



INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES

# **Risques naturels et environnement industriel (DRA-013)**

Rapport intermédiaire

Opération a : synthèse sur les risques dus aux  
séismes, inondations, mouvements de terrain et  
tempêtes – définitions et mécanismes

*Direction des Risques Accidentels*

Juin 2001

# Risques naturels et environnement industriel (DRA-013)

## Rapport intermédiaire

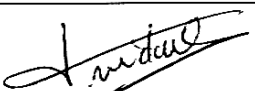
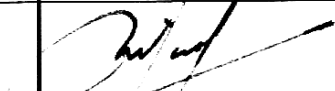

Opération a : synthèse sur les risques dus aux séismes, inondations, mouvements de terrain et tempêtes – définitions et mécanismes

19 juin 2001

### PERSONNES AYANT PARTICIPE A L'ETUDE

Viviane Tellier – Ecole des Mines d' Alès

Ce document comporte 62 pages (hors couverture et annexes).

	Rédaction	Vérification	Approbation
<b>NOM</b>	I. Vuidart	J.J. Tritsch	D. Gaston
<b>Qualité</b>	Ingénieur de la Direction des Risques Accidentels	Délégué appui technique à l'administration – Direction des Risques Sol et Sous-sol	Directeur-Adjoint de la Direction des Risques Accidentels
<b>Visa</b>			

## TABLE DES MATIERES

<b>1.</b>	<b>GLOSSAIRE .....</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>INTRODUCTION – OBJECTIFS ET CONTEXTE .....</b>	<b>5</b>
<b>3.</b>	<b>LES SÉISMES.....</b>	<b>7</b>
3.1	DÉFINITION .....	7
3.2	ORIGINE DES SÉISMES .....	7
3.2.1	<i>Les catégories de séismes</i> .....	7
3.2.2	<i>Les séismes tectoniques</i> .....	8
3.2.2.1	La structure interne de la terre .....	8
3.2.2.2	Tectonique des plaques.....	9
3.2.2.3	Les zones d'écartement.....	10
3.2.2.4	La convergence .....	10
3.2.2.5	Mécanisme et rupture de faille .....	11
3.3	LES ONDES SISMiques .....	13
3.3.1	<i>Généralités</i> .....	13
3.3.2	<i>Les ondes de fond ou de volume</i> .....	13
3.3.3	<i>Les ondes de surfaces</i> .....	14
3.4	CARACTÉRISTIQUES DES SÉISMES .....	15
3.4.1	<i>Le foyer</i> .....	15
3.4.2	<i>L'épicentre</i> .....	15
3.4.3	<i>La magnitude</i> .....	15
3.4.4	<i>L'intensité</i> .....	17
3.4.4.1	Diversité des échelles d'intensité macrosismique.....	18
3.4.4.2	L'échelle MSK .....	18
3.4.4.3	L'échelle macrosismique européenne (EMS).....	20
3.4.4.4	Echelle d'intensité JMA.....	20
3.5	LES FACTEURS AGGRAVANTS.....	20
3.5.1	<i>Les effets de site</i> .....	20
3.5.2	<i>Liquéfaction</i> .....	22
3.5.3	<i>Les tsunamis</i> .....	22
3.5.4	<i>Les mouvements de terrain</i> .....	23
<b>4.</b>	<b>LES INONDATIONS .....</b>	<b>24</b>
4.1	DÉFINITIONS .....	24
4.2	LES TYPES D'INONDATIONS .....	24
4.2.1	<i>Les inondations par stagnation d'eaux pluviales</i> .....	24
4.2.2	<i>Débordement de cours d'eau</i> .....	25
4.2.2.1	Inondation par débordement direct.....	25
4.2.2.2	Inondation par débordement indirect.....	26
4.2.3	<i>Rupture d'ouvrages ou d'embâcles</i> .....	26
4.2.4	<i>Ruissellement en secteur urbain</i> .....	27
4.2.5	<i>Crues torrentielles</i> .....	27
4.2.6	<i>Submersion des zones littorales ou lacustres</i> .....	28
4.3	LES PARAMÈTRES D'UNE INONDATION .....	29
4.4	L'ALÉA.....	30
<b>5.</b>	<b>LES MOUVEMENTS DE TERRAIN.....</b>	<b>31</b>
5.1	DÉFINITION .....	31
5.2	LES MOUVEMENTS LIÉS A LA PRÉSENCE D'UNE CAVITÉ NATURELLE OU ARTIFICIELLE.....	31
5.2.1	<i>Les différents types de cavités</i> .....	31
5.2.1.1	Les carrières et mines .....	31
5.2.1.2	Les autres ouvrages souterrains d'origine anthropique (tunnels, sapes de guerre...) .....	33
5.2.1.3	Les cavités naturelles.....	34
5.2.2	<i>Les mouvements lents et continus : les affaissements</i> .....	35

5.2.3	<i>Les mouvements rapides et discontinus : les effondrements</i> .....	36
5.2.3.1	L'effondrement localisé.....	37
5.2.3.2	L'effondrement généralisé.....	38
5.2.3.3	Les facteurs aggravants ou déclenchants.....	38
5.3	LES AUTRES MOUVEMENTS.....	38
5.3.1	<i>Les mouvements lents et continus</i> .....	38
5.3.1.1	Glissements.....	39
5.3.1.2	Tassements.....	41
5.3.1.3	Gonflements-retraits.....	42
5.3.1.4	Les phénomènes d'érosion littorale et fluviale.....	42
5.3.2	<i>Les mouvements rapides et continus</i> .....	43
5.3.2.1	Eboulements et chutes de blocs.....	43
5.3.2.2	Coulées boueuses et laves torrentielles.....	45
<b>6.</b>	<b>LES TEMPÊTES</b> .....	<b>48</b>
6.1	DÉFINITIONS.....	48
6.2	MORPHOLOGIE.....	49
6.3	MÉCANISMES.....	50
6.3.1	<i>L'instabilité linéaire d'un front extrême</i> .....	51
6.3.2	<i>L'interaction barocline</i> .....	52
6.3.3	<i>Les anticyclones mobiles polaires (AMP)</i> .....	54
6.3.3.1	Définition.....	54
6.3.3.2	Formation des AMP.....	54
6.3.3.3	Evolution de l'AMP.....	54
6.3.3.4	Les AMP dans l'hémisphère Nord.....	56
<b>5.</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>58</b>
<b>7.</b>	<b>RÉFÉRENCES</b> .....	<b>60</b>
<b>8.</b>	<b>LISTE DES ANNEXES</b> .....	<b>62</b>

## 1. GLOSSAIRE

---

---

**Aléa** : Phénomène naturel d'occurrence et d'intensité données (crue, affaissement de terrain, projection volcanique...).

**Catastrophe naturelle** : Phénomène ou conjonction de phénomènes dont les effets sont particulièrement dommageables.

**Danger** : État qui correspond aux préjudices potentiels d'un phénomène naturel sur les personnes.

**Enjeux** : Personnes, biens, activités, moyens, patrimoine, etc. susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel et de subir des préjudices ou des dommages.

**Mitigation** : La mitigation des risques naturels est donc l'action qui conduit à réduire l'intensité de certains aléas et la vulnérabilité des enjeux pour faire en sorte que le coût des dommages liés à la survenue de phénomènes climatologiques ou géologiques soit supportable par notre société.

**PPR** : Plan de Prévention des Risques. Le plan de prévention des risques naturels est un document réalisé par l'Etat qui régit l'utilisation des sols en fonction des risques naturels auxquels ils sont soumis. Cette réglementation va de l'interdiction de construire à la possibilité de construire sous certaines conditions.

**Prévention** : Ensemble des dispositions visant à annuler le risque ou réduire les impacts d'un phénomène naturel : connaissance des aléas, réglementation de l'occupation des sols, mesures actives et passives de prévention, information des populations.

**Risque majeur** : Risque lié à un aléa d'origine naturelle ou risque technologique dont les effets prévisibles mettent en jeu un grand nombre de personnes, provoquent des dommages importants et dépassent les capacités de réaction des instances directement concernées. **Le risque majeur est la confrontation d'un aléa avec des enjeux.**

Ces définitions ont été établies par le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. Elles s'attachent au risque majeur, et plus particulièrement au risque naturel.

Il est donc possible d'en trouver d'autres, telles que la définition du danger donnée par le Bureau International du Travail : « situation matérielle comportant un potentiel d'atteinte à l'intégrité physique des personnes, de dommage pour les biens ou l'environnement ou d'une combinaison de ces atteintes ».

## 2. INTRODUCTION – OBJECTIFS ET CONTEXTE

---

Bien que la prise en compte des risques naturels soit obligatoire et que des textes législatifs définissent la conduite à tenir, notamment en ce qui concerne le risque sismique, il apparaît bien souvent que le thème est méconnu des industriels. Cette méconnaissance porte aussi bien sur la prise en compte des risques lors de la conception des installations que leur intégration dans la politique de prévention et de gestion des risques et de leurs conséquences.

Par ailleurs, il existe peu d'études sur l'impact réel des phénomènes naturels sur les installations industrielles. Pourtant, une simple analyse des derniers événements qui se sont produits, en particulier le séisme d'Izmit, montre que ces phénomènes sont parfois à l'origine d'accidents technologiques pouvant avoir de graves conséquences pour les populations environnantes.

Il est donc nécessaire d'améliorer la connaissance sur les phénomènes naturels et en particulier en quoi ils peuvent être des facteurs aggravants à l'origine de sur-accidents, et ce afin d'améliorer la prévention et la gestion en cas de crise.

Pour répondre à cette préoccupation, le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement finance depuis 2001 une Etude et Recherche intitulée "Risques naturels et Environnement industriel".

