conséquences de la crue (exemple : barrage-seuil)

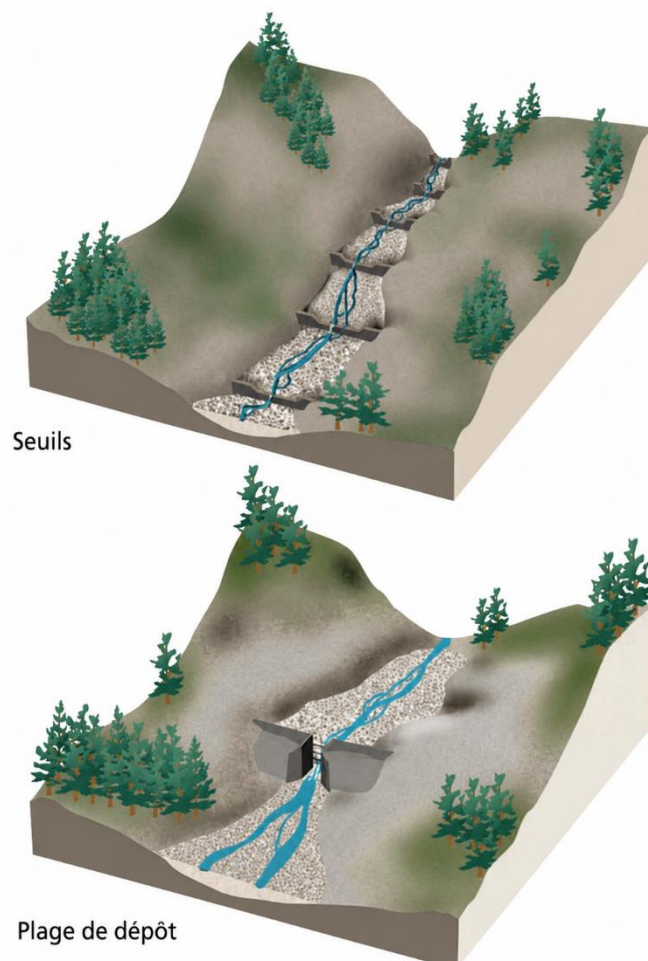


Figure 37: Schéma illustrant les ouvrages de correction torrentielle : seuils et plages de dépôt

8.3. La prise en compte du risque dans l'aménagement

La maîtrise de l'urbanisation s'exprime à travers deux documents.

Le document d'urbanisme

Le Code de l'urbanisme impose la prise en compte des risques dans les documents d'urbanisme. Ainsi, les plans locaux d'urbanisme (PLU) permettent de refuser ou d'accepter sous certaines conditions un permis de construire, notamment dans des zones inondables.

Le plan de prévention des risques

Les plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR), établis par l'État, définissent des zones d'interdiction et des zones de prescription, constructibles sous réserve. Ils peuvent imposer d'agir sur l'existant pour réduire la vulnérabilité des biens. La loi réglemente l'installation d'ouvrages susceptibles de provoquer une gêne à l'écoulement des eaux en période d'inondation.

8.4. L'alerte et les consignes

Le signal d'alerte

Le signal national d'alerte consiste en trois émissions successives d'une minute chacune et séparées par des intervalles de cinq secondes, d'un son modulé en amplitude ou en fréquence. Des essais ont lieu le premier mercredi de chaque mois à midi.

Le signal est diffusé par tous les moyens disponibles et notamment par le réseau national d'alerte et les équipements des collectivités territoriales. Il est relayé par les dispositifs d'alarme et d'avertissement dont sont dotés les établissements recevant du public, et par les dispositifs d'alarme et de détection dont sont dotés les immeubles de grande hauteur.

Les messages d'alerte

Les messages d'alerte contiennent des informations relatives à l'étendue du phénomène (tout ou partie du territoire national) et indiquent la conduite à tenir. Ils sont diffusés par les radios et les télévisions.

La fin de l'alerte

Le signal de fin d'alerte consiste en une émission continue d'une durée de trente secondes d'un son à fréquence fixe. La fin de l'alerte est annoncée sous la forme de messages diffusés

par les services de radiodiffusion sonore et de télévision, dans les mêmes conditions que pour la diffusion des messages d'alerte.

Si le signal national d'alerte n'a été suivi d'aucun message, la fin de l'alerte est signifiée à l'aide du même support que celui ayant servi à émettre ce signal.

Les consignes

Un certain nombre de consignes générales à suivre « Avant, Pendant et Après » une alerte ont été définies. Elles sont complétées par des consignes spécifiques à chaque risque.

CONSIGNES SPÉCIFIQUES		
AVANT	PENDANT	APRÈS
Prévoir les gestes essentiels : - mettre au sec les meubles, objets, matières et produits ; - couper l'électricité et le gaz ; - obturer les entrées d'eau : portes, soupieraux, évents ; - amarrer les cuves, etc. ; - garer les véhicules ; - faire une réserve d'eau potable et de produits alimentaires. Prévoir les moyens d'évacuation.	S'informer de la montée des eaux par radio ou auprès de la mairie. Dès l'alerte : - couper le courant électrique, actionner les commutateurs avec précaution ; - aller sur les points hauts préalablement repérés (étages des maisons, collines). N'entreprendre une évacuation que si vous en recevez l'ordre des autorités ou si vous êtes forcés par la crue. Ne pas s'engager sur une route inondée (à pied ou en voiture) : lors des inondations du Sud-Est des dix dernières années, plus du tiers des victimes étaient des automobilistes surpris par la crue.	Dans la maison : - aérer ; - désinfecter à l'eau de javel ; - chauffer dès que possible ; - ne rétablir le courant électrique que si l'installation est sèche.

CONSIGNES GÉNÉRALES		
AVANT	PENDANT	APRÈS
Prévoir les équipements minimums : - radio portable avec piles ; - lampe de poche ; - eau potable ; - papiers personnels ; - médicaments urgents ; - couvertures ; - vêtements de rechange ; - matériel de confinement. S'informer en mairie : - des risques encourus ; - des consignes de sauvegarde ; - du signal d'alerte ; - des plans d'intervention (PPI). Organiser : - le groupe dont on est responsable ; - discuter en famille des mesures à prendre si une catastrophe survient (protection, évacuation, points de ralliement). Simulations : - y participer ou les suivre ; - en tirer les conséquences et enseignements.	Évacuer ou se confiner en fonction de la nature du risque. S'informer : écouter la radio. Les premières consignes seront données par France-Inter (1 852 mGO soit 162 kHz ou 87.8 FM). Inform le groupe dont on est responsable. Ne pas aller chercher les enfants à l'école.	S'informer : écouter et suivre les consignes données par la radio et les autorités. Inform les autorités de tout danger observé. Apporter une première aide aux voisins ; penser aux personnes âgées et handicapées. Se mettre à la disposition des secours. Évaluer : - les dégâts ; - les points dangereux et s'en éloigner. Ne pas téléphoner.

8.5. Les moyens de protection

La protection consiste en l'aménagement du cours d'eau ou du bassin versant en vue de contrôler le déroulement et les conséquences de la crue : on parle de protection passive. Diverses mesures existent, tels que les enrochements, endiguements, pièges à matériaux, plages de dépôts, etc.

Ces protections sont efficaces pour une certaine intensité du phénomène, appelée crue de projet. En cas de dépassement de celle-ci, les protections peuvent être inefficaces, voire dangereuses en cas de rupture. C'est le cas par exemple des digues qui peuvent être submergées ou des barrages écrêteurs sur les grands fleuves, dont l'efficacité est faible en cas de crue majeure.

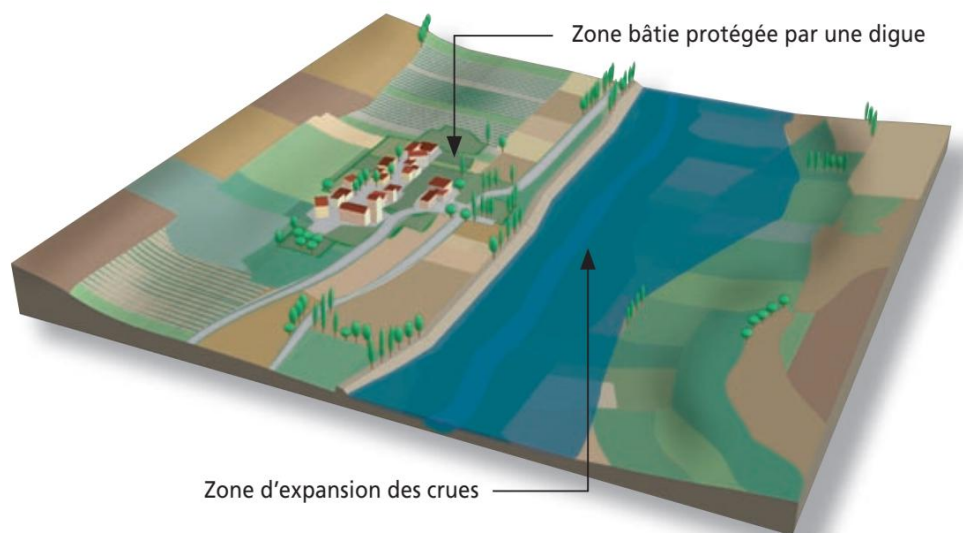


Figure 38: Schéma illustrant le rôle des digues et des zones d'expansion des crues dans la gestion des inondations.

9- Modélisation hydraulique et cartographie des zones inondables avec HEC-RAS

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) est un logiciel de modélisation hydraulique développé par le U.S. Army Corps of Engineers. Il permet de simuler l'écoulement de l'eau dans les rivières, les canaux et les plaines inondables afin d'évaluer les niveaux d'eau, les vitesses d'écoulement et l'étendue des inondations. Il est largement utilisé pour la cartographie des zones inondables, la gestion des risques d'inondation et la conception d'ouvrages hydrauliques.

La modélisation des inondations avec HEC-RAS suit une démarche méthodologique structurée comprenant les étapes suivantes : (1) collecte et préparation des données, (2) construction du

modèle géométrique, (3) définition des conditions hydrauliques, (4) simulation hydraulique, (5) cartographie des zones inondables, et (6) validation et interprétation des résultats. Ces étapes permettent de simuler le comportement hydraulique d'un cours d'eau et de produire des cartes fiables des zones susceptibles d'être inondées.

CHAPITRE IV : SEISMES

Introduction

Un séisme ou un tremblement de terre se traduit en surface par des vibrations du sol. Il provient de la fracturation des roches en profondeur. Cette fracturation est due à une grande accumulation d'énergie qui se libère, en créant ou en faisant rejouer des failles, au moment où le seuil de ruptures mécaniques des roches sont atteintes.

La croûte terrestre est constituée des plusieurs grandes plaques qui évoluent les unes par rapport aux autres, certaines s'écartent, d'autres convergent et d'autre coulissent.

Environ 90% des séismes sont localisés aux voisinages des limites de ces plaques.

- Comment se produit-il un séisme ?
- Quel sera le dégât suivi par ce séisme ?

1- Définition de séismes

Le mot séisme vient des grecs *seismos* qui signifie « secousse ». C'est une série de secousses du sol, plus ou moins violentes, soudaines, imprévisibles et localisées.

On parle également de tremblement de terre. Le plus souvent, un séisme se compose d'une ou de plusieurs secousses principales brèves (quelques dizaines de secondes) suivies par d'autres secousses, appelées répliques, qui surviennent au cours des heures et des jours suivants.

Les séismes mettant en évidence l'activité interne de la terre. Ils sont provoqués soit par les mouvements des plaques tectoniques le long des lignes de fracture (failles) de la croûte terrestre (séismes tectoniques), soit par des montées de laves lors d'éruptions volcaniques (séismes volcaniques).

On appelle foyer du séisme le point de rupture ou du déplacement des roches. A partir du foyer, des ondes sismiques se propagent dans toutes les directions. L'épicentre du séisme est le point situé, en surface, à la verticale du foyer ; il en est donc le point le plus proche (fig 39).

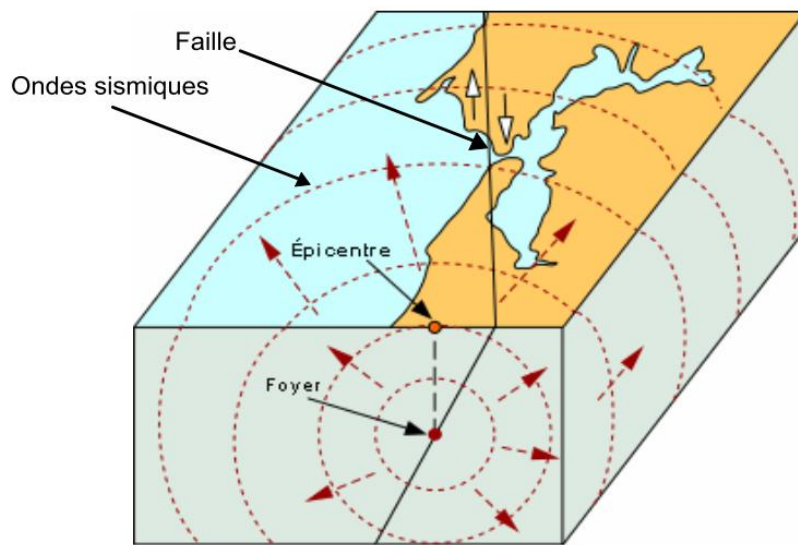


Figure 39: composantes d'un séisme

1.1. Les failles

La faille est le résultat de la rupture d'un ensemble rocheux sous l'effet des contraintes auxquelles il est soumis.