De manière globale, l'objectif de ce programme est de mener une réflexion globale sur l'incidence des risques naturels sur l'environnement industriel, permettant de préciser en quoi les risques naturels peuvent être des facteurs aggravants, à l'origine de sur-accidents et comment les intégrer dans l'analyse des risques et la politique de prévention.

Plus précisément, le programme vise à :

- améliorer la connaissance des phénomènes naturels, en particulier leurs impacts potentiels pouvant être un facteur aggravant pour les installations industrielles à risques ;
- faire une synthèse des différentes méthodologies existantes pour l'évaluation et la quantification des risques naturels ;
- effectuer un bilan de la façon dont les risques naturels sont pris en compte par les exploitants d'installations à risques ;
- proposer des recommandations pour améliorer la prise en compte des risques naturels pour l'analyse des risques et l'élaboration de la prévention sur les sites industriels.

Dans un premier temps, le projet ne s'intéressera qu'aux établissements "SEVESO".

Cette Etude et Recherche comporte quatre phases :

- opération a : améliorer la connaissance des phénomènes naturels, en particulier leurs impacts potentiels pouvant être un facteur aggravant pour les installations industrielles à risques ;
- opération b : identification des différentes méthodologies existantes pour l'évaluation, la quantification et la réduction des risques naturels ;
- opération c : bilan de la façon dont les risques naturels sont pris en compte par les exploitants d'installations à risques ;
- opération d : réflexion sur une méthodologie pour améliorer la prise en compte des risques naturels pour l'analyse des risques et l'élaboration de la prévention sur les sites

industriels.

Le présent rapport s'intègre dans l'opération a de l'étude. Les risques abordés sont les séismes, les inondations, les mouvements de terrain et les tempêtes. Il s'agit d'une synthèse sur la définition et les mécanismes de ces phénomènes naturels.

### 3. LES SEISMES

#### 3.1 DEFINITION

Un **séisme ou tremblement de terre** se traduit en surface par des vibrations du sol plus ou moins violentes et destructrices. Il provient de la fracturation des roches en profondeur. Celle-ci est due à l'accumulation d'une grande énergie qui se libère, en créant ou en faisant rejouer des failles, au moment où le seuil de rupture mécanique des roches est atteint.

Les dégâts observés en surface sont fonction de l'amplitude, la fréquence et la durée des vibrations.

#### 3.2 ORIGINE DES SEISMES

##### 3.2.1 Les catégories de séismes

Il est commode de classer les séismes selon leur mode de génération :

Mécanisme au foyer	Séismes naturels	Séismes artificiels/ anthropiques
Jeu d'une faille	<u>Séismes tectoniques</u> : Rupture soudaine des roches	Mise en eau d'un grand barrage Exploitation de gaz...
Explosion	<u>Séismes volcaniques</u> : Fracturation des roches dues à l'intrusion de magma Dégazage, oscillation propre du réservoir magmatique	Tirs d'explosion sismique Tirs de mines et carrières Essais nucléaires souterrains
Implosion	<u>Séismes d'effondrement</u> : Effondrement de cavités dans le gypse ou le calcaire Effondrement lié à un grand glissement de terrain	Phénomènes dynamiques d'origine minière (effondrements...)

Tableau 1 : les catégories de séismes (source : E.O.S.T. Strasbourg)

**Les séismes volcaniques** : ils se produisent en même temps que l'activité volcanique avec ou non éruption, sans que pour cela les deux phénomènes soient liés. Ils sont l'expression des mouvements du magma dans les chambres magmatiques du volcan. Les foyers sont relativement superficiels et les zones où les ondes sismiques sont perçues, relativement réduites. En effet, ces séismes, même lorsqu'ils sont violents, sont peu agressifs pour l'homme en raison même de leur siège, en zones inhabitées.

En revanche, ces ondes sismiques, très nombreuses, le sont d'autant plus que le magma approche de la surface (100 à plus de 1 000 par jour) et servent donc à la prévision des éruptions.

**Les séismes artificiels et d'effondrements**, à l'exception des tirs nucléaires, et malgré les dégâts et les pertes humaines parfois cruelles qu'ils occasionnent, sont généralement de petits phénomènes très localisés.



Les **séismes tectoniques** sont de loin les plus courants et les plus meurtriers. En effet, même si un nombre infime de ces séismes sont destructeurs, certains sont paroxysmiques et entraînent des catastrophes parmi les pires que l'on connaisse.

### 3.2.2 Les séismes tectoniques

#### 3.2.2.1 La structure interne de la terre

La terre se subdivise, de sa surface vers son centre, en plusieurs couches concentriques de nature et d'épaisseur différentes :

- Les **croûtes terrestres** qui sont de deux types ( $t^{\circ} = 0$  à  $900$  °C) :
  - la **croûte océanique** mince (environ 7 km), formée de roches basaltiques et qu'on nomme aussi SIMA (silicium-magnésium) ;
  - la **croûte continentale** plus épaisse (35 km environ) à cause de sa faible densité, formée de roches granitiques à intermédiaires, et qu'on nomme aussi SIAL (silicium-aluminium).
- Le **manteau** ( $t^{\circ} = 900$  à  $4\ 000$ °C) qui constitue 81 % du volume terrestre et qui comprend :
  - le **manteau supérieur** dont la partie supérieure est solide et dont la partie inférieure, appelée asthénosphère est plastique,
  - le **manteau inférieur**, très rigide.
- Le **noyau** ( $t^{\circ} = 4\ 000$  à  $5\ 000$ °C) qui forme 17 % du volume terrestre, qui est constitué de fer et de nickel et qui est divisé en noyau externe liquide et en noyau interne solide.

Les sismologues Mohorovic et Gutenberg ont donné leur nom aux deux discontinuités importantes séparant croûte, manteau et noyau.

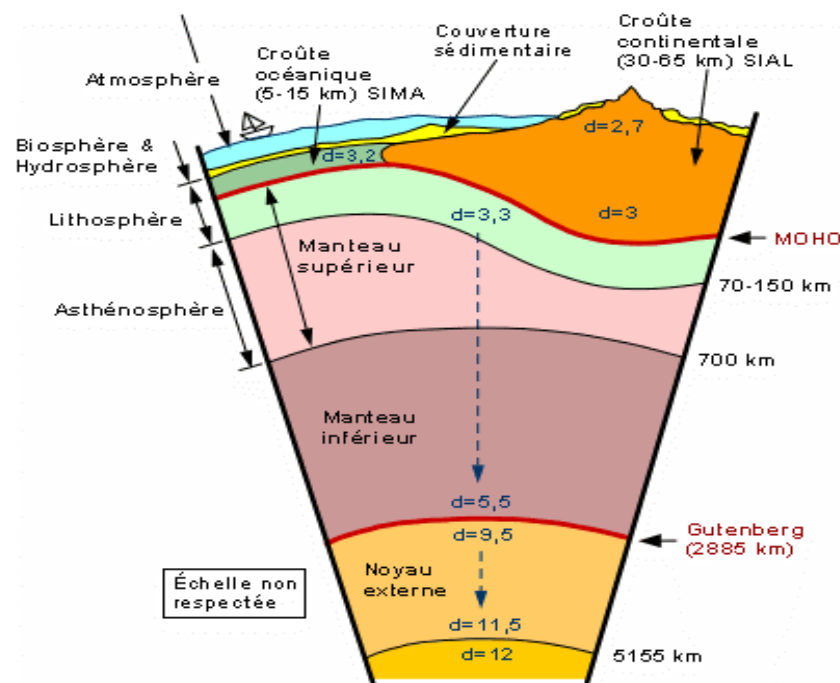


Figure 1 : la structure interne de la terre (source : Université de Laval)

### 3.2.2.2 Tectonique des plaques

La tectonique distingue sur la base des propriétés mécaniques des matériaux :

- la lithosphère,
- l'asthénosphère.

La lithosphère, qui comprend les croûtes terrestres océaniques et continentales ainsi que la partie supérieure du manteau supérieur, est constituée de 12 plaques mobiles (dont 7 principales) épaisses de 70 km (sous les océans) à 150 km (sous les continents), rigides et cassantes. Ces plaques évoluent les unes par rapport aux autres, à des vitesses de quelques centimètres par an, sous l'action des grands **mouvements de convection** qui se produisent en profondeur du manteau terrestre. Les fluides, réchauffés en profondeur où les roches sont naturellement radioactives, se dilatent, deviennent moins denses et remontent vers la surface où ils se refroidissent. Plus denses, ils replongent alors vers les profondeurs pour s'y réchauffer à nouveau. Ces flux entraînent les plaques lithosphériques. Chaque plaque possède son mouvement horizontal propre, ce qui résulte, au niveau des frontières, de mouvements relatifs d'éloignement, de convergence ou de coulissage.

Ces frontières sont de trois types :

- **la dorsale** est la frontière génitrice, sans elle la plaque vieillit et meurt (mouvement d'éloignement) ;
- **la fosse** est la frontière destructrice avec laquelle les matériaux de la plaque retournent à leur source originelle (mouvement de convergence) ;
- les frontières entre deux plaques continentales le long desquelles on peut observer deux types de mouvements :
  - collisions ;
  - coulissage au niveau desquelles se trouvent des **failles transformantes**.

Environ 90 % des séismes sont localisés au voisinage des limites de ces plaques. Mais le reste de l'écorce terrestre n'est pas pour autant à l'abri des tremblements de terre car les contraintes en limite de plaque sont très importantes et se transmettent à l'intérieur des plaques sur de très grandes régions. Ainsi, même à très grande distance des zones les plus actives, des séismes peuvent se produire, notamment sur des fractures déjà existantes (cf. séisme en Inde à Latur 1993). Seulement, les mouvements de ces fractures à long terme sont bien plus lents, et donc les séismes associés sont plus rares.

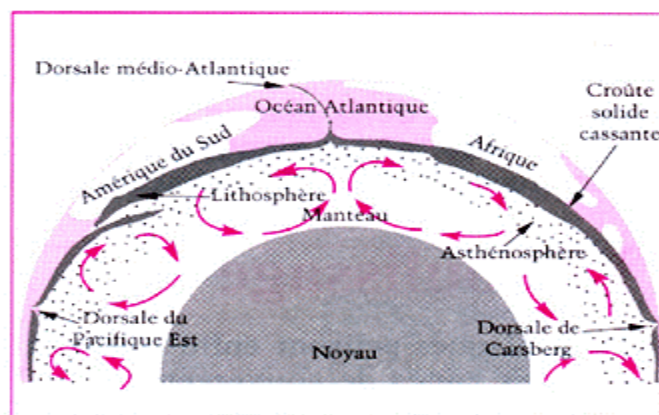


Figure 2 : les cycles de convection (source : MATE)

### 3.2.2.3 Les zones d'écartement

Les zones d'écartement correspondent à l'éloignement de deux plaques et à la production de nouvelle croûte océanique par cristallisation de magma. Elles se situent au niveau des **dorsales océaniques** (lignes continues de montagnes sous-marines) qui sont le siège de tremblements de terre nombreux mais relativement modérés ainsi que du système volcanique le plus important de la planète. Ces tremblements de terre se produisent à 1 000 ou 2 000 m sous la terre au milieu des océans et dérangent assez peu l'homme. A la divergence de plaques, la lithosphère océanique dépasse rarement les 10-15 km, ce qui fait qu'il ne peut y avoir que des séismes superficiels.

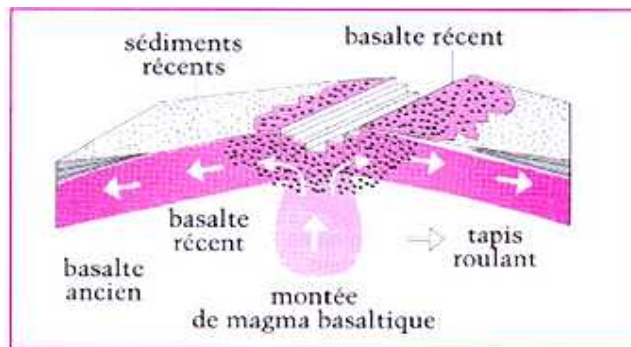


Figure 3 : la divergence (source : MATE)

### 3.2.2.4 La convergence

La convergence entre deux plaques est la cause principale de la formation des séismes ainsi que de la chaîne des montagnes et du volcanisme aérien. Les fosses sont le siège des tremblements de terre les plus violents mais aussi les plus meurtriers à cause de leur situation géographique souvent près des zones à forte densité de population (Chili, Japon, Mexique). C'est aussi le seul endroit où l'on a des tremblements de terre profonds jusqu'à 700 km.

Il en existe trois types :

- la convergence de deux plaques océaniques : la plaque la plus dense, généralement la plus vieille, plonge sous l'autre. Ce type de convergence est responsable du volcanisme et des séismes des arcs insulaires.

↳ ex : Antilles : subduction de la plaque Nord-Atlantique sous la plaque Caraïbe.

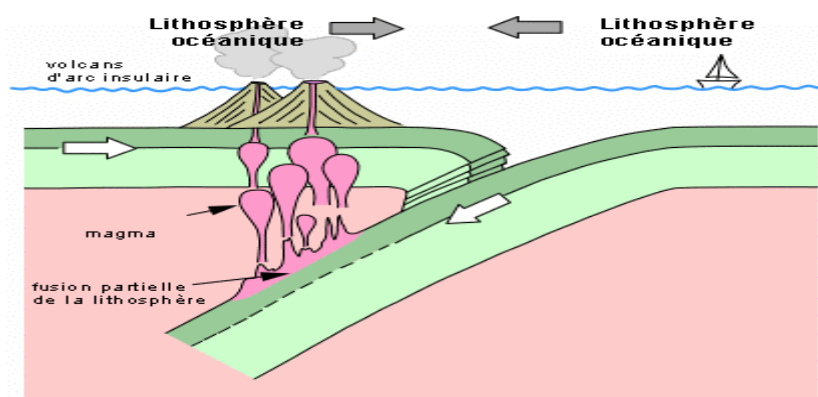


Figure 4 : la convergence de deux plaques océaniques (source : Université de Laval)

- convergence entre une plaque océanique passant sous une plaque continentale pour plonger dans le manteau et se faire peu à peu « digérer » par l'asthénosphère.  
 ↳ ex : séisme de Mexico.

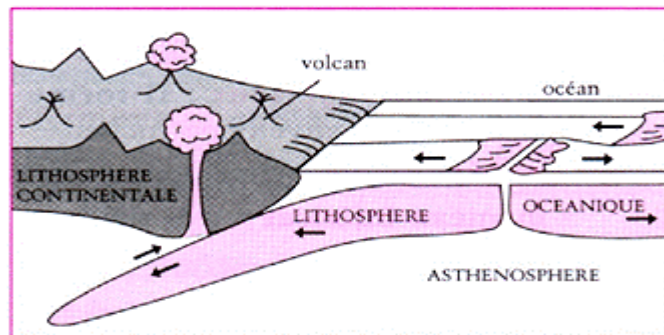


Figure 5 : la subduction d'une plaque océanique sous une plaque continentale  
 (source : MATE)

- la **collision** : convergence entre deux plaques continentales.

La convection dans le manteau supérieur n'est pas assez forte pour enfoncez une des deux plaques dans l'asthénosphère à cause de la trop faible densité de la lithosphère par rapport à celle de l'asthénosphère. Tout le matériel sédimentaire est comprimé et le continent le plus faible se plisse et se soulève pour former une chaîne de montagnes et de grands systèmes de failles. La sismicité y est importante mais le volcanisme quasi existant.

↳ ex : Inde/Asie : création de l'Himalaya et du Tibet, séismes jusqu'en Chine.

#### 3.2.2.4.1 Les zones de coulissage

Les zones de **coulissage** (glissement horizontal) se caractérisent par une sismicité tout aussi élevée que dans les zones de convergence ainsi que par **des failles transformantes**. Celles-ci permettent de faire le relais entre des limites divergentes et convergentes et sont le siège de séismes superficiels. Elle ne portent pas de volcans.

↳ ex : faille de San Andreas (USA) qui provoqua le séisme de San Francisco en 1906 (cf annexe 2).

#### 3.2.2.5 Mécanisme et rupture de faille

Sous l'effet des contraintes de cisaillement causées par ces mouvements, les couches superficielles de la lithosphère se déforment progressivement de façon élastique et accumulent de l'énergie. Lorsqu'en certains endroits, la limite d'élasticité est atteinte, il se produit une ou des **ruptures** qui se traduisent par la formation de failles. L'énergie brusquement dégagée le long de ces failles causent les séismes. Les contraintes tectoniques se relâchent, la faille est alors bloquée, et le **cycle sismique** peut recommencer. En effet, si les contraintes se poursuivent dans cette même région, l'énergie va à nouveau s'accumuler et la rupture consécutive se fera dans les plans de faille déjà existants. A cause des forces de friction entre les deux parois d'une faille, les déplacements le long de cette faille ne se font pas de manière continue et uniforme, mais par coups successifs, provoquant à chaque fois un séisme. Les failles peuvent rester bloquées durant de longues périodes, tandis que le mouvement régulier des plaques se poursuit en profondeur. Dans une région donnée, des séismes se produiront à plusieurs reprises le long d'une même faille, puisque cette dernière

constitue un plan de faiblesse dans la lithosphère. En effet, la très grande majorité des séismes est localisée sur des failles déjà existantes.

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

Suivant le déplacement le long de la faille, on distingue différentes sortes de failles et de mécanismes au foyer associés à ces failles :

- **les failles verticales ou failles en décrochement / décrochantes** (schémas a et b): les deux blocs coulissent horizontalement l'un par rapport à l'autre et la surface du sol est décalée de part et d'autre de la faille (jusqu'à plusieurs mètres)
- **les failles inclinées** où un bloc s'affaisse ou monte par rapport à l'autre : elles créent des escarpements pouvant former des murs de plusieurs mètres de haut.
- **les failles normales** (schéma d) : elles sont appelées ainsi parce que la déformation entraîne un étirement des roches initiales ainsi qu'un allongement apparent perpendiculaire à la faille, dans le plan horizontal. Elles résultent de mouvements d'écartement (divergence).
- **les failles inverses ou chevauchantes** (schéma c) : elles sont appelées ainsi parce que la déformation entraîne un raccourcissement horizontal des terrains initiaux. Elles résultent de mouvements de rapprochement (convergence).

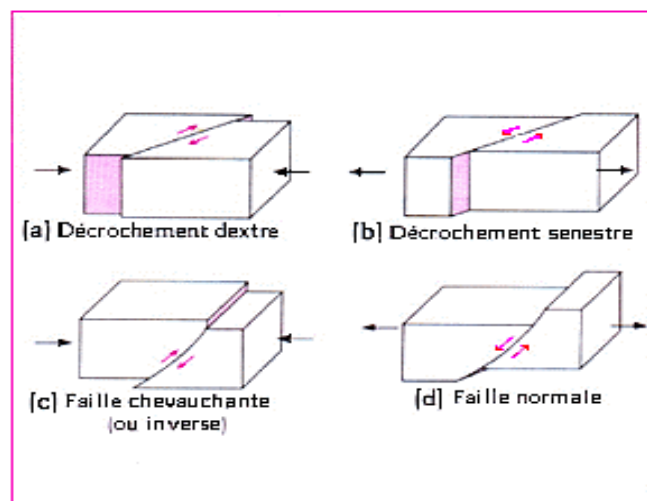


Figure 6 : les différents types de failles (source : MATE)

Cependant, dans la réalité, les déformations sont complexes et différents types de mouvement coexistent. Par exemple, les mouvements décrochants peuvent être combinés avec les autres mouvements.