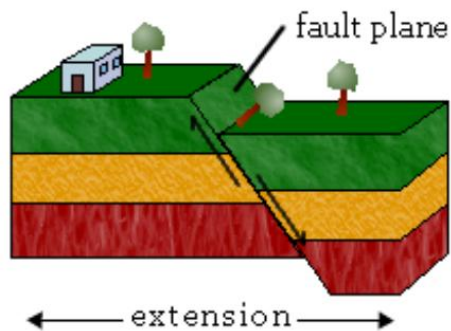
On appelle mécanisme au foyer, le mécanisme permettant de définir quel type de faille intervient dans le tremblement de terre, ainsi que l'orientation de la faille et la direction de glissement des blocs sur cette faille. On peut ainsi définir la nature convergente ou divergente des mouvements à l'origine des séismes.

Le mécanisme au foyer d'un séisme est généralement une combinaison de mécanismes simples. Il existe trois sortes de failles et trois sortes de mécanismes au foyer. On représente le type de mécanisme au foyer par une sphère centrée autour du foyer du séisme.

Cette sphère est découpée en quatre cadrans en lien avec le sens du mouvement des ondes P.

A chaque type de faille, correspond ainsi un diagramme de mécanisme au foyer.

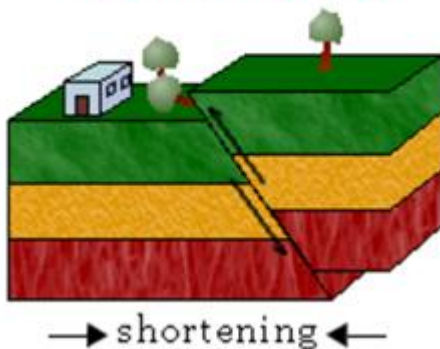
Les failles normales



Dans le cas d'une faille normale, le bloc au-dessus de la faille bouge vers le bas par rapport au bloc en dessous. Ce mouvement est créé par des forces en extension et provoque un allongement.

Elles sont appelées ainsi parce que la déformation entraîne un étirement des roches initiales. Elle résulte du mouvement d'écartement (divergence).

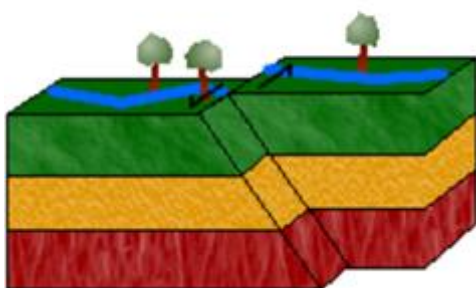
Les failles inverses



Dans le cas d'une faille inverse, le bloc au-dessus de la faille bouge vers le haut par rapport au bloc en dessous. Ce mouvement est créé par des forces en compression et provoque un raccourcissement.

Elles sont appelées ainsi parce que la déformation entraîne un raccourcissement des terrains initiaux. Elles résultent de mouvements de rapprochement (convergence).

Les failles en décrochement



Dans le cas d'une faille décrochant, le mouvement entre les blocs de part et d'autre de la faille est horizontal. Si comme dans l'animation le bloc de droite part vers la gauche (par rapport à l'autre bloc), la faille est dite senestre (et dextre dans le cas inverse). Ce mouvement est créé par des forces de cisaillement.

1.2. Les ondes sismiques

Les ondes sismiques sont des ondes élastiques qui peuvent traverser un milieu sans le modifier.

L'impulsion de départ va "entamer" les particules élémentaires présentes dans le milieu, qui vont "pousser" d'autres particules avant de reprendre leur place, se propageant suivant une réaction en chaîne.

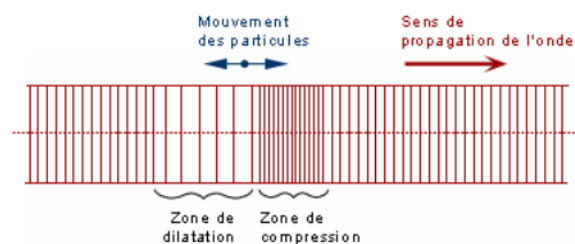
Les vibrations lors d'un séisme se propagent dans toutes les directions. On distingue deux types d'ondes, les ondes de volume qui traversent la Terre et les ondes de surface qui se propagent à sa surface. Sur les enregistrements des sismographes, elles se succèdent ou se superposent. Leur vitesse de propagation et leur amplitude sont modifiées par les structures géologiques qu'elles traversent, c'est pourquoi, les signaux enregistrés sont la combinaison d'effets liés à la source, aux milieux traversés et aux instruments de mesure.

1.2.1. Les ondes des volumes

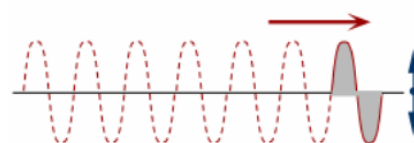
Elles se propagent à l'intérieur du globe. Leur vitesse de propagation dépend du matériau traversé et, d'une manière générale, cette dernière augmente avec la profondeur car le matériau traversé devient plus dense. On distingue :

Les ondes P ou ondes primaires appelées aussi ondes de compression ou ondes longitudinales. Le déplacement du sol qui accompagne leur passage se fait par des dilatations et des compressions successives. Ces déplacements du sol sont parallèles à la direction de propagation de l'onde. Ce sont les plus rapides ($6 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ près de la surface) et donc les premières à être enregistrées sur les sismogrammes. Elles sont responsables du grondement sourd que l'on peut entendre au début d'un tremblement de terre.

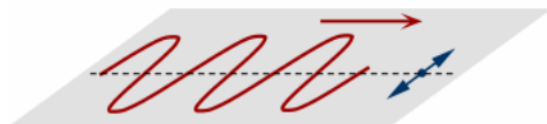
Onde P (compression)



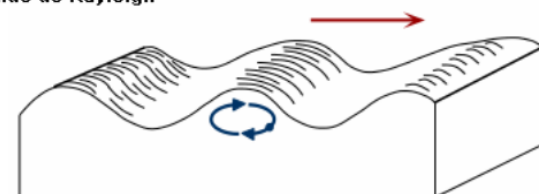
Onde S (cisaillement)



Onde L (de Love) (cisaillement)



Onde de Rayleigh



Les ondes S ou ondes secondaires appelées aussi ondes de cisaillement ou ondes transversales. À leur passage, les mouvements du sol s'effectuent perpendiculairement au sens de propagation de l'onde. Ces ondes ne se propagent pas dans les milieux liquides, elles sont en particulier arrêtées par le noyau externe de la Terre. Leur vitesse est plus que celle des ondes P, Elles apparaissent en second sur les sismogramme

La différence des temps d'arrivée des ondes P et S suffit, connaissant leur vitesse, à donner une indication sur l'éloignement du séisme. On peut ainsi localiser son épicentre à l'aide de trois sismogrammes. Les ondes de volume se propagent comme toutes les ondes, et en particulier comme les rayons lumineux : elles peuvent être réfléchies ou réfractées, c'est-à-dire déviées à chaque changement de milieu, au passage manteau-noyau par exemple. Elles peuvent ainsi suivre des trajets très complexes à l'intérieur de la Terre. Leur temps de parcours dépend de ce trajet, elles n'arrivent pas toutes en même temps au même endroit.

1.2.2. Les ondes de surface

Ce sont des ondes guidées par la surface de la Terre. Leur effet est comparable aux rides formées à la surface d'un lac.

Elles sont moins rapides que les ondes de volume mais leur amplitude est généralement plus forte.

On peut distinguer :

L'onde de Love : le déplacement est essentiellement le même que celui des ondes S sans mouvement vertical. Les ondes de Love provoquent un ébranlement horizontal qui est la cause de nombreux dégâts aux fondations des édifices.

L'onde de Rayleigh : le déplacement est complexe, assez semblable à celui d'une poussière portée par une vague, un mouvement à la fois horizontal et vertical, elliptique, en fait.

Les ondes de Love se propagent à environ 4 km/s, elles sont plus rapides que les ondes de Rayleigh.

2- Les moyennes des mesures

2.1. Le sismographe

Le sismographe est un instrument utilisé pour détecter, mesurer et enregistrer les vibrations produites par les séismes. Son principe repose sur une masse inertielle qui reste presque immobile tandis que le sol se déplace, ce qui permet d'enregistrer le mouvement sismique. Les sismographes modernes sont généralement de type pendulaire, équipés d'un système d'amortissement et d'un déclencheur automatique pour enregistrer les secousses. Un sismomètre mesure les mouvements du sol selon les trois directions (Nord-Sud, Est-Ouest et verticale), permettant l'enregistrement des ondes de volume et de surface sur une large

gamme de fréquences. Aujourd'hui, les systèmes numériques ont remplacé les anciens enregistrements analogiques, offrant une meilleure précision et facilitant le traitement des données sismiques.

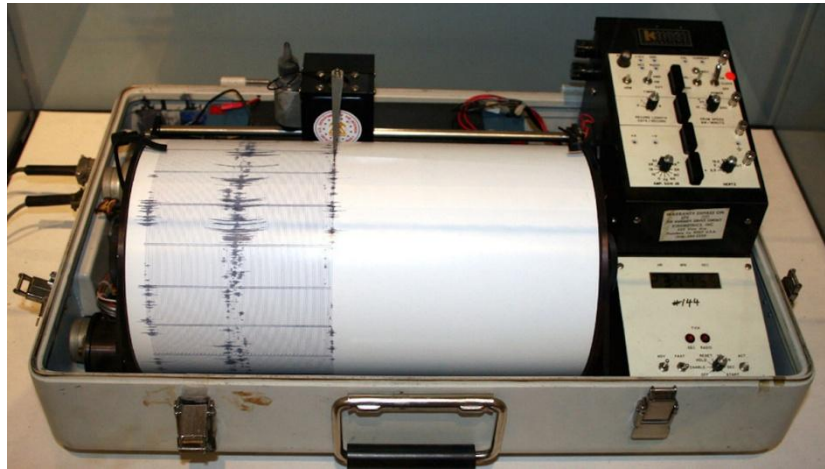


Figure 40: Sismographe

2.2. Le sismogramme

Le sismogramme est l'enregistrement graphique des vibrations du sol réalisé par un sismographe, où le temps est porté en abscisse et le mouvement du sol en ordonnée. Son analyse permet de déterminer la vitesse, la nature et le temps d'arrivée des ondes sismiques (P, S et L), ainsi que la distance à l'épicentre grâce à la différence de temps d'arrivée entre les ondes P et S. Les ondes P arrivent en premier, suivies des ondes S, puis des ondes L, qui présentent les amplitudes les plus élevées.

Le sismogramme permet également de calculer la magnitude d'un séisme, qui mesure l'énergie libérée à la source et reste indépendante de la distance d'enregistrement. Parmi les différentes méthodes de calcul, la plus connue est la magnitude locale (ML), ou échelle de Richter, utilisée principalement pour les séismes proches des stations sismologiques. Les systèmes modernes d'enregistrement permettent une analyse précise des signaux et une meilleure caractérisation des séismes.