Les failles peuvent être de tailles très variables (quelques centimètres à plusieurs milliers de kilomètres) et affectent la croûte terrestre jusqu'à des profondeurs variables.

On distingue d'ailleurs trois classes de séismes, en fonction de la profondeur où ils se produisent :

- **les séismes superficiels** qui se produisent en faible profondeur dans la partie cassante de la croûte terrestre, soit à moins de 60 kilomètres. C'est dans cette région que se situe le plus souvent le foyer car 95 % des tremblements de terre dans le monde ont lieu à cette profondeur. Ces séismes se retrouvent autant aux frontières divergentes, c'est-à-dire le long des dorsales médio-océaniques qu'aux frontières convergentes au voisinage des fosses océaniques.
- **les séismes intermédiaires** qui se produisent entre 60 et 300 kilomètres de profondeur et se concentrent uniquement au voisinage des limites convergentes.
- **les séismes profonds** qui se produisent de 300 à 700 km, soit en pratique la base de l'asthénosphère, et qui se trouvent exclusivement au voisinage de limites convergentes.

Par ailleurs, une grande faille n'est pas un trait continu mais plutôt un réseau qui se diversifie, une combinaison de failles plus petites qui donne l'illusion de la continuité. Dans un séisme, ce n'est pas toute la zone de faille qui casse, mais certains segments, alors que d'autres résistent. De là l'essaim de séismes de magnitude inférieure observés avant et après, nommés respectivement **précurseurs** et **répliques**. Le séisme n'est donc pas *une* rupture ; mais une cascade de ruptures coordonnées entre elles.

La considérable libération d'énergie lors d'un séisme est à l'origine des ondes sismiques.

Lors du mouvement des parois de la faille, la plus grande partie de l'énergie se dissipe sous forme de chaleur obtenue par frottement. Une partie seulement se propage au loin sous forme de vibrations, d'ondes élastiques qui se propagent dans toutes les directions. Le rapport entre l'énergie des ondes et l'énergie totale, appelé rendement sismique, est estimé entre 20 et 30%.

### 3.3 LES ONDES SISMIQUES

#### 3.3.1 Généralités

La fréquence moyenne d'une vibration peut varier de plus de 500 Hz à moins de 0,01 Hz selon la nature de l'ébranlement d'origine, la compacité du matériau traversé et la distance parcourue. Les vibrations dans la gamme de 0,1 à 2 secondes de période ( $f = 0,5$  à 10 Hz) affectent le plus les bâtiments courants.

En fait, à l'origine, le spectre des fréquences de la vibration est très étendu. Le filtrage des hautes fréquences se fait progressivement selon le chemin parcouru et les matériaux traversés ; les matériaux arrêtent des fréquences d'autant plus basses qu'ils sont peu compacts.

On distingue deux grands types d'ondes émises par un séisme : les ondes de fond, celles qui traversent la Terre et qui comprennent les ondes S et P, et les ondes de surface, celles qui ne se propagent qu'à la surface et auxquelles appartiennent, en particulier, les ondes de Love et de Rayleigh.

#### 3.3.2 Les ondes de fond ou de volume

Il s'agit d'ondes courtes et tridimensionnelles qui progressent en profondeur et rapidement.

**Les ondes P ou ondes primaires ou ondes de compression ou ondes longitudinales** : ces ondes de compression assimilables aux ondes sonores se propagent dans tous les états

de la matière. Les particules se déplacent selon un mouvement avant-arrière dans la direction de la propagation de l'onde si bien que le déplacement du sol qui accompagne leur passage se fait par dilatation et compression successives, parallèlement à la direction de propagation de l'onde. Ces ondes sont les plus rapides (6 km/s près de la surface) et sont enregistrées en premier sur un sismogramme. Elles sont responsables du grondement sourd que l'on peut entendre au début d'un tremblement de terre.

**Les ondes S ou ondes secondaires ou ondes de cisaillement ou ondes transversales :** ces ondes de cisaillement ne se propagent que dans les solides. Les particules oscillent dans un plan vertical, à angle droit par rapport à la direction de propagation de l'onde si bien qu'à leur passage, les mouvements du sol s'effectuent perpendiculairement au sens de propagation de l'onde. Leur vitesse est en moyenne 1,7 fois plus lente que celle des ondes P et elles apparaissent en second sur les sismogrammes.

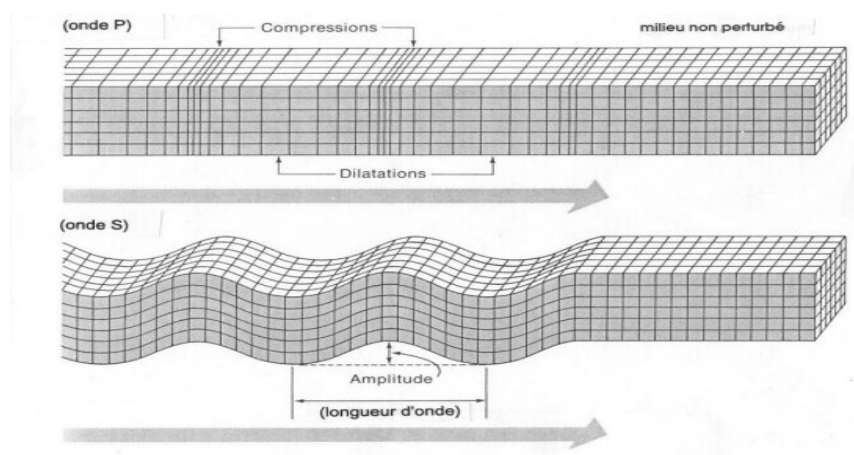


Figure 7 : les ondes de volume (source : IPSN)

### 3.3.3 Les ondes de surfaces

Il s'agit d'ondes plus longues et planes qui se propagent plus lentement que les ondes de volume, et en surface.

**Les ondes L ou ondes de Love :** le déplacement est essentiellement le même que celui des ondes S sans mouvement vertical (oscillation horizontale). Aussi ne les enregistre-t-on que sur les composantes horizontales du sismomètre. Elles impriment au sol un mouvement de vibration latéral ou ébranlement horizontal qui est la cause de nombreux dégâts aux fondations des édifices. Elles se propagent à environ 4 km/s.

**Les ondes de Rayleigh** sont assimilables à une vague. Leur mouvement est complexe, à la fois horizontal et vertical, semblable à une ellipse. Aussi cette onde est-elle enregistrée sur les trois composantes du sismomètre. Elles sont moins rapides que les ondes de Love. Les vibrations engendrées par cette onde durent plusieurs minutes.

Les ondes de surface ont une vitesse de propagation de 1,5 à 5 km/s dans les terrains compacts ou rocheux et de 0,5 à 1,5 km/s dans les terrains meubles.

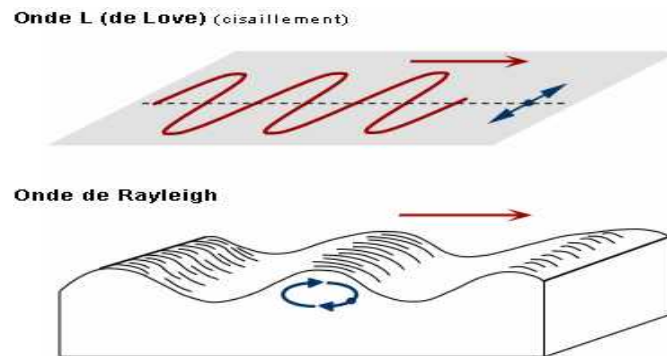


Figure 8 : les ondes de surface (source : Université de Laval)

Les ondes S et les ondes de surface, imprimant au sol des mouvements cisailants, font le plus de dégâts.

### 3.4 CARACTERISTIQUES DES SEISMES

#### 3.4.1 Le foyer

Le foyer (ou hypocentre) est le lieu de la rupture des roches en profondeur. C'est la région de la faille d'où partent les ondes sismiques.

#### 3.4.2 L'épicentre

L'épicentre est le point de la surface terrestre situé exactement à la verticale du foyer.

Le centre de la zone de plus forte intensité est appelé **l'épicentre macrosismique**. Il peut être différent de **l'épicentre réel**, dit **microsismique**, car les effets de surface comme la présence d'alluvions ou le relief peuvent amplifier les ondes sismiques (cf. § V).

#### 3.4.3 La magnitude

**La magnitude (M)** est la **mesure de la quantité d'énergie libérée lors d'un séisme**. C'est une valeur intrinsèque du séisme, indépendante du lieu d'observation, des témoignages de la population.

L'Américain Charles Francis Richter a introduit cette notion en 1935 pour les séismes locaux californiens quasi superficiels de la zone de coulissage de San Andras.

Il ne s'agit pas d'une échelle en degré mais d'une **fonction logarithmique continue, négative ou positive et en principe sans limites**. Elle est fonction de la longueur de la faille et est calculée soit à partir de l'amplitude des signaux enregistrés par les sismomètres (/graphes) à 100 km de l'épicentre, soit à partir de la durée du signal lue sur le sismogramme. Son **calcul** nécessite plusieurs corrections tenant compte du type de sismographe utilisé, de la distance entre le séisme et la station d'enregistrement, de la profondeur du séisme, de la nature du sous-sol où se trouve la station d'enregistrement.

Richter l'a définie ainsi :

$$M = K (\log A - \log A_0)$$

Avec A l'amplitude des mouvements du sol dus au séisme considéré, mesurée par les sismographes à une distance donnée de l'épicentre (100 km)

$A_0$  l'amplitude maximale à la même distance d'un séisme de référence

K un coefficient multiplicateur.



Ce paramètre n'a pas de limites inférieure ou supérieure. En réalité, sa valeur minimale est liée à la sensibilité du sismographe (un sismographe très sensible peut enregistrer une magnitude de l'ordre de -2, équivalente à l'énergie dégagée par la chute d'une brique sur le sol d'une hauteur de 1 mètre). Sa valeur maximale est liée à la résistance de la lithosphère, aux forces tectoniques et à la longueur maximum de la faille susceptible de se fracturer d'un seul coup. Le séisme de plus grande magnitude connu au cours de ce siècle est celui du Chili en 1960, de magnitude 9,5 ; la zone de rupture de la faille a atteint plus de 1 000 km de long. Les séismes de magnitude supérieure à 9 sont très rares et la magnitude 10 semble être une limite raisonnable compte tenu de la solidité des roches et de la fragmentation des failles.

Les progrès de l'instrumentation sismique et de la compréhension des phénomènes ont conduit à définir d'autres magnitudes pour améliorer cette méthode et en obtenir des résultats permettant de comparer à peu près correctement tous les séismes naturels et nucléaires.

Les différentes échelles de magnitude sont les suivantes :

- **la magnitude locale  $M_L$**  : elle est assimilée à **celle de Richter** et est utilisée pour des séismes dits locaux. Il s'agit de l'échelle la plus utilisée pour mesurer la magnitude qui est en principe celle communiquée par les médias à l'annonce d'une catastrophe. L'échelle comprend 9 degrés. La relation entre magnitude  $M$  et énergie  $E$  libérée au foyer nous montre qu'augmenter la magnitude d'un degré revient à multiplier l'énergie par 30 :

$$\text{Log } E = 11,4 + 1,5 M$$

On n'a pas encore mesuré plus de  $M_L = 8,5$ , ce qui est considérable. La magnitude est définie à partir de l'amplitude maximale des ondes P et des ondes de surface. Elle est toujours moyennée sur plusieurs stations en tenant compte des corrections locales.

- **La magnitude de durée  $M_D$  ou  $M_T$**  : on l'utilise également pour des séismes proches mais elle est définie à partir de la durée du signal.
- **La magnitude des ondes de surface  $M_S$**  : elle est utilisée pour les séismes lointains, dits télé-séismes, dont la profondeur est inférieure à 80 km. Elle se calcule à partir de l'amplitude des ondes de surface.
- **La magnitude des ondes de volume  $M_B$**  : cette magnitude est définie pour tous les télé-séismes et en particulier pour les séismes profonds, car ceux-ci génèrent difficilement des ondes de surface. Elle est calculée à partir de l'amplitude de l'onde P qui arrive au début du sismogramme.
- **La magnitude d'énergie ou de Kanamori  $M_W$**  : elle est définie pour les très gros séismes. Elle est calculée à partir d'un modèle physique très théorique de double couple qui provoquerait la fracture à l'origine du séisme et est liée au **moment sismique  $m_0$**  :

$$m_0 = \mu S D$$

Avec  $\mu$  la rigidité du milieu,  
 $S$  le déplacement moyen de la faille  
 $D$  la surface de la faille

Les résultats diffèrent beaucoup plus pour les très gros séismes, ceux dont la magnitude est supérieure à 7. Le calcul des magnitudes  $M_S$  et  $M_W$  est alors mieux adapté.

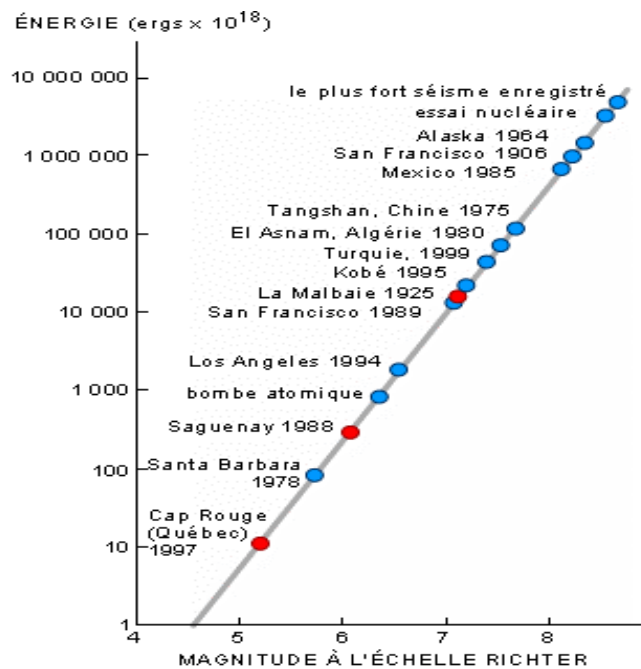


Figure 9 : Relation magnitude (échelle arithmétique) / foyer (échelle logarithmique) (source : Université de Laval)

Cette courbe nous montre bien qu’avec une progression arithmétique de la magnitude, l’énergie dégagée au foyer croît de manière exponentielle.

### 3.4.4 L'intensité

L'intensité (I) correspond à l'évaluation des effets et dommages observés et ressentis par l'homme sur le terrain en un lieu donné.

L'intensité varie selon ce lieu, c'est-à-dire avec l'éloignement du foyer, la nature du sol, l'effet de site... Elle est généralement maximale à l'aplomb de site (intensité épacentrale) et elle décroît avec la distance (sauf effets de site, sur terrain sédimentaire par exemple). Elle est d'autant plus importante que le foyer est superficiel. 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).

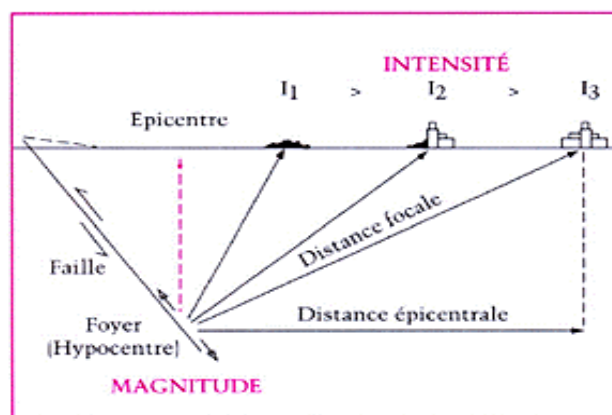


Figure 10 : Magnitude et intensité d'un séisme (source : MATE)

On établit généralement après les séismes importants une **carte d'intensités**. On reporte sur ces cartes d'intensité, les courbes d'égale intensité appelées **isoséistes**.

Pour mesurer les effets d'un séisme en un lieu donné de la surface du sol, les sismologues ont établi des **échelles d'intensité** dans lesquelles le degré d'intensité établi sur un ensemble de critères tels que les dégâts subis par les constructions, les modifications de la surface du sol ou les impressions des témoins, caractérise le niveau de sévérité de la secousse sismique. Le nombre de victimes n'est jamais pris en compte dans ces évaluations car il dépend non seulement de l'intensité, mais du type local de construction, de la densité de population et de l'heure du séisme.

Ces échelles font donc appel à une bonne part de subjectivité.

#### 3.4.4.1 Diversité des échelles d'intensité macrosismique

La première véritable échelle macrosismique reposant sur des critères précis ne fut mise au point qu'en 1883 par l'italien De Rossi et le suisse Forel : elle était limitée à 10 degrés. En 1902, le sismologue et volcanologue italien **Mercalli**, proposa une échelle plus détaillée qui fut ensuite élargie à 12 degrés par Cancani, puis présentée sous une forme plus élaborée par Sieberg. Dénommée échelle MCS (Mercalli, Cancani, Sieberg), et fondée sur un questionnaire d'informations, base de l'enquête macrosismique établie auprès d'un grand nombre d'observateurs, l'échelle était d'abord essentiellement descriptive. Au fur et à mesure, souvent après l'apparition de séismes destructeurs, elle fut modifiée pour prendre en compte de nouveaux critères et servir de base à l'établissement de règlements de construction.

Ainsi fut mise au point en 1931, par les californiens Wood et Neumann, l'échelle Mercalli modifiée (cf annexe 4) dont une version améliorée en 1956 par Richter est encore utilisée actuellement dans le monde.

Cependant, d'autres échelles se développèrent dans d'autres pays pour prendre en compte les spécificités nationales aussi bien constructives que sismiques. Ne pouvant comparer le niveau de sismicité de la France et d'une grande partie de l'Europe avec celui de la Californie ou du Japon d'une part, et tentant de remettre de l'ordre dans cette diversité des échelles d'autre part, une compilation des échelles macrosismiques les plus utilisées fut proposée en 1964 par les sismologues Medvedev, Sponheuer et Karnik. Cette échelle, dite échelle **MSK** est actuellement utilisée par la France et dans la plupart des pays d'Europe.

L'échelle Mercalli modifiée comme l'échelle MSK comportent douze degrés d'endommagement et sont numérotées en chiffres romains de I à XII.

Le degré I correspond aux secousses les plus faibles, à peine ressenties, à un séisme non perceptible.

Le degré V correspond au seuil d'affolement des populations avec réveil des dormeurs et aux faibles dommages.

Le degré XII correspond aux secousses les plus fortes, celles ayant entraîné une destruction totale des bâtiments et un changement total du paysage.

#### 3.4.4.2 L'échelle MSK

L'échelle MSK a été bâtie sur le modèle de la loi de Weber-Feitcher comme d'autres échelles subjectives (Mohs pour la dureté des minéraux, Beaufort pour la force du vent...). La progression des degrés par rapport aux paramètres de vibration y est quasi géométrique, l'amplitude double à peu près de degré en degré. Cette échelle a été adoptée en avril 1978 par une commission des Nations-Unies, la commission sismologique européenne. Cette dernière a souhaité des modifications lors de sa réunion de Sofia en 1988 pour combler les

lacunes des intensités VI et VII, et les effets ressentis dans les étages supérieurs des bâtiments de grande hauteur.