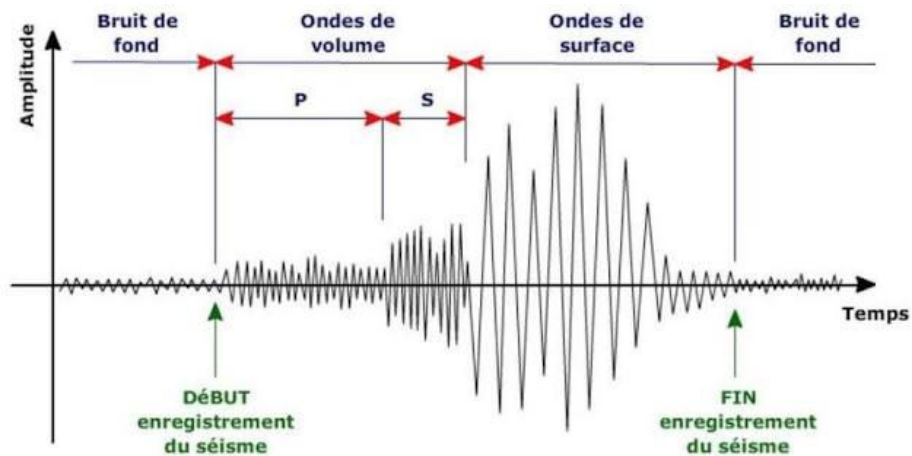
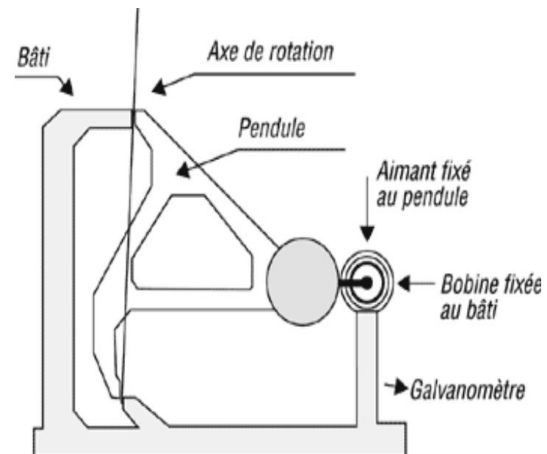
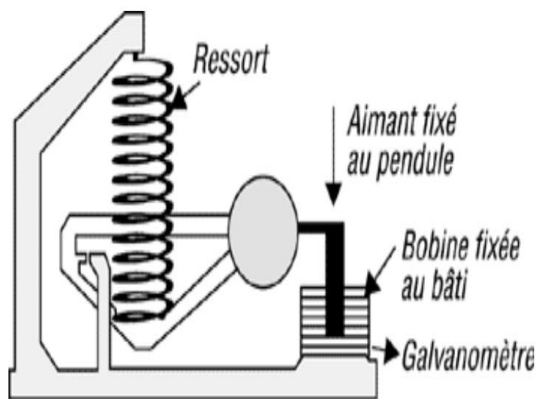


Figure 41: Exemple d'un sismogramme

2.3. Le sismomètre

Le sismomètre a connu une évolution progressive au fil des siècles. Le premier dispositif de détection des séismes a été inventé en 132 apr. J.-C. par le Chinois Chang Heng, capable d'indiquer la direction d'un séisme. Au XVIII^e siècle, Jean de Hautefeuille améliora ce principe avec un système à mercure. En 1875, Filippo Cecchi conçut le premier sismomètre capable d'enregistrer les mouvements du sol en fonction du temps. Par la suite, Robert Mallet, considéré comme l'un des fondateurs de la sismologie, étudia la propagation des ondes sismiques, tandis que Von Rebeur-Paschwitz réalisa le premier enregistrement d'un séisme à grande distance. Les sismomètres ont ensuite évolué vers des appareils plus précis et plus compacts. Les modèles actuels reposent sur le principe d'un pendule à forte inertie, permettant d'enregistrer les mouvements horizontaux et verticaux du sol.



Sismomètre horizontal

Figure 42: Schéma illustrant l'évolution des instruments de détection et d'enregistrement des séismes, depuis le sismoscope de Zhang Heng jusqu'aux stations sismologiques modernes, ainsi que le principe de fonctionnement des sismomètres électromagnétiques vertical

3- La source de séisme

3.1. Les mouvements des plaques

Les mouvements des plaques peuvent être divergents (extension), convergents (compression) ou en coulissage (cisaillement).

La croûte terrestre est formée par 8 grandes plaques et d'autres plus petites. Ces plaques sont connues sous le nom de plaque tectonique. Les plaques ne sont pas immobiles, elles se déplacent à des vitesses allant de 1-2cm/an pour les plaques les plus lentes, jusqu'à 6-7cm/an pour celles les plus rapides, et elles ne se déplacent pas toutes dans le même sens, sinon qu'elles peuvent le faire en sens opposés.

Le mouvement des plaques provoque des tensions, faisant que celles-ci s'accumulent jusqu'à un point où la résistance de la croûte ne peut plus supporter la tension et elle se casse. Au moment où a lieu cette rupture, l'énergie qui s'était accumulée se libère soudainement sous forme d'ondes qui se propagent dans toutes les directions en produisant une secousse du terrain. Le point où se produit la rupture est connu sous le nom d'hypocentre et sa projection à la surface terrestre est l'épicentre. La rupture se propage au long d'une faille dont les dimensions varient selon la magnitude du séisme.

Les principales plaques tectoniques :

- Plaque Nord Américaine: Amérique du Nord, nord-ouest Atlantique et Groenland.
- Plaque Sud Américaine: Amérique du Sud et sud-ouest Atlantique.
- Plaque Antartique: Antartique et "l'océan du sud".
- Plaque Eurasienne: Nord-est Atlantique, Europe et tout l'Asie sauf l'Inde.
- Plaque Africaine: Afrique, sud-est Atlantique et Océan Indien occidental.
- Plaque Austalienne/Indienne: Inde, Australie, Nouvelle Zélande et la majeure partie de l'Océan Indien.

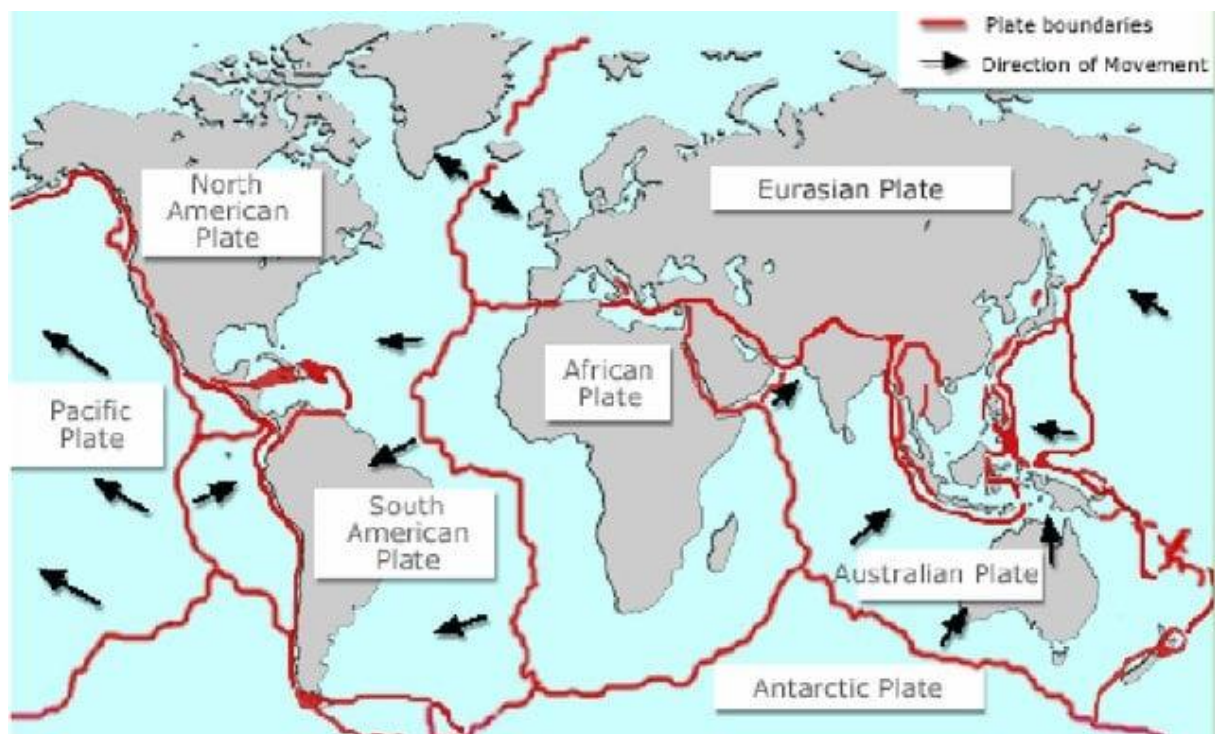


Figure 43: Carte du monde montrant les principales plaques tectoniques. Les zones de sismicité élevée se trouvent aux lignes inter-plaques

3.2. Les volcanismes

Les séismes superficiels exceptés quelque petite secousse d'origine volcanique, se produisent dans la partie cassante de la croûte terrestre. Les séismes d'origines volcaniques présentent

surtout l'intérêt d'annoncer des éruptions volcaniques. Ces tremblements de terre se manifestent lorsque le magma s'accumule dans la chambre magmatique d'un volcan.

Tandis que le sommet du volcan se soulève et que les flancs s'inclinent, de ruptures dans les roches comprimées sont révélées par une multitude de microséismes.

3.3. L'activité humaine

Certaines activités humaines peuvent occasionner des séismes généralement modérés. Il s'agit notamment de la mise en eau des barrages ou de l'exploitation des gisements souterrains (gaz, minerais, etc....).

Les hommes peuvent provoquer des séismes en raison de certaines activités telles que la constitution d'énormes réserves d'eau derrière des barrages, le pompage de fluides profonds, l'extraction minière ou les explosions souterraines de bombes atomiques. Des faibles séismes se produisent de temps en temps lors de l'effondrement de galeries de mines abandonnées.

4- Le mécanisme au foyer des séismes et sa représentation en « beach ball »

4.1. Définition du mécanisme au foyer

Le mécanisme au foyer (ou focal mechanism) est une représentation de la géométrie de la rupture sismique au niveau du foyer d'un séisme. Il permet de déterminer le mode de déplacement relatif des blocs rocheux le long du plan de faille responsable du séisme. À partir de l'analyse des premières arrivées des ondes P enregistrées par un réseau de stations sismiques, il est possible d'identifier les zones où le mouvement initial est en compression et celles où il est en dilatation.

Le mécanisme au foyer constitue un outil essentiel en sismologie, car il fournit des informations sur :

- Le type de faille responsable du séisme (normale, inverse ou décrochant).
- L'orientation de la faille.
- Le sens du déplacement.
- Le régime tectonique de la région étudiée.

4.2. Principe de détermination

Lorsqu'un séisme se produit, les premières ondes P enregistrées par les sismographes présentent soit :

- Une compression (premier mouvement vers le haut).
- Une dilatation (premier mouvement vers le bas).

Chaque station sismique fournit ainsi une information sur le sens du premier mouvement. En combinant les observations provenant de nombreuses stations réparties autour du foyer, il est possible de reconstituer le mécanisme de rupture.

4.3. Représentation en « Beach Ball »

Le mécanisme au foyer est généralement représenté par une projection hémisphérique appelée beach ball (« ballon de plage »), en raison de son aspect constitué de secteurs noirs et blancs.

Cette représentation est obtenue par la projection de l'hémisphère inférieur sur un cercle.

Dans cette représentation :

- Les zones noires correspondent aux directions où les premières ondes P sont en compression.
- Les zones blanches correspondent aux directions où les premières ondes P sont en dilatation.

Les limites entre ces domaines sont appelées plans nodaux.

Le beach ball comporte deux grands cercles qui divisent la sphère en quatre quadrants.

Ces deux cercles représentent les plans nodaux :

- L'un correspond au plan de faille réel.
- L'autre est le plan auxiliaire.

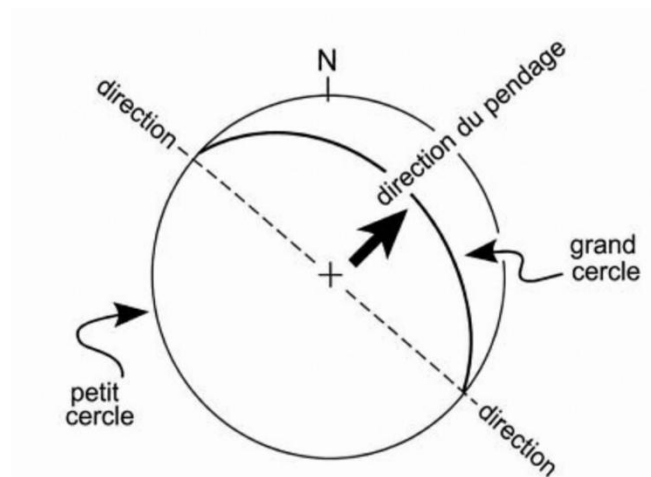


Figure 44: Représentation d'un plan géologique sur une projection stéréographique de l'hémisphère inférieure,

La figure 44 illustre la projection stéréographique de l'hémisphère inférieure, utilisée en géologie structurale et en sismologie pour représenter l'orientation d'un plan dans l'espace, notamment le plan de faille d'un mécanisme au foyer.

Le cercle primitif (petit cercle extérieur) représente la limite de l'hémisphère inférieure projeté. Le grand cercle correspond à la trace du plan géologique (ou plan de faille) sur la projection stéréographique.

La direction (strike) est définie par l'intersection du plan avec le plan horizontal. Elle est représentée par la ligne en pointillés traversant le cercle et s'exprime en azimuth par rapport au nord géographique (N).

La direction du pendage (dip direction) est perpendiculaire à la direction et indique le sens dans lequel le plan s'incline. La flèche montre ce sens de plongement du plan.