L'échelle MSK a en outre l'avantage de considérer les dommages en fonction de la qualité des constructions dont elle distingue trois types :

- Type A : maisons en argile, pisé, briques crues ; maisons rurales ; constructions en pierre tout venant.
- Type B : constructions en briques ordinaires ou en blocs de béton ; constructions mixtes maçonnerie et bois ; constructions en pierre taillée.
- Type C : Constructions armées ; constructions de qualité en bois.

Les dommages aux constructions sont classés en 5 degrés :

- 1<sup>er</sup> degré : dommages légers,
- 2<sup>e</sup> degré : dommages modérés,
- 3<sup>e</sup> degré : dommages sérieux,
- 4<sup>e</sup> degré : destruction,
- 5<sup>e</sup> degré : dommage total.

L'échelle MSK considère trois sortes d'effets :

- a : sur les personnes et leur environnement,
- b : sur les ouvrages de toute nature,
- c : sur les sites naturels.

Les quantités sont définies comme suit :

- Une ou quelques : 5 % environ,
- Nombreuses : 50 % environ,
- La plupart : 75 % environ.

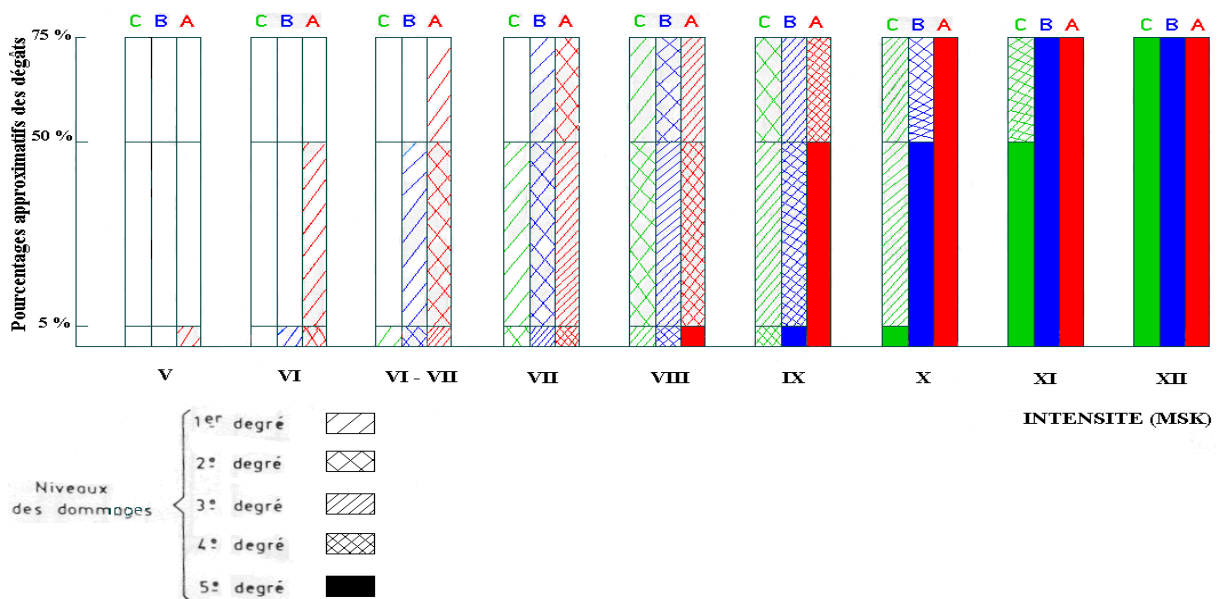


Figure 11 : Progression des dommages dans l'échelle d'intensité MSK selon le type de construction (A, B ou C) (d'après A. LEVERT)

### 3.4.4.3 L'échelle macrosismique européenne (EMS)

Depuis peu, une nouvelle échelle a été adoptée par les pays européens : l'**EMS 98** (European Macroseismic Scale 1998) qui est en phase de remplacer l'échelle MSK.

L'EMS 98 distingue les bâtiments de maçonnerie des constructions en béton armé et leur attribue précisément un degré de vulnérabilité au moyen d'une échelle de 6 classes (de A à F).

Les dégâts sont observés sur les hommes, sur les objets et la nature, et sur les bâtiments ; ils sont classés en 5 degrés :

- 1<sup>er</sup> degré : négligeables à légers
- 2<sup>e</sup> degré : modérés,
- 3<sup>e</sup> degré : importants à lourds
- 4<sup>e</sup> degré : très lourds,
- 5<sup>e</sup> degré : destruction

### 3.4.4.4 Echelle d'intensité JMA

Les Japonais utilisent une échelle d'intensité (JMA) qui leur est propre et qui date de 1951, graduée de 0 à VII, de l'enregistrement imperceptible pour l'homme à la ruine, correspondant à la démolition de plus de 30 % des maisons traditionnelles japonaises.

## 3.5 LES FACTEURS AGGRAVANTS

Dans le matériau terrestre, qui n'est ni homogène, ni isotrope, ni élastique, comme le voudrait la théorie, les effets des vibrations, hormis les problèmes éventuels posés par la rupture en surface de la faille, dépendent des caractéristiques réelles de ce matériau, et notamment de sa compacité et de sa teneur en eau. Un massif rocheux compact est relativement proche du modèle théorique ; en général, il vibre sans que sa structure soit sensiblement altérée. Il n'en va pas de même d'une formation de matériau meuble ; sa structure tend à se compacter en passant généralement par une phase de réarrangement des grains. Deux types d'effets peuvent alors être mis en évidence :

- des effets directs, dus à la modification du mouvement vibratoire ; ils peuvent conduire à des « **effets de site** » ;
- des effets induits, dus à des ruptures du sol (affaissements, glissements, éboulements et même liquéfactions si la structure est saturée) qui peuvent modifier l'environnement.

Dans le cadre des atlas communaux, les zones susceptibles de subir de tels effets liés aux conditions de site ont été cartographiées.

Autre effet induit possible, le **tsunami**, ou raz-de-marée, pouvant être provoquée par un tremblement de terre ou une éruption volcanique.

### 3.5.1 Les effets de site

Les irrégularités de la surface topographique et la présence de couches géologiques souterraines de nature et géométrie variables, peuvent accroître les effets dévastateurs d'un séisme par modification des caractéristiques du mouvement vibratoire.

Deux grands ensembles d'effets de site peuvent être distingués :

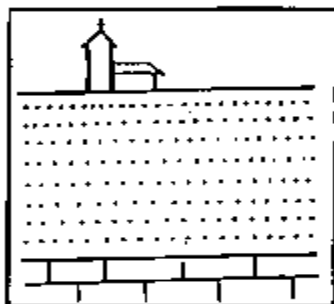
- **les effets de site topographiques :**

Les sommets des buttes, des crêtes allongées, les rebords de plateaux et de falaises sont souvent le siège d'amplifications importantes, intéressant une large gamme de constructions.

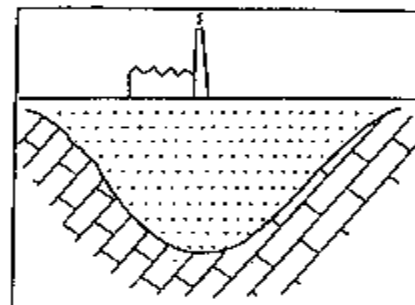
- **Les effets de site liés à la structure et à la nature du sous-sol :**

Les caractéristiques mécaniques de certaines formations superficielles (densité, rigidité, compressibilité...), la géométrie de ces formations (empilement, remplissage de fond de vallée, contact tectonique ou stratigraphique) sont susceptibles de modifier le signal sismique. Il s'agit de zones présentant deux séries lithologiques très contrastées, par rapport aux vitesses des ondes de cisaillement, la série la plus rigide correspond au substratum. Plus particulièrement, les ondes peuvent être amplifiées par des dépôts sédimentaires récents.

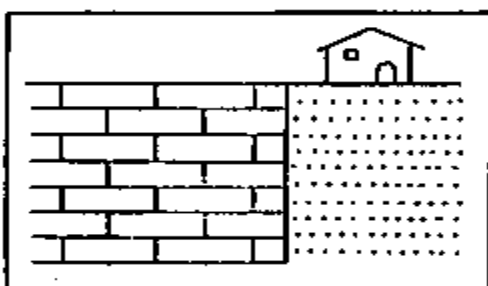
Quatre **configurations-types** responsables d'amplifications locales se dégagent des observations macrosismiques, des études expérimentales et des modélisations. Elles servent à cartographier l'aléa en les comparant aux données de terrain. Trois d'entre elles étant liées à des contrastes de rigidité des terrains, verticaux ou latéraux (effets liés à la structure et à la nature du sous-sol). La dernière correspond aux effets topographiques.



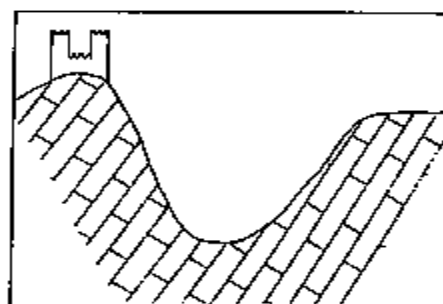
*formations peu rigides surmontant un substratum rigide, géométrie quasi horizontale*



*formations peu rigides surmontant un substratum rigide, géométrie complexe aggravant le phénomène*



*discontinuité latérale entre formations de rigidité différente*



*reliefs topographiques : buttes isolées, crêtes allongées, rebords de falaises ou de plateaux...*

Figure 12 : les effets de sites (source : BRGM)

### 3.5.2 Liquéfaction

La liquéfaction est un phénomène qui se produit sous sollicitation sismique (éventuellement en bord de mer sous l'effet de la houle ou par suite d'une activité anthropique).