Cette représentation constitue la base de l'interprétation des mécanismes au foyer (focal mechanisms). En effet, les deux plans nodaux d'un mécanisme focal sont représentés par deux grands cercles sur une projection stéréographique, permettant de déterminer les paramètres géométriques de la faille : la direction (strike), le pendage (dip) et, en combinaison avec le vecteur de glissement, le rejet (rake).

4.4. Types de mécanismes au foyer

Les failles décrochantes produisent des mécanismes au foyer représentés par des beach balls présentant une configuration caractéristique en forme de croix. Le beach ball situé à droite

(a) possède deux plans nodaux verticaux, orientés respectivement selon les directions nord-sud et est-ouest.

Au moment où le séisme s'est produit, le déplacement des ondes P à travers les matériaux entourant le foyer a provoqué un mouvement des particules situées dans les quadrants noirs vers l'extérieur du foyer (compression), tandis que les particules situées dans les quadrants blancs se sont déplacées vers le foyer (dilatation) (b).

Ce mécanisme peut résulter soit d'un décrochement dextre le long d'une faille orientée est-ouest (c), soit d'un décrochement sénestre le long d'une faille orientée nord-sud (d). Des observations de terrain sont nécessaires pour déterminer lequel des deux plans nodaux correspond au véritable plan de faille et ainsi distinguer entre ces deux interprétations.

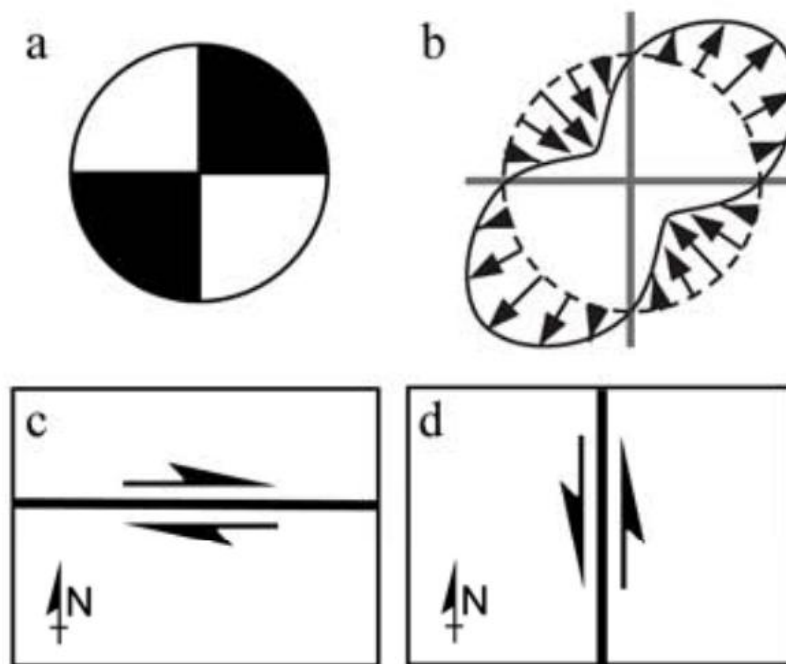


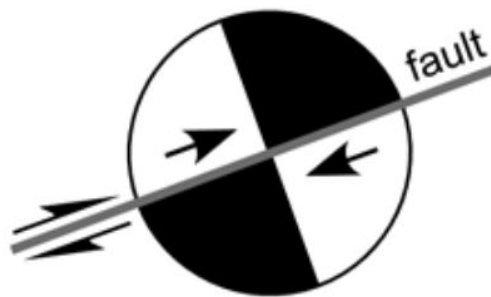
Figure 45: Représentation du mécanisme au foyer d'une faille décrochante et interprétation des plans nodaux.

Comment une personne peut-elle se rappeler facilement comment interpréter le sens du glissement sur une faille représentée par un diagramme de mécanisme au foyer (beach ball) ?

Prenons comme exemple le mécanisme de faille décrochante illustré en bas. Supposons que l'on sache que la faille active est orientée vers l'ouest est-nord-ouest (le long de la ligne grise). Pour interpréter le sens du mouvement, on peut imaginer se placer mentalement dans l'un

des quadrants blancs et regarder parallèlement à la faille en direction du quadrant noir situé immédiatement de l'autre côté du plan auxiliaire.

Un auteur propose un moyen mnémotechnique inspiré de la célèbre réplique de Dark Vador (Darth Vader) : « Rejoins le côté obscur » (Come to the dark side). La direction dans laquelle on se déplacerait pour répondre à cet appel indique le sens du glissement sur la faille : le mouvement s'effectue du quadrant blanc vers le quadrant noir.



Les failles à rejet vertical (dip-slip) regroupent les failles normales et les failles inverses (chevauchantes). Pour ces mécanismes de glissement pur selon le pendage, seuls trois des quatre quadrants sont visibles sur le diagramme du mécanisme au foyer (beach ball), comme illustré en figure 41.

Dans le cas d'un mécanisme de faille normale (a), le centre du beach ball est blanc, tandis que pour un mécanisme de faille inverse (b), le centre est noir.

Un auteur souligne également un moyen mnémotechnique : les mécanismes au foyer des failles inverses présentent une forme qui lui rappelle les yeux de son chat, ce qui permet de les reconnaître plus facilement.

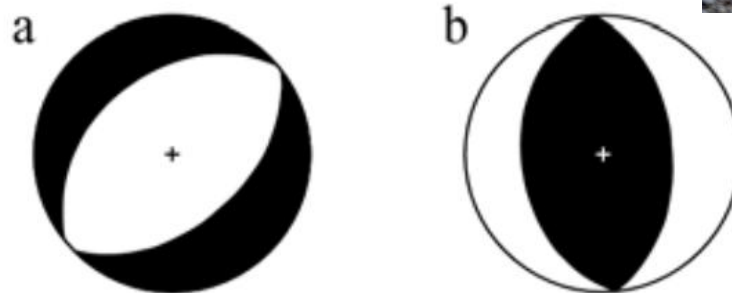


Figure 46: Mécanismes focaux des failles normale et inverse.

Les failles à glissement oblique (oblique-slip) combinent un mouvement horizontal (décrochement) et un mouvement vertical (selon le pendage). Pour ce type de mécanisme, les quatre quadrants sont visibles sur le diagramme du mécanisme au foyer (beach ball), comme illustré en figure 42.

Si le centre du beach ball se situe dans un quadrant blanc (a), la faille présente une composante normale de glissement, quel que soit le plan nodal correspondant au véritable plan de faille. En revanche, si le centre se trouve dans un quadrant noir (b), la faille présente une composante inverse (chevauchante) de glissement.

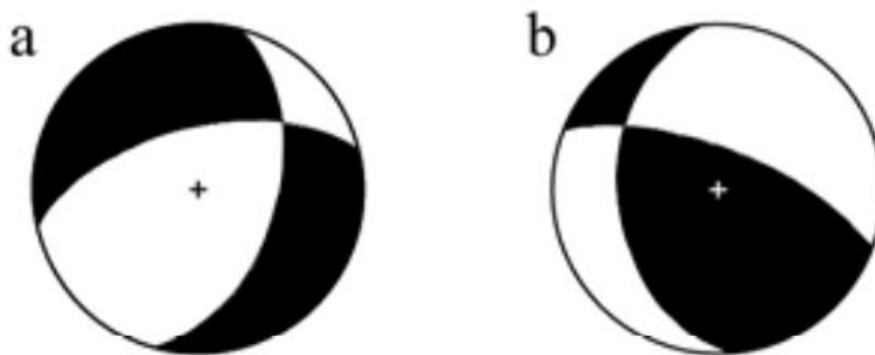


Figure 47: Mécanismes focaux des failles obliques.

4.5. Application d'interprétation des mécanismes au foyer

Quelques diagrammes de mécanismes au foyer (FMS – Focal Mechanism Solutions), représentés sous forme de beach balls, sont présentés ci-dessous. Pour chacun d'eux :

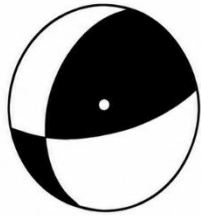
Identifiez le type général de faille correspondant parmi les catégories suivantes :

- Faille décrochante (strike-slip).
- Faille inverse (reverse fault).
- Faille normale (normal fault).
- Faille oblique normale (normal oblique-slip).
- Faille oblique inverse (reverse oblique-slip).

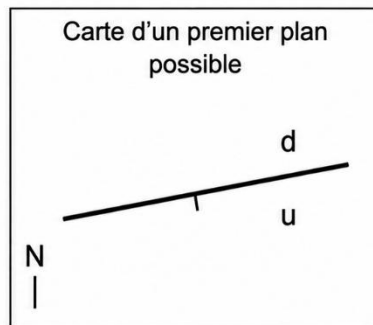
Réalisez un croquis en carte représentant chacun des deux plans nodaux possibles, en indiquant :

- leur direction (strike).
- leur direction de pendage (dip direction), lorsqu'elle existe.
- le sens du déplacement.

Le premier exemple est entièrement résolu afin de servir de modèle pour les exercices suivants.

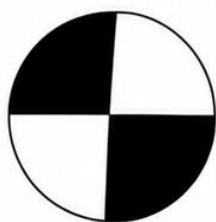


Type de faille :
oblique inverse



u = compartiment soulevé (Up)
d = compartiment abaissé (Down)

└ = sens du pendage (direction du plongement)

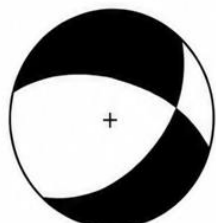


Type de faille :

Carte d'un premier plan possible

N
↑

Carte d'un deuxième plan possible

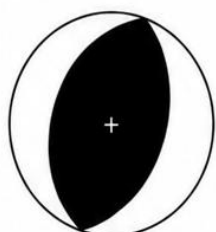
N
↑

Type de faille :

Carte d'un premier plan possible

N
↑

Carte d'un deuxième plan possible

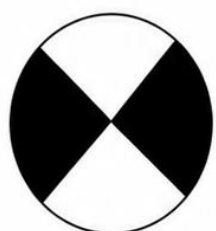
N
↑

Type de faille :

Carte d'un premier plan possible

N
↑

Carte d'un deuxième plan possible

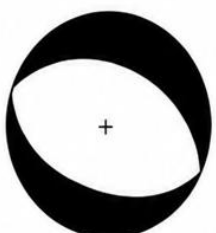
N
↑

Type de faille :

Carte d'un premier plan possible

N
↑

Carte d'un deuxième plan possible

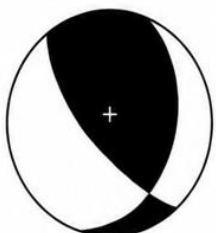
N
↑

Type de faille :

Carte d'un premier plan possible

N
↑

Carte d'un deuxième plan possible

N
↑

Type de faille :

Carte d'un premier plan possible

N
↑

Carte d'un deuxième plan possible

N
↑

4.6. Comment détermine-t-on un mécanisme au foyer ?

En pratique, un mécanisme au foyer (Focal Mechanism Solution, FMS) est aujourd'hui déterminé à partir de l'inversion du tenseur des moments sismiques, obtenue par l'analyse des formes d'ondes enregistrées par les stations sismiques. Plusieurs méthodes permettent d'estimer les composantes du tenseur des moments qui reproduisent le mieux les données observées pour un séisme donné.

Le diagramme du mécanisme au foyer est le résultat de cette inversion du tenseur des moments. Il peut également être obtenu par une méthode graphique basée sur l'étude des premiers mouvements des ondes P, comme cela sera décrit ci-après. Toutefois, cette approche graphique ne fournit pas suffisamment d'informations pour déterminer l'ensemble du tenseur des moments du séisme.

Les méthodes fondées sur l'analyse des premiers mouvements des ondes P, enregistrés par un réseau de sismographes, ont été développées avant l'apparition des ordinateurs modernes. Elles restent néanmoins très utiles d'un point de vue pédagogique, car elles permettent de comprendre les principes de construction d'un mécanisme au foyer (Kasahara, 1981).

La première étape consiste à déterminer l'épicentre et l'heure d'origine du séisme. Supposons, par exemple, qu'un séisme ait été enregistré par 14 stations sismiques réparties dans différentes régions. Les coordonnées de ces stations étant connues, il est possible de calculer la distance séparant chacune d'elles de l'épicentre.

À partir d'un modèle de vitesse des ondes sismiques dans la Terre, on calcule ensuite le temps théorique d'arrivée de l'onde P à chaque station.

Enfin, l'analyse des sismogrammes, notamment de leur composante verticale, permet de déterminer si le premier mouvement enregistré correspond à :

- Un mouvement vers le haut (Up), indiquant une compression.
- Un mouvement vers le bas (Down), indiquant une dilatation.
- Ou l'absence de premier mouvement clairement identifiable au moment attendu.

Ces observations constituent les données de base utilisées pour construire le mécanisme au foyer et représenter les quadrants de compression et de dilatation du diagramme en beach ball.

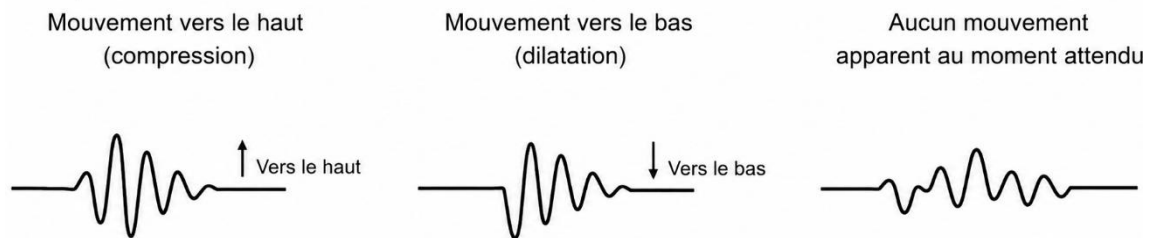


Figure 48: Identification du premier mouvement des ondes P sur un sismogramme.

La partie de l'énergie reçue par chaque sismographe, émise par le foyer du séisme sous forme d'une onde P de compression, peut être considérée comme ayant parcouru un trajet sismique (ray path) reliant le foyer à la station sismique.

Pour chaque station, deux paramètres doivent être déterminés :

- l'azimut, c'est-à-dire la direction suivant laquelle l'onde P s'est propagée du foyer jusqu'à la station ;
- l'angle d'émergence (take-off angle), également appelé angle de départ.

L'angle d'émergence est l'angle formé entre le rayon sismique au moment où il quitte le foyer et une droite verticale imaginaire passant par le foyer. En pratique, cet angle est déterminé à l'aide de tables ou de modèles reliant l'angle d'émergence à la distance entre le foyer et la station sismique (Hodgson et Storey, 1953 ; Hodgson et Allen, 1954).

Une fois ces paramètres déterminés, les données peuvent être reportées sur une projection stéréographique de l'hémisphère inférieur. Généralement, on utilise un stéréonet à aire égale (equal-area stereonet) (Sykes, 1967).

Chaque station sismique est représentée sur cette projection par l'un des trois symboles suivants :

- ○ (cercle blanc) : le premier mouvement de l'onde P est vers le bas (dilatation) ;
- ● (cercle noir) : le premier mouvement est vers le haut (compression) ;
- × (croix) : le premier mouvement est trop faible ou trop incertain pour être interprété.

Pour chaque station, le symbole est positionné sur une droite partant du centre de la projection dans la direction correspondant à l'azimut de la station par rapport au foyer. Sa distance au centre est déterminée par l'angle d'émergence.

Dans cet exemple, le symbole correspondant à la station A est placé à 60° du centre de la projection, le long d'une direction correspondant à un azimut de 50° .

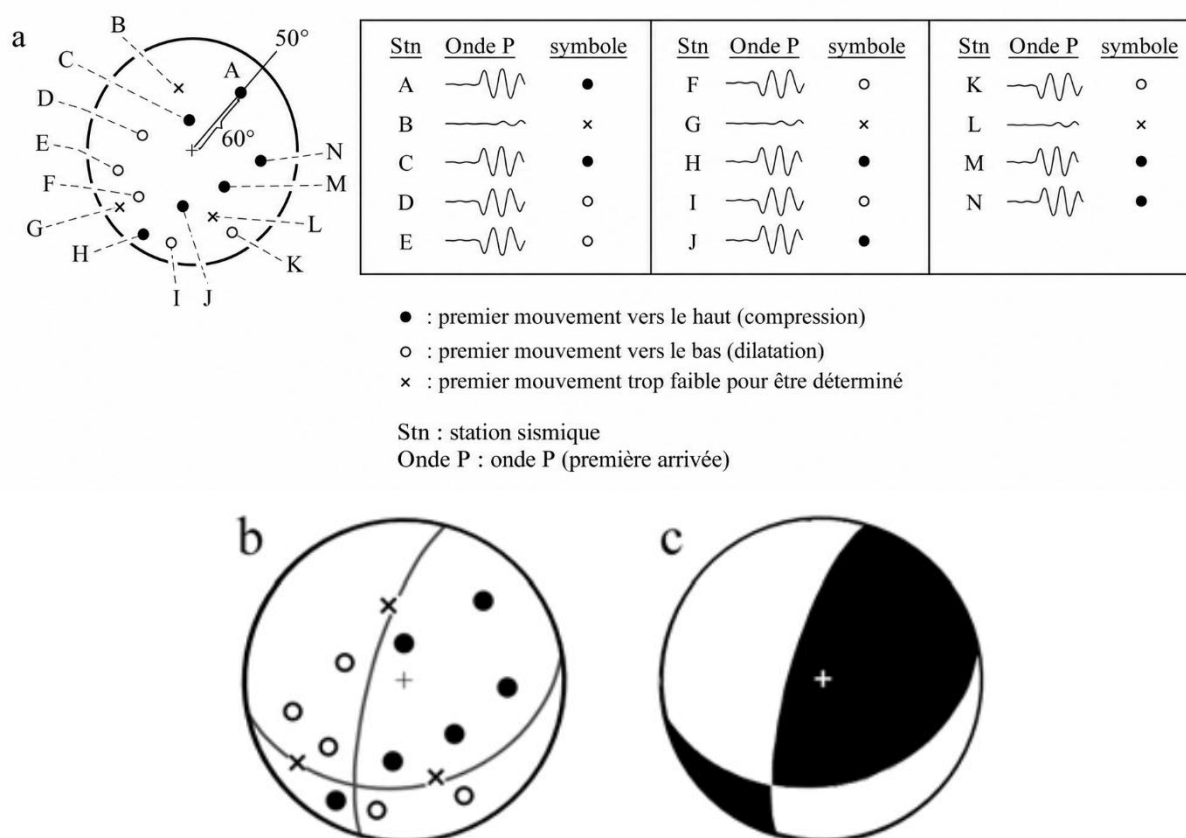


Figure 49: Construction du mécanisme au foyer à partir des premiers mouvements des ondes P.

Une fois que toutes les observations des premiers mouvements des ondes P ont été reportées sur la projection stéréographique (Fig. 44 a), on identifie deux arcs de grands cercles représentant deux plans perpendiculaires l'un à l'autre. Ces plans séparent les cercles blancs des cercles noirs et passent à proximité, ou directement à travers, les croix (×) représentant les observations incertaines (Fig. 44 b).

Ces deux grands cercles correspondent aux plans nodaux. L'un d'eux représente le plan de faille réel à l'origine du séisme, tandis que l'autre constitue le plan auxiliaire. À ce stade, il n'est pas possible de déterminer lequel des deux correspond au véritable plan de rupture.

Enfin, les quadrants sont remplis selon la convention adoptée (Fig. 44 c) afin d'obtenir la représentation finale du mécanisme au foyer (beach ball).

Il est important de souligner que cette solution n'est pas unique, puisque le mécanisme au foyer fournit deux plans nodaux possibles. Néanmoins, elle apporte des informations essentielles sur le type de faille, son orientation et le régime tectonique responsable du séisme.

4.7. Définir la géométrie d'un mécanisme au foyer

Trois paramètres seulement sont nécessaires pour définir complètement l'orientation d'un mécanisme au foyer (Focal Mechanism Solution – FMS) représenté sous forme de beach ball. Deux de ces paramètres décrivent l'orientation du plan de faille, tandis que le troisième définit l'orientation du vecteur de glissement sur ce plan.

Les sismologues caractérisent généralement un mécanisme au foyer à l'aide des paramètres suivants :

- L'azimut du pendage (dip azimuth) du plan de faille.
- L'angle de pendage (dip angle).
- Le rake (angle de glissement), qui décrit la direction du déplacement sur le plan de faille.

Cronin et Sverdrup (1998) ont proposé de rapporter l'azimut du pendage, l'angle de pendage et l'azimut du vecteur de glissement du compartiment supérieur (hanging wall), afin d'éviter toute ambiguïté liée à l'utilisation du terme rake, dont l'interprétation peut varier entre géologues et sismologues.

Le rake (ou angle de glissement) est mesuré dans le plan de faille, par rapport à la direction de référence (strike) du plan de faille.

La direction de référence est définie selon la règle de la main droite (Right-Hand Rule). Selon cette convention :

- Un angle mesuré dans le sens antihoraire (sens trigonométrique) à partir du strike est considéré comme positif.
- Un angle mesuré dans le sens horaire est considéré comme négatif.

Par ailleurs :

- Un vecteur de glissement dirigé vers le haut du plan de faille correspond à un rake positif.
- Un vecteur de glissement dirigé vers le bas du plan de faille correspond à un rake négatif.

Les valeurs possibles du rake sont comprises entre -180° et $+180^\circ$.

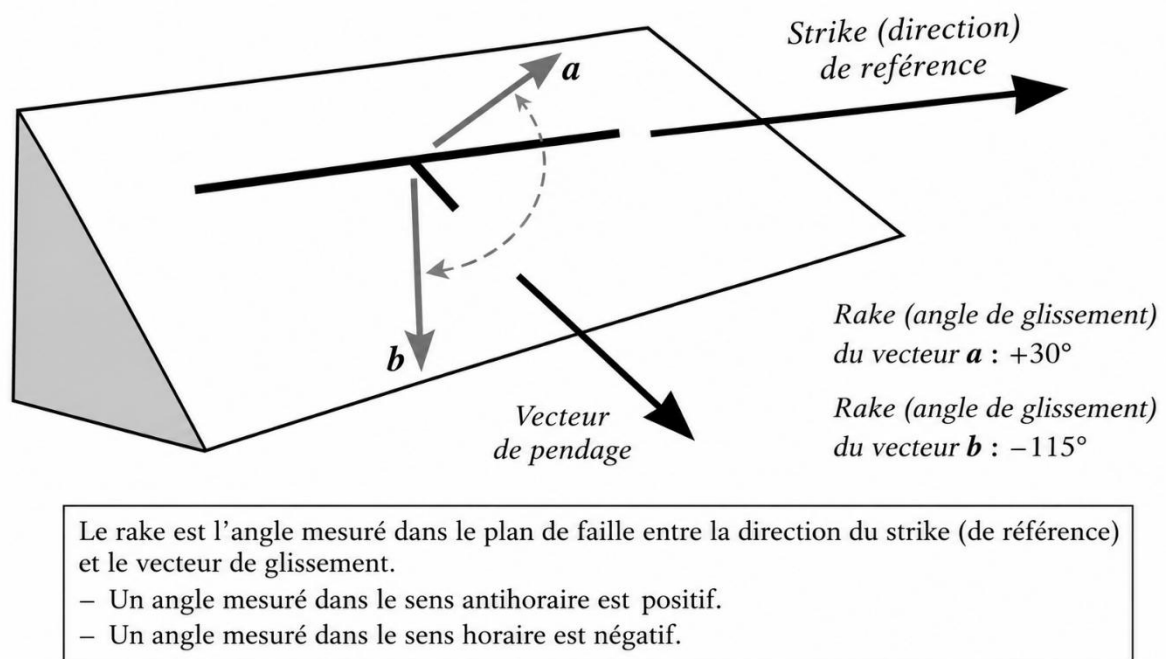


Figure 50: Définition du rake (angle de glissement) sur un plan de faille selon la règle de la main droite.

Les vecteurs de glissement du compartiment supérieur (toit) qui présentent un râteau (rake) positif possèdent au moins une composante de glissement inverse. Un râteau de 90° indique un glissement entièrement inverse, sans aucune composante de décrochement (strike-slip). De même, les vecteurs de glissement du compartiment supérieur ayant un râteau négatif possèdent au moins une composante de glissement normal, un râteau de -90° indiquant un glissement entièrement normal, sans composante de décrochement.

Hauksson (1990) a défini les vecteurs de glissement normal comme ayant des râteaux compris entre -45° et -135° , et les vecteurs de glissement inverse comme ayant des râteaux compris

entre 45° et 135° . Les vecteurs de décrochement correspondent quant à eux à des râteaux compris entre 44° et -44° , ou entre 136° et 224° (-136°).