Le passage d'une onde sismique provoque, dans certaines formations géologiques, la perte de résistance au cisaillement d'un matériau sableux saturé en eau, liée à une augmentation de la pression interstitielle engendrée par les déformations cycliques. C'est-à-dire que la pression de l'eau entre les grains réduit leur capacité à s'accrocher les uns aux autres : ils peuvent se mettre à rouler tels des billes, et le milieu se comporte mécaniquement comme un liquide.

La déconsolidation brutale du matériau se traduit par la déstructuration du sol qui se liquéfie, rendant particulièrement instables les constructions reposant sur ces formations. Les fondations peuvent s'enfoncer ou basculer, entraînant en bloc la construction au-dessus, ou causant son effondrement.

Le phénomène de liquéfaction concerne certaines formations géologiques définies par :

- leur nature : sables, limons, vases,
- leur cohésion : formations peu compactes,
- leur degré de saturation en eau : la formation doit être saturée en eau,
- leur granulométrie : granulométrie uniforme, comprise entre 0,05 et 1,5 mm.

Ces formations sont présentes dans les plaines et vallées alluviales.

### 3.5.3 Les tsunamis

Un séisme déclenché dans la croûte océanique engendre un mouvement oscillatoire de l'eau. L'amplitude de ces ondes dépend de la profondeur. En eau profonde, un tsunami est à peine perceptible ; il ne se distingue pas d'une vague (moins d'un mètre d'amplitude). Il peut parcourir ainsi des dizaines de milliers de kilomètres, puis il s'enfle près des côtes pour atteindre des amplitudes allant jusqu'à 30 m dans les baies en forme de V (de telles vagues ont déjà été observées à Hawaï et au Japon). On peut aisément imaginer leur effet destructeur sur les zones côtières habitées (cf Chili).

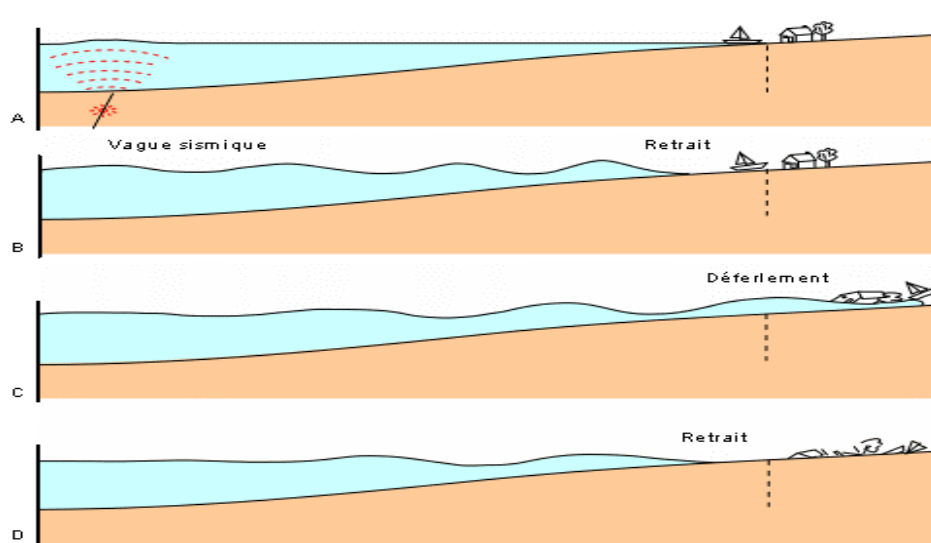


Figure 13 : mécanisme d'un tsunami (source : Université de Laval)

Les tsunamis se propagent dans toutes les directions et leur vitesse est fonction de la profondeur de l'eau. Dans les grands bassins océaniques, leur vitesse moyenne est de 700 km/h (entre 500 et 800 km/h) et leur périodicité est de l'ordre de 15 à 60 minutes. Ainsi, un raz-de-marée initié par un séisme qui se sera produit à 1 000 km des côtes viendra frapper ces côtes une à 2 heures plus tard. Cette grande différence de vitesse de propagation entre ondes sismiques et tsunamis permet de prévoir ces derniers si la distance de l'épicentre à la région menacée est supérieure à 2 000 km.

En raison des importantes zones sismiques qui courent autour du Pacifique, les pays de la zone circumpacifique sont les plus menacés par les tsunamis. De plus, de tels phénomènes ayant des effets particulièrement redoutables sur les îles basses, les DOM-TOM et les îles polynésiennes se trouvent être les plus menacés par ce type de risque.

#### **3.5.4 Les mouvements de terrain**

Les séismes peuvent déclencher des mouvements de terrains tels que des glissements de terrain, des éboulements des chutes de blocs, des effondrements de cavités souterraines. L'intensité de ces phénomènes peut être très importante et induire des dégâts considérables.

Le séisme d'IZMIT (Turquie) survenu le 17 août 1999 a provoqué pratiquement tous les phénomènes possibles, depuis les mouvements de terrain, les éboulements rocheux le long des escarpements jusqu'aux grands déplacements du sol par glissement et affaissement se traduisant même par des immersions locales de terrains en bordures de mer (région de Gölçuk). Ces phénomènes ont affecté aussi bien les fonds marins que les sols.



## 4. LES INONDATIONS

---

### 4.1 DEFINITIONS

Une **inondation** correspond au débordement des eaux hors du lit mineur à la suite d'une crue. C'est une submersion (rapide ou lente) d'une zone pouvant être habitée. Les eaux occupent alors le lit majeur du cours d'eau.

Une inondation correspond à la submersion d'une zone par de l'eau d'origine autre que le réseau d'eau potable ou que les eaux d'assainissement dans le cadre d'un fonctionnement normal du réseau.

La provenance des eaux peut donc être :

- eaux de débordement d'un cours d'eau en crue, qui franchit les limites naturelles de son lit ou les protections élaborées par les hommes ;
- eaux en provenance du réseau d'assainissement, lui-même inondé par la montée des eaux d'une rivière en crue ;
- eaux de ruissellement sur les terrains avoisinant le site étudié ;
- eaux en provenance de la remontée de la nappe phréatique.
- cas rare mais grave de la rupture d'un endiguement soit sous la poussée des glaces lors d'une embâcle, soit lors d'une débâcle de glace qui emporterait la levée.

Une **crue** correspond à l'augmentation du débit d'un cours d'eau dépassant plusieurs fois le débit moyen. Elle se traduit par une augmentation de la hauteur d'eau.

Le débit d'un cours d'eau en un point donné est la quantité d'eau (m<sup>3</sup>) passant en ce point par seconde ; il s'exprime en m<sup>3</sup>/s.

Un cours d'eau s'écoule habituellement dans son **lit mineur**.

Le **lit majeur** est un espace occupé par un cours d'eau lors d'une inondation. Il peut être scindé en deux zones :

- une **zone d'écoulement**, au voisinage du lit mineur, où le courant a une forte vitesse ;
- une **zone 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 de la montée des eaux à l'aval.

### 4.2 LES TYPES D'INONDATIONS

Différents types d'inondations sont susceptibles d'affecter une région, avec par ordre croissant de gravité :

#### 4.2.1 Les inondations par stagnation d'eaux pluviales

Elles sont dues à une capacité insuffisante d'infiltration, d'évacuation des sols ou du réseau d'eaux pluviales lors de pluies anormales. Les zones de stagnation des eaux de pluie (zones de dépression ou à pente très faible), en particulier en zone urbaine, est souvent le facteur déterminant des inondations des quartiers les plus bas. Lorsque ce type d'inondation intéresse des secteurs étendus, on parle d'inondation de plaine.

Ce type d'inondation n'est en général pas dangereux pour la vie humaine, mais peut

engendrer des dégâts matériels parfois lourds.

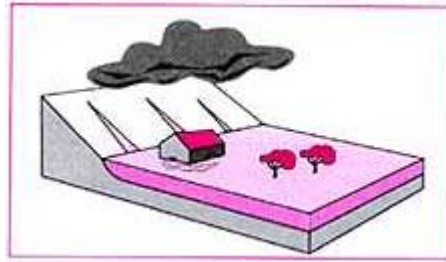


Figure 14 : inondation par stagnation d'eaux pluviales (source : MATE)

#### 4.2.2 Débordement de cours d'eau

Suite à des pluies violentes ou durables, l'augmentation du débit des cours d'eau peut être telle que ceux-ci peuvent gonfler au point de déborder de leur lit, pour envahir des zones généralement de faible altitude et de faible pente (cours aval des rivières).

Les dégâts peuvent être très élevés et surtout le risque de noyade existe (en particulier, lors de franchissements de gués lors de l'arrivée de l'onde de crue).

Ils peuvent être de deux types :

- Inondation par débordement direct ;
- Inondation par débordement indirect.

##### 4.2.2.1 Inondation par débordement direct

C'est le cas le plus fréquent. Le cours d'eau sort de son lit mineur pour occuper son lit majeur par submersion de berge ou par contournement d'un système d'endiguement limité.