Un géologue pourrait préférer une différenciation des types de failles selon les critères présentés dans le tableau suivant.

rake du glissement	type de faille
0° ou 180°	décrochement pur
90°	inverse pur (pendage pur)
-90°	normal pur (pendage pur)
-20° à 20°	décrochement senestre
20° à 70°	inverse oblique senestre
70° à 110°	inverse
110° à 160°	inverse oblique dextre
-160° à 160°	décrochement dextre
-110° à -160°	normal oblique dextre
-70° à -110°	normal
-20° à -70°	normal oblique senestre

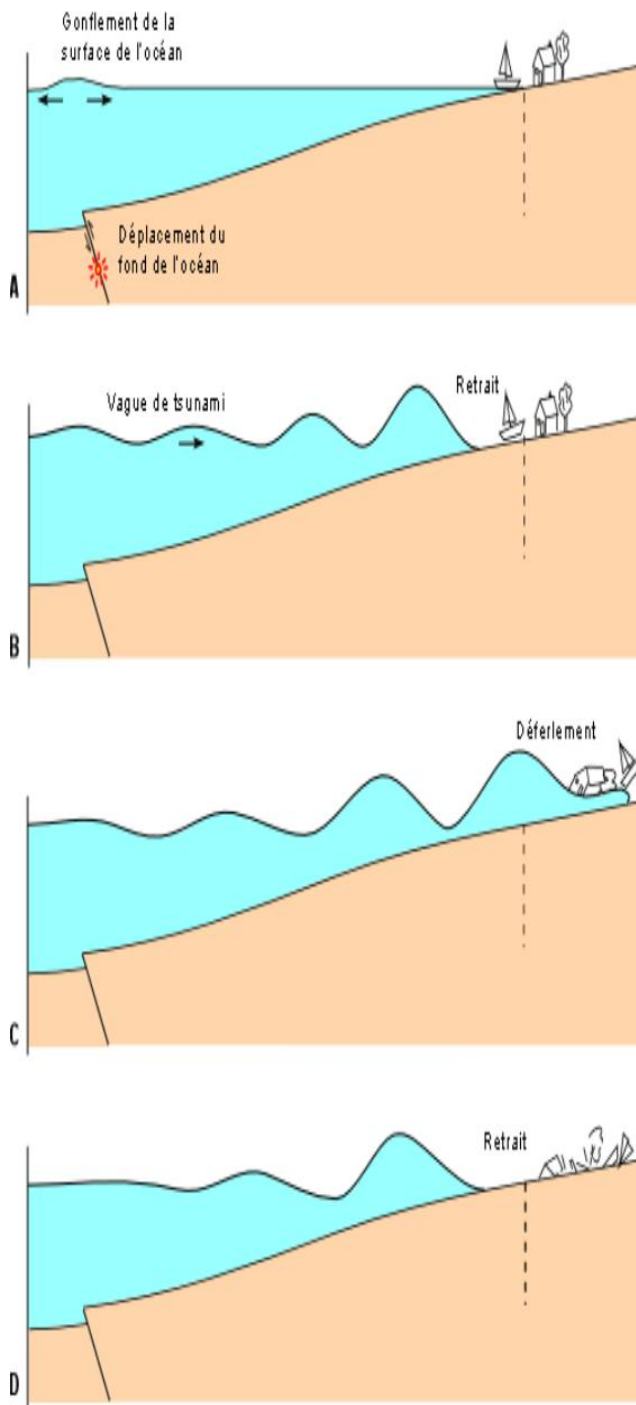
5- La conséquence des séismes

Les pertes humaines et matérielles

Les tremblements de terre font peser de graves menaces sur les populations qui vivent dans les régions sismiques. Ils peuvent semer la mort en détruisant des habitations, des édifices publics des ponts, des barrages ou en déclenchant de catastrophiques glissements de terrains.

En cas de secours sous-marines, le rivage peut être affectés par un autre risque : la formation de tsunami (ou raz-de-marée) ; ceux-ci sont provoqués par l'onde de choc qui se propager à la surface des eaux marines. Des véritables murs d'eau sont projetés le long des côtes avec une telle violence que des villes entières peuvent être détruites : cela a été le cas en 1896, à Sanraku, ville de 20 000 habitants ; au Japon, en 2004, un séisme sous-marin de magnitude

9,0 sur l'échelle de Richter a engendré le tsunami le plus meurtrier de l'histoire des catastrophes naturelles, dévastant tout le Sud de l'Asie.



A) Le soulèvement du fond marin engendre un gonflement de la masse d'eau. Ce gonflement donne lieu à une vague qui en surface de l'océan est à peine perceptible (de quelques centimètres à moins d'un mètre d'amplitude en général), mais qui s'enfle en eau peu profonde pour atteindre des amplitudes pouvant aller jusqu'à 30 m. La vitesse de propagation de ces vagues est de 500 à 800 km/heure en eau profonde (milliers de mètres), diminuant à quelques dizaines de km/heure en eau peu profonde (moins de 100 m). La périodicité des vagues est de l'ordre de 15 à 60 minutes. Ainsi, un tsunami initié par un mouvement du fond marin à la suite d'un séisme qui se sera produit à 1000 km des côtes viendra frapper ces dernières environ 2 heures plus tard. On peut aisément imaginer l'effet destructeur de telles vagues déferlantes sur les côtes habitées et les populations. Le phénomène de la vague déferlante qui balaie tout sur son passage est appelée raz de marée.

(B) À l'approche de la première vague de tsunami, il se produit d'abord un retrait de la mer (ce qui est de nature à attirer les curieux!).

(C) Vient ensuite la première vague.

(D) Celle-ci peut être suivie d'un second retrait, puis d'une autre vague, et ainsi de suite. On compte normalement quelques vagues seulement qui en général diminuent progressivement en amplitude

6- L'échelle de mesure des séismes

Les seimes sont quantifiées par deux grandeurs (échelles) à savoir :

- L'échelle des Magnitude (M)
- L'échelle d'Intensité (I)

6.1. La Magnitude

Introduite par Ch. Richter en 1935 pour les séismes locaux californiens afin d'estimer l'énergie libérée au foyer.

C'est une grandeur physique mesurée :

- soit à partir du logarithme de l'amplitude des ondes sismiques enregistrées par un sismomètre (ML, MS, mB, Mw),
- soit à partir du logarithme de la durée du signal (MD).

C'est une fonction continue qui peut être négative (fonction de la sensibilité du capteur) : et atteindre des valeurs de -2, voire -3.

Sa valeur maximale est fonction de la longueur maximum de la faille susceptible de se fracturer en une seule fois.

$$\text{Magnitude de Richter : } ML = \log A(\Delta) - \log A_0(\Delta)$$

A : est l'amplitude maximale en mm sur l'enregistrement obtenu par un sismographe du type Wood Anderson situé à une distance Δ .

ML=0 : correspond à la mesure d'une amplification de 1 micromètre, sur un sismomètre W-A, à 100 km de distance.

6.2. Intensité

L'intensité d'un séisme est définie en un lieu par rapport aux effets produits par ce séisme, qu'ils soient seulement observés ou ressentis par l'homme (réveil, chute d'objets, fissures ...) ou qu'ils aient causés des dégâts plus ou moins importants aux constructions. On parle alors d'effets macrosismiques.

L'intensité d'un séisme dépend du lieu d'observation des effets causés par le séisme. Elle décroît généralement lorsqu'on s'éloigne de l'épicentre du séisme mais varie aussi selon la structure géologique. Une forte intensité est souvent associée à des zones de roches molles (sable, vase, argile et remblais), alors qu'on note une faible intensité dans des zones de roches plus solides (grès).

Pour un séisme donné, on donne souvent uniquement l'intensité à l'épicentre, la plus forte généralement : c'est l'intensité épicentrale.

On ne doit pas confondre magnitude et intensité :

- A l'inverse de la magnitude qui se calcule, l'intensité d'un séisme ne peut donner lieu qu'à une estimation.
- La magnitude est une valeur associée uniquement au séisme. L'intensité est associée au lieu d'observation.
- IL n'existe pas de véritable relation entre magnitude et intensité. Ainsi deux séismes de même magnitude peuvent donner en surface des intensités différentes. Inversement deux séismes de même intensité en un lieu peuvent avoir des magnitudes différentes.

Elle ne se calcule pas ! Elle est estimée à partir des effets produits (observés et/ou ressentis) par le séisme.

L'échelle d'intensité comporte douze degrés :

- I : Secousse non perceptible
- II : Secousse à peine perceptible
- III : Secousse faible ressentie seulement de façon partielle
- IV : Secousse largement ressentie
- V : Réveil des dormeurs
- VI : Frayeur
- VII : Dommages aux constructions
- VIII : Destruction de bâtiments
- IX : Dommages généralisées aux constructions
- X : Destruction générale des bâtiments
- XI : Catastrophe
- XII : Changement de paysage

On appelle isoséistes les courbes d'égale intensité. Le centre de la courbe de plus forte intensité (I_0) est l'épicentre macrosismique.

Relation intensité-magnitude : empirique, nécessairement empirique !

$$M = 0,5 I_0 + 0,35 + \log(h) \text{ (Karnik) (si } h=10 \text{ et } I_0 = \text{VIII alors } M=5,35)$$

- Séisme dit de " Peille " du 19/12/2000 : $ML=3,4$ / $I0=V$
- Séisme dit " d'Annecy " du 15/07/1996 : $ML=5,2$ / $I0=VII/VIII$

Cette relation est dépendante des caractéristiques du séisme, du site et du contexte sismotectonique donc peu fiable !

7- Localiser un tremblement de terre

Actuellement, grâce à plusieurs milliers de stations disposées sur l'ensemble de la planète, il est possible de déterminer l'épicentre et l'hypocentre de tous les séismes de magnitude supérieure à 4 et voire même 2 dans certaines zones bien surveillées comme la Californie.

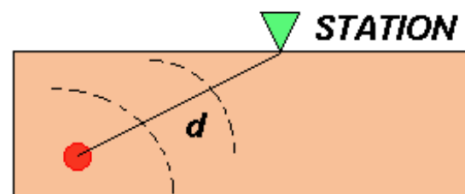
7.1. Détermination de l'épicentre par la méthode des cercles

La première méthode nécessite l'utilisation d'au moins 3 stations d'enregistrement situées en des lieux différents et qui enregistrent la composante verticale des ondes P et S.

Avec une seule station, on peut écrire :

temps d'arrivée de l'onde P: $t_p = t_0 + (d/V_p)$

temps d'arrivée de l'onde S: $t_s = t_0 + (d/V_s)$



avec:

d : distance épicentrale

t_0 : temps origine

V_p : vitesse de l'onde P

V_s : vitesse de l'onde S

Trajet est une ligne droite.

Notre premier problème consiste à trouver d , ne connaissant pas le temps origine t_0 . En faisant la différence entre les deux relations précédentes, on arrive à : $t_s - t_p = d \cdot (1/V_s - 1/V_p)$.

On connaît à peu près les vitesses des ondes P et S dans la croûte et on admet le plus souvent que : $(1/V_s - 1/V_p) = 1/8$

On peut alors écrire : $d = 8 \times (t_s - t_p)$

Quand les vitesses ne sont pas connues, on utilise pour déterminer d , des abaques, c'est-à-dire des courbes établies expérimentalement permettant graphiquement et rapidement d'obtenir une valeur.

On connaît alors directement d qui est fonction de $(t_s - t_p)$.

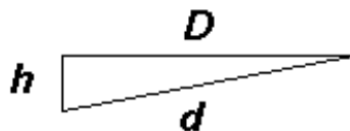
Le lieu des points à la distance d d'une station est un cercle ayant pour rayon la distance épicentrale d et comme centre la station. Le deuxième problème consiste à déterminer d et tracer les cercles correspondant pour plusieurs stations.

Avec une station, on ne peut pas déterminer la position du séisme. Il en faut au moins trois et on définit alors trois cercles de rayon d_1 , d_2 et d_3 . Si le foyer est superficiel, la méthode convient parfaitement : les trois cercles se coupent en un seul point qui est le foyer du séisme.

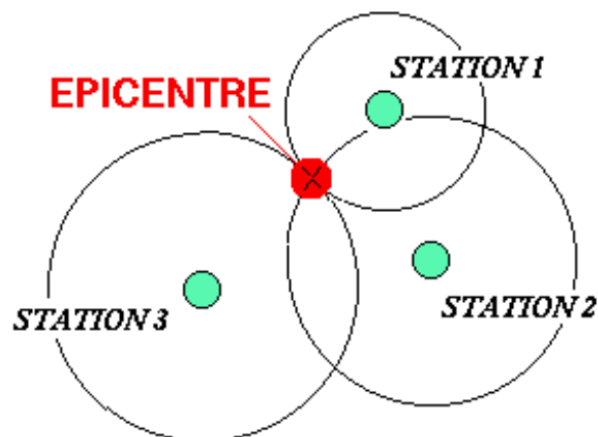
Sinon chaque distance d définit une sphère. Les trois sphères se coupent à une profondeur que l'on ignore et la projection en surface donne la zone où s'est produit le séisme.

C'est une méthode facile, rapide et suffisante pour localiser un séisme. En pratique, quand on est loin, on peut négliger la profondeur.

$D \approx d$ quand h est très petit devant D



La méthode des cercles



Avec la station 3, on obtient trois arcs de cercle qui se coupent exactement en un seul point si le séisme est superficiel. La position de l'épicentre est déterminée par le point d'intersection.

7.2. Détermination de l'épicentre par la méthode des hyperboles

La deuxième méthode géométrique nécessite également l'utilisation d'au moins trois stations mais n'utilise que les enregistrements des ondes P :

Si t_1 est le temps d'arrivée de l'onde P à la station 1, t_2 celui à la station 2, etc.

Si d_1 est la distance épacentrale à la station 1, d_2 à la station 2, etc.

$$\text{On a : } t_1 = t_0 + (d_1/V_p)$$

$$t_2 = t_0 + (d_2/V_p)$$

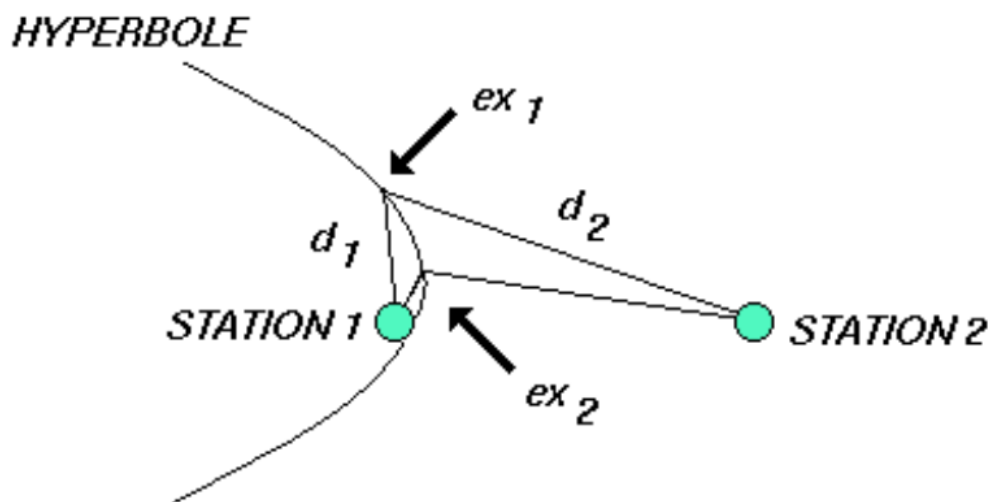
$$\text{soit : } t_2 - t_1 = (d_2 - d_1) / V_p$$

$$\text{Et donc: } d_2 - d_1 = V_p \cdot (t_2 - t_1)$$

Cette fois, connaissant la vitesse V_p des ondes P et les différences des temps d'arrivée $t_2 - t_1$ que l'on mesure, on arrive à connaître la quantité $d_2 - d_1$. L'ensemble des points tels que $d_2 - d_1 = \text{constante}$, définit une figure géométrique, que l'on appelle hyperbole, construite autour des deux stations.

Comme pour la méthode des cercles, il faut recommencer cette opération pour trois paires de stations. On obtient alors trois hyperboles qui se coupent en un point, le foyer du tremblement de terre.

La méthode des hyperboles



1 - A partir des positions des stations 1 et 2, on trace l'hyperbole vérifiant la relation :

$$d_2 - d_1 = V_p \cdot (t_2 - t_1)$$

Chaque point de l'hyperbole vérifie cette relation.

Exemple avec: $d_2 - d_1 = 3 \text{ cm}$

ex1: $d_2 = 4.5 \text{ cm}$, $d_1 = 1.5 \text{ cm}$

ex2: $d_2 = 3.5 \text{ cm}$, $d_1 = 0.5 \text{ cm}$

2 - et 3 - En effectuant l'opération pour 3 stations différents, on obtiendrait ainsi trois hyperboles qui se coupent sur la position de l'épicentre.

7.3. Détermination de l'épicentre par les méthodes actuelles

Actuellement, on utilise des méthodes numériques sur ordinateur qui reprennent le principe des deux méthodes simples vues ci-dessus.

On dispose des temps d'arrivée à une multitude de stations (beaucoup plus que trois). Si les mesures étaient parfaitement exactes, il suffirait de choisir trois stations au hasard et on obtiendrait le bon résultat. Mais nos mesures comportent forcément une part d'erreur dont l'origine provient par exemple d'une mauvaise identification de l'onde, ou bien d'une erreur de l'horloge, ou bien encore d'une erreur de lecture de l'opérateur.

C'est un problème numérique classique qui se résout par ordinateur. La solution consiste à minimiser les erreurs entre la solution trouvée et chacune des données. Cette méthode est de loin la plus employée et la plus précise d'autant que le nombre de stations est élevé.

Protection contre les séismes

La méthode la plus efficace pour éviter qu'un bâtiment soit détruit par un séisme est encore de construire ce bâtiment dans un endroit où il n'y a pas de tremblement de terre. Ceci semble évident mais était relativement difficile à appliquer dans la pratique car on connaissait très mal, notamment au Maroc, le risque sismique. En effet, comme le risque est modéré dans notre pays, les catastrophes passées sont oubliées et on n'en tient pas compte pour choisir les lieux de construction. Mais grâce aux efforts des scientifiques dans ce domaine on connaît maintenant relativement bien le risque sur tout le territoire Marocain.

D'une façon générale il faut éviter de construire :

- sur les bords de versants escarpés.
- sur les zones de changements de sol.
- à proximité immédiate des failles actives.
- aux abords des falaises.
- sur des sols meubles en pente (ou en aval de ces sols).

- sur les berges et rivages constitués de terrains meubles.

La construction parasismique

Le but de la construction parasismique consiste à trouver des techniques de génie civil permettant aux habitations de résister à toutes les secousses d'intensités inférieures ou égales à l'intensité nominale fixée par la loi.

Voici quelques différentes techniques de conception parasismique d'ensemble :

- Implantation judicieuse des constructions, hors des zones instables.
- Adaptation des fondations au type de sol.
- Utilisation de matériaux de qualité adéquate.
- Utilisation de dispositions constructives énoncées dans les guides techniques de construction parasismique (distribution des masses, chainages horizontaux et verticaux, etc...).
- Prise en compte de "l'agression sismique" sur le site considéré (ce qui signifie établir des plans de construction en sachant qu'il peut se produire des séismes et donc éviter toutes les architectures permettant des effondrements).

Ainsi la construction parasismique ne consiste pas uniquement en l'élaboration de techniques de construction mais d'un ensemble de méthodes permettant aux bâtiments de résister aux secousses des séismes.

Les trois grandes activités de la construction parasismique sont : l'étude des sols, la construction de bâtiments neufs parasismiques, le renforcement des bâtiments déjà construits.

Chapitre V : INSTABILITE DE LITTORAL

1- Définition de la zone côtière

La zone côtière se définit comme l'espace de transition entre les domaines terrestre et marin. Il ne s'agit pas d'une ligne distincte, mais bien d'une zone d'influence d'un milieu sur l'autre. Cet espace est très dynamique et il évolue constamment en fonction de la nature de la côte et de son exposition à divers agents et processus contribuant à sa mobilité.

2- Aléa naturel : érosion côtière

En milieu côtier, l'aléa d'érosion fait partie des principaux aléas naturels représentant un potentiel de sinistre au Québec. En conséquence, il est susceptible de porter atteinte à la sécurité des personnes et à l'intégrité des biens ou encore d'occasionner des perturbations sociales et économiques ou une dégradation de l'environnement.

L'érosion côtière est un enjeu préoccupant sur le plan de la sécurité civile puisqu'une grande proportion de la population se concentre sur les côtes du Québec maritime, c'est-à-dire le long des côtes de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent ainsi que dans la baie des Chaleurs.

2.1. Qu'est-ce que l'érosion côtière ?

L'érosion côtière entraîne un recul de la côte vers l'intérieur des terres, c'est-à-dire une perte de terrain au profit de la mer. L'érosion résulte de l'action de différents processus qui peuvent agir de manière progressive ou soudaine, en un lieu donné. Bien qu'elle se manifeste essentiellement dans les côtes de nature meuble, l'érosion côtière affecte également les côtes de nature rocheuse d'origine sédimentaire.

2.2. Les causes à l'origine de l'érosion côtière

Les causes à l'origine de l'érosion côtière sont variées et incluent, sans s'y restreindre, la dynamique côtière, les événements de tempête ainsi que les mouvements de terrain.

L'état de la côte reflète l'action simultanée d'un ensemble d'agents et de processus marins et météorologiques qui entraînent des ajustements géomorphologiques de la côte. De manière générale, les principaux facteurs entrant en jeu dans le processus d'érosion côtière incluent, sans s'y restreindre, le régime des marées, les courants marins, les vagues, les événements de tempête et les épisodes de submersion côtière associés, la présence ou l'absence de glaces en hiver, les précipitations (pluie ou neige), la dynamique des apports sédimentaires, les cycles de gel et de dégel, ainsi que les processus gravitaires et le vent.

Les conditions climatiques régionales, telles que la présence ou l'absence de glace en hiver, vont notamment contribuer à protéger, ou non, la côte des assauts de la mer en période hivernale. De plus, l'exposition au fetch, c'est-à-dire la distance parcourue par les vagues en provenance du large, expose certaines côtes davantage que d'autres aux vagues de tempête.

La hausse du niveau de la mer induite par les changements climatiques force les côtes à s'ajuster aux nouvelles conditions d'exposition, ce qui entraîne la plupart du temps un recul de la côte.

Dans les Maritimes, la hausse du niveau de la mer est exacerbée par les ajustements postglaciaires qui se manifestent encore aujourd'hui ! Ceux-ci entraînent un enfoncement lent de la croûte terrestre, aussi appelé « subsidence ».

2.3. La sensibilité des côtes à l'érosion côtière

En raison de l'immensité de son territoire et des divers environnements géologiques qui le composent, les côtes du Maroc maritime sont exposées à l'érosion côtière et à différentes formes de mouvements de terrain. Alors que toutes les côtes sont exposées à l'action des différents agents et processus météorologiques et marins, c'est la nature des matériaux et leur niveau de consolidation qui déterminent leur sensibilité à l'érosion côtière. Ainsi, certains dépôts, moins cohésifs que d'autres, seront donc plus sensibles à cet aléa (figure 51).



Figure 51: Côte à falaise meuble et peu consolidée en érosion. Source : MSP, 2023

À titre d'exemple, les côtes dites à terrasse de plage, qui sont essentiellement composées de matériaux sableux peu consolidés, sont particulièrement sensibles à l'érosion côtière (figure 52). De plus, puisque ces environnements côtiers sont de faible dénivelé par rapport au niveau

de la plage, l'érosion est exacerbée lorsque des conditions de tempête causée par un système météorologique dépressionnaire et/ou de forts vents sont jumelées avec les marées hautes, occasionnant un épisode de submersion côtière. Ce débordement de la mer sur la terre s'accompagne généralement du déferlement de vagues sur les terrains côtiers ainsi que de l'érosion sévère lors du retrait de l'eau.



Figure 52: Côte à terrasse de plage affectée par l'érosion côtière

À l'opposé, les côtes de nature rocheuse sont beaucoup moins sensibles à l'érosion. Cela est particulièrement vrai pour les côtes composées de roches magmatiques comme la cote de l'est de la baie de Nekor. Ce l'est cependant moins pour les côtes composées de roches sédimentaires faiblement consolidées (figure 53).



Figure 53: Côte à falaise rocheuse en érosion – formation de Cap-aux-Meules

3- La dynamique côtière

L'interaction entre les différents agents et processus à l'origine des ajustements géomorphologiques de la côte témoigne du dynamisme de la zone côtière. Celle-ci est constamment en train de s'ajuster aux conditions changeantes de la mer, modifiant le profil de la plage au gré des conditions de marées et de tempête, entraînant le recul de la côte à certains endroits et une accrétion à d'autres.

3.1. La dérive littorale et les apports sédimentaires

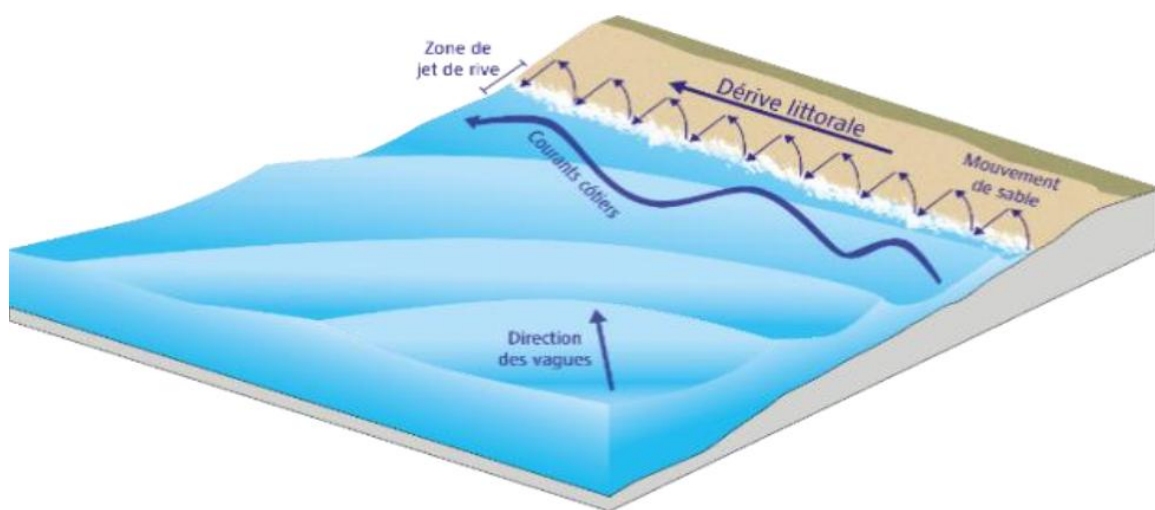


Figure 54: Dérive littorale, un courant parallèle à la côte généré par l'action des vagues

La dérive littorale joue un rôle déterminant dans la constitution de la plage (figure 54). La dérive littorale est un courant généré par l'action des vagues qui transporte les sédiments parallèlement à la côte. L'angle d'attaque des vagues et leur hauteur déterminent la direction et la force de cette dérive. Ces courants naissent du va-et-vient entre le jet de rive, qui pousse le sable vers le haut de la plage lors du déferlement de la vague, puis du courant de retour, qui ramène le sable vers le large lorsque l'eau se retire.

Les matériaux qui composent les plages sont constamment en déplacement. Ces matériaux parviennent à la plage de trois façons. Il y a d'abord les rivières qui acheminent de grandes quantités de sédiments au fleuve. Il y a ensuite l'érosion des berges, qui contribue à mettre en circulation des sédiments qui alimentent les plages. Enfin, il y a la dérive littorale qui assure le transport sédimentaire le long de la côte.

La dérive littorale se déplace dans une direction préférentielle tant qu'elle ne rencontre pas d'obstacles infranchissables, comme des caps rocheux. Ces obstacles permettent de subdiviser la côte en cellules hydrosédimentaires. Ces dernières sont relativement indépendantes les unes des autres et possèdent des conditions homogènes. À l'intérieur d'une même cellule, une action faite en amont peut entraîner des répercussions sur le reste de la cellule hydrosédimentaire située en aval de cette intervention. Plus largement, ces cellules sont regroupées par grands secteurs de côte à l'intérieur d'une unité hydrosédimentaire.

3.2. Le rôle de la plage

La plage joue un rôle essentiel dans la dissipation de l'énergie des vagues à la côte. Sa largeur et sa pente sont des facteurs déterminants pour assurer cette fonction. La granulométrie du matériel composant la plage (sable, gravier, galet, etc.) reflète les conditions de la dynamique côtière mentionnée ci-dessus. Sa présence contribue également à protéger la côte de l'assaut des vagues, et atténue donc l'érosion côtière.

3.3. Les variations saisonnières de la plage

Naturellement, les plages subissent des variations saisonnières alors qu'elles s'abaissent durant les périodes de tempête, principalement à l'automne et à l'hiver, puis elles se reconstituent durant les périodes de fonte au printemps et de calme l'été.

Ainsi, au cours d'une année, le bilan sédimentaire de la plage varie au gré des saisons et selon les conditions hydrologiques et météorologiques (figure 8). Au printemps, la fonte du pied de glace qui est chargé en sédiments contribue au rehaussement du profil de la plage. Les hautes marées d'automne et les tempêtes ont pour effet de remanier les matériaux de la plage en abaissant le profil de celle-ci. En hiver, lorsqu'il est présent, le pied de glace a pour effet de capter le sable et les matériaux déposés par les vagues.

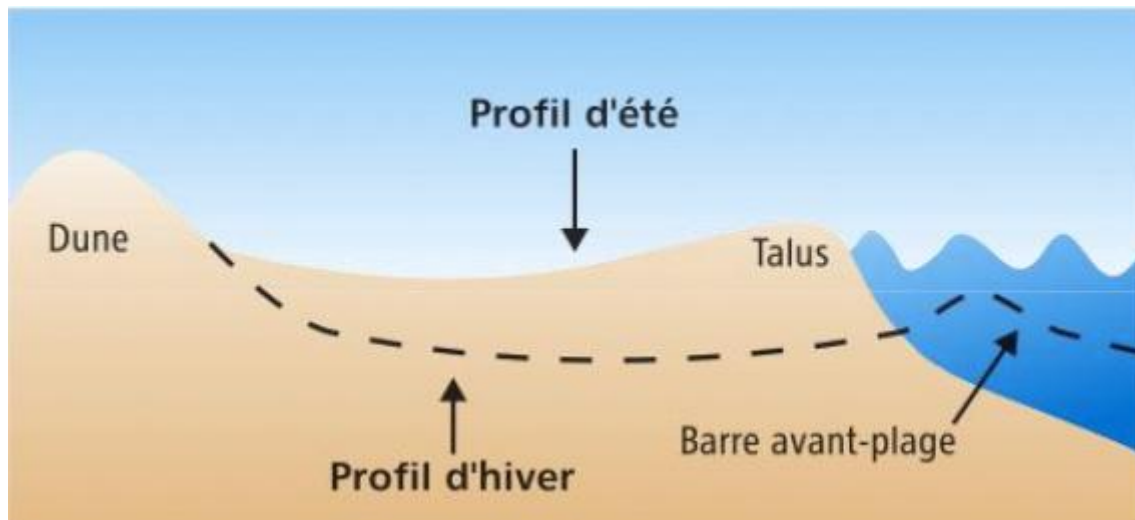


Figure 55: Les variations saisonnières de la plage

4- Les mouvements de terrain dans les falaises rocheuses

L'érosion côtière affecte également les falaises rocheuses. Encore une fois, les conditions de mise en place à l'origine de la formation rocheuse sont déterminantes dans son niveau de dureté et de cohésion. Ainsi, les côtes composées de roches magmatiques de la Côte-Nord n'évoluent pratiquement pas, du moins pas à l'échelle d'une vie humaine. À l'opposé, les falaises de grès rouge sont particulièrement sensibles à l'érosion et les vitesses de recul observées sont préoccupantes à certains endroits.

La géologie structurale, c'est-à-dire l'orientation et l'emplacement des discontinuités de la roche, ainsi que la différence de résistance des différents horizons rocheux sont déterminantes dans le niveau de sensibilité de la roche à l'érosion.

L'érosion préférentielle et les effondrements rocheux dans les falaises de grès rouge

L'érosion préférentielle et les effondrements rocheux se manifestent sur des côtes formées de falaises de roches sédimentaires. Leur progression étant plus rapide aux endroits où les massifs rocheux sont fragilisés par des discontinuités, le recul préférentiel forme de grandes échancrures et des grottes (figures 56) Ces processus affectent en particulier les falaises rocheuses de grès rouge présentes aux Îles-de-la-Madeleine, mais aussi une partie de la Baie-des-Chaleurs, en Gaspésie.



Figure 56: Grande échancrure dans des falaises de grès rouge aux Îles-de-la-Madeleine, Formation d'une grotte et effondrement survenu à plus de 30 mètres de la falaise rocheuse. Source : UQAR, 2010

Les cicatrices d'érosion observées dans ces falaises ont la particularité d'évoluer selon des reculs orientés, les échancrures et les grottes s'y formant pouvant atteindre jusqu'à 100 mètres de profondeur. La géologie structurale de la formation rocheuse de ces falaises joue un rôle déterminant pour l'emplacement et l'orientation de celles-ci. Par ailleurs, un effondrement du plafond d'une grotte peut se produire à une bonne distance de la côte.

Plusieurs autres facteurs viennent également interagir avec ceux mentionnés précédemment. Par exemple, la hauteur des falaises, leur orientation par rapport aux vents dominants et aux vagues ainsi que l'élévation des zones les plus sensibles par rapport au niveau d'eau normal et à celui atteint lors de tempêtes en sont quelques-uns.

5- Incidence des interventions humaines

Les interventions inappropriées de nature anthropique peuvent agir comme facteur déclencheur de l'érosion côtière ou, plus couramment, comme facteur aggravant en modifiant l'équilibre de la côte.

Ces interventions peuvent être associées à l'aménagement d'ouvrages de protection contre l'érosion des côtes, qui limitent les échanges sédimentaires entre la côte et le littoral, réduisant ainsi les apports en sédiments à sa cellule hydrosédimentaire d'appartenance. La présence de barrages sur les cours d'eau réduit également les apports en sédiments essentiels à l'équilibre de

la côte. Les quais, construits généralement de manière perpendiculaire à la côte, interrompent également le transport sédimentaire à l'intérieur d'une cellule hydrosédimentaire, en créant des zones de captation de sédiments qui privent le système en aval de leur emplacement.

Enfin, d'autres interventions, telles que la dévégétalisation des berges, peuvent aussi aggraver les processus à l'origine de l'érosion côtière. Dans tous les cas, les interventions ont une incidence sur l'équilibre sédimentaire et forcent la côte à s'ajuster.

5.1. Les ouvrages de protection

Jusqu'à tout récemment, les moyens de défense privilégiés par les riverains ont été l'enrochement et les murets. Bien que ces travaux puissent apporter un certain sentiment de sécurité à leurs propriétaires, ils n'assurent pas nécessairement une protection adéquate en cas d'épisodes de tempête s'ils n'ont pas été conçus en tenant compte de la dynamique côtière environnante (figure 11).



Figure 57: Érosion sévère créée derrière le mur par le franchissement de l'eau lors d'une tempête. Source : UQAR, 2010

La présence d'une structure rigide, telle qu'un enrochement ou un mur de protection, dans l'espace de battement de la marée aura généralement pour effet d'abaisser le niveau de la plage par affouillement au pied de celle-ci et d'en diminuer la largeur. Une plage qui s'abaisse possède un bilan sédimentaire négatif, c'est-à-dire qu'en cet endroit, la dérive littorale prélève davantage de sédiments qu'elle n'en dépose. Ce nouveau profil de la pente dans la zone de battement de marées ne permet plus d'atténuer efficacement l'énergie des vagues à l'approche de la côte. Ce changement de profil de la plage a pour effet d'augmenter l'exposition de l'ouvrage à l'assaut des vagues, ce qui pourrait, ultimement, le déchausser et le déséquilibrer. Ce changement favorise également le franchissement d'ouvrages à la côte

par les vagues et l'érosion sévère à l'arrière de celui-ci. L'abaissement du profil et la diminution de la largeur de la plage occasionnés par la présence d'infrastructures de protection augmentent le risque de submersion côtière.

De plus, une protection sous-calibrée pourrait devenir source de projectiles pris en charge par le déferlement des vagues en direction de la propriété, et ainsi créer des dommages importants.

Enfin, l'imperméabilité de ce type de structure peut avoir pour effet d'empêcher, lors d'un épisode de submersion, le retour de l'eau vers la mer et occasionner l'inondation de la propriété.

5.2. Effet de bout

Même si les ouvrages de protection permettent de freiner le recul de la ligne de côte localement, ils peuvent entraîner une détérioration accélérée des secteurs adjacents (figure 12). Lorsque l'infrastructure est touchée par le jet de rive, sa présence empêche la dissipation de l'énergie de la vague. Cette énergie sera donc concentrée et transposée en aval, dans le sens de la dérive littorale, favorisant l'érosion des terrains adjacents. C'est ce que l'on nomme l'effet de bout.



Figure 58: Effet de bout entraîné par des travaux d'enrochement. Source : MSP, 2021

6- Analyse de l'évolution du trait de côte à l'aide de l'outil DSAS (Digital Shoreline Analysis System)

DSAS (Digital Shoreline Analysis System) est une extension développée par l'U.S. Geological Survey (USGS) pour les logiciels SIG. Elle permet d'analyser quantitativement l'évolution du

trait de côte à partir de plusieurs positions du littoral acquises à différentes dates. DSAS calcule différents indicateurs statistiques, tels que le taux de changement du trait de côte, afin d'évaluer les phénomènes d'érosion, d'accrétion et de stabilité du littoral.

L'analyse de l'évolution du trait de côte avec DSAS suit une démarche méthodologique structurée comprenant les étapes suivantes : (1) collecte et préparation des données, (2) extraction et numérisation des traits de côte de différentes dates, (3) création de la ligne de référence (Baseline), (4) génération automatique des transects perpendiculaires au littoral, (5) calcul des indicateurs d'évolution du trait de côte (NSM, EPR, LRR, WLR, etc.), (6) cartographie et analyse spatiale des résultats, et (7) interprétation et validation des résultats. Ces étapes permettent de quantifier les taux d'érosion et d'accrétion, d'identifier les secteurs les plus vulnérables et de fournir des informations essentielles pour la gestion et la protection des zones côtières.

Etude de cas : Analyse de l'évolution diachronique et historique du littoral de la baie d'Al Hoceima (Méditerranée marocaine).

L'article est disponible à l'adresse suivante :

<https://www.jwld.pl/files/2024-04-JWLD-07.pdf>