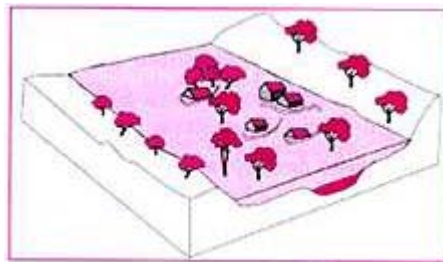


Figure 15 : inondation par débordement direct (source : MATE)

On distingue classiquement deux grandes sortes de phénomènes à l'origine des débordements directs :

- Les **crues océaniques** ou **crues de grande amplitude**, très amples et lentes, ont pour origine des précipitations abondantes réparties sur plusieurs jours ou semaines, gonflent les grands fleuves de plaine et leurs affluents pendant de longues périodes et provoquent un débordement lent. On parle alors d'inondations fluviales. Cependant, sur les petits affluents des grands fleuves ou dans les parties les plus en amont du cours, les montées d'eau sont susceptibles d'être plus rapides.
- Les **crues torrentielles**, rapides et violentes, quasi imprévisibles, caractéristiques des petits cours d'eau essentiellement de la façade méditerranéenne et en montagne sont provoquées par des précipitations d'origine orageuse, localisées et intenses, réparties sur

quelques heures ou une ou deux journées. Ce type d'inondation est décrit en détail au paragraphe 4.2.5.

Ces catégories sont très générales : les temps de propagation, les difficultés de prévision (et donc d'alerte), la violence des phénomènes ne sont pas toujours identiques pour chaque catégorie. Etre en climat océanique ne signifie pas forcément que les inondations menaçant le site étudié surviennent très lentement et sans violence. Il est donc important de chercher à apprécier les caractéristiques locales de la submersion le plus précisément possible.

#### 4.2.2.2 Inondation par débordement indirect

Il peut se produire par remontée de l'eau dans les réseaux d'assainissement ou eaux pluviales, par remontée de nappes alluviales (syphonage), par la rupture d'un système d'endiguement ou autres ouvrages de protection.



Figure 16 : inondation par débordement indirect (source : MATE)

Il s'agit de phénomènes difficiles à prévoir, surtout lorsqu'ils découlent du mauvais fonctionnement du réseau en période de crue : dysfonctionnement ou dimensionnement insuffisant des moyens de relevage des eaux usées vers la rivière de crue ; absence ou fonctionnement défectueux des ouvrages empêchant l'intrusion des crues dans le réseau. Ils sont surtout connus lorsque le site les a subis par le passé.

#### 4.2.3 Rupture d'ouvrages ou d'embâcles

Dans le cas des rivières endiguées, l'inondation survient brutalement soit par surverse (débordement au-dessus de la digue), soit par rupture de digue.

Une rupture d'endiguement peut provoquer l'entrée d'un mur d'eau de plusieurs mètres de haut, progressant à l'intérieur de la zone endiguée à une vitesse de l'ordre de 3 à 4 km/h, ce qui ne laisse généralement aucun délai d'intervention, sinon éventuellement pour évacuer in extremis la population.

Un embâcle consiste en l'**obstruction d'un cours d'eau** par la constitution d'une digue naturelle entraînant une retenue d'eau importante. La digue peut être constituée par des éléments solides arrachés à l'amont et charriés par le cours d'eau ou provoquée par un glissement de terrain.

La lame déversante et l'affouillement de la masse obstruant le cours d'eau provoquent la rupture brutale de la digue, une augmentation brusque du courant, ainsi que la propagation d'une onde de crue destructrice, onde de crue d'autant plus importante que le volume de la retenue et la hauteur de la digue avant sa rupture étaient importants. L'eau peut alors emporter des voitures, des caravanes et, à plus forte raison, des piétons.

Une rupture d'embâcle peut se produire plusieurs jours après une période de pluies exceptionnelles ou l'apparition d'un mouvement de terrain.

#### 4.2.4 Ruissellement en secteur urbain

En secteur urbain, des orages intenses (plusieurs centimètres de pluie par heure) peuvent occasionner un très fort ruissellement (peu d'infiltration à cause des terrains devenus imperméables car goudronnés), qui va saturer les capacités du réseau d'évacuation des eaux pluviales et conduire à des inondations aux points bas (exemple : Nîmes, 1988).

C'est un phénomène extrêmement localisé, intense, rapide et éphémère mais les eaux accumulées dans les points bas peuvent stagner plus longtemps.

Ce phénomène s'observe dans le cas de configurations particulières : versants à forte pente et/ou très imperméabilisés, petits cours d'eau très artificialisés, réseau d'assainissement sous-dimensionné et/ou topographie plane ou en cuvette, sol gelé...

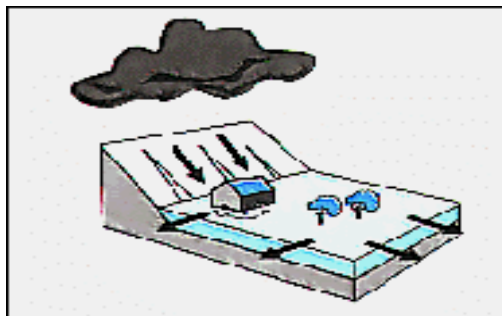


Figure 17 : ruissellement en secteur urbain (source : MATE)

#### 4.2.5 Crues torrentielles

Lorsque des pluies abondantes et brutales se produisent dans le bassin versant d'un cours d'eau (qui n'est pas toujours un torrent), son débit augmente d'une façon importante. En raison de la forte pente, l'eau se charge en matériaux solides tels que sables et cailloux de tailles variées que le cours d'eau transporte vers l'aval.

Fréquemment, par suite de la forme du lit (rétrécissements dus à la présence d'ouvrages tels que ponts, buses..) ou par suite de la présence d'obstacles tels que des troncs d'arbres, ordures ménagères dans certains cas, le lit s'obstrue et le torrent déborde en causant des dégâts dans le voisinage, en détruisant les habitations et les installations occupant le lit majeur. La montée des eaux est rapide et brutale. Plus le relief sur lequel l'orage éclate est marqué, plus la concentration des eaux est foudroyante et importante, ce qui confère au cours d'eau la capacité de transporter toutes sortes de matériaux, rendant les torrents encore plus redoutables. On parle alors de **crues éclairs** qui constituent le risque humain le plus grand.

Les crues torrentielles sont donc des phénomènes à cinétique rapide qui se rencontrent dans les zones montagneuses, mais aussi sur des rivières alimentées par des pluies de grande intensité (pluies cévenoles ayant provoqué notamment le débordement de l'Ouvèze et l'inondation de Vaison-la-Romaine, Bedarrides...).

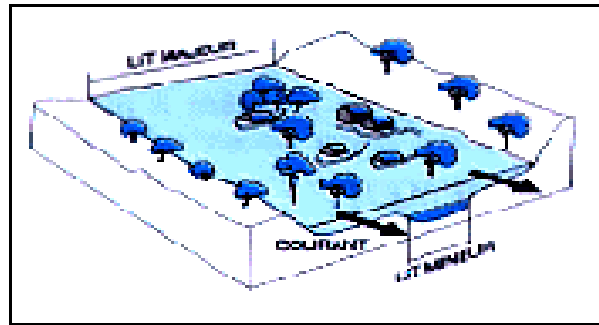


Figure 18 : crue torrentielle (source : MATE)

Dans certains cas, heureusement assez rares, il se forme une **lave torrentielle**. Celle-ci survient en général pendant des orages ou après de longues périodes de pluie, et lorsque le terrain comprend des matériaux meubles.

Il ne s'agit plus d'un simple transport solide comme précédemment mais de l'écoulement d'une masse boueuse et rocailleuse considérable qui peut atteindre des vitesses allant de 1 à 10 m/s et avoir un très grand pouvoir abrasif.

Des écoulements de type lave torrentielle ont un pouvoir destructeur plus important qu'une crue torrentielle de débit équivalent, en raison, essentiellement, de la quantité des matériaux charriés ainsi que de la densité du fluide qui les transporte.

La lave torrentielle peut survenir le long d'une rivière lorsque :

- son bassin versant présente une partie sommitale vaste, dans des zones à fortes pentes,
- elle traverse des zones présentant un aléa mouvement de terrain affectant des formations géologiques particulières, peu cohérentes et présentant une quantité importante de matériaux fins.

Un cas particulier de lave torrentielle est celui des lahars, liés à une crise volcanique, qui correspondent à une mobilisation par les cours d'eaux, à partir des pentes supérieures du volcan, de matériel d'origine primaire (cendres, blocs) ou secondaire (matériel altéré).

#### 4.2.6 Submersion des zones littorales ou lacustres

Les submersions marines sont des inondations temporaires de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques (forte dépression et vent de mer) et marégraphiques (marées de tempête, raz-de-marée) sévères provoquant des ondes de tempête. Elles envahissent en général des terrains situés en-dessous du niveau des plus hautes mers, mais aussi parfois au-dessus si des projections d'eaux marines franchissent des ouvrages de protection.

Les submersions sont dues :

- à la rupture ou à la destruction d'un cordon dunaire à la suite d'une érosion intensive, les eaux marines pouvant ainsi véhiculer d'importantes quantités de sédiments et créer des « épandages de tempête » ;
- au débordement ou à la rupture de digues ou d'ouvrages de protection, ou encore à leur franchissement exceptionnel par des « paquets de mer », ceci pouvant entraîner des projections de sable et de galets aux effets dommageables sur les fronts de mer urbanisés ;
- à des vagues de forte amplitude provoquées par des glissements sous-marins (en

particulier sur la façade méditerranéenne).

Les submersions sont en principe de courte durée (de quelques heures à quelques dizaines d'heures, exceptionnellement quelques jours dans les marais maritimes comme aux Bas-Champs de Cayeux dans la Somme), en raison de leur origine. Elles se traduisent par l'invasion par des eaux salées particulièrement agressives.

Si à une **surcôte** s'ajoute l'élévation du niveau de la mer, les conséquences peuvent être graves. En effet, on estime généralement que, depuis plus de 100 ans, l'élévation du niveau moyen des mers est d'environ 1,2 – 1,3, voire 1,5 mm/an. Cette élévation raccourcirait la période de retour des inondations catastrophiques.

### 4.3 LES PARAMETRES D'UNE INONDATION

L'augmentation de **débit** d'un cours d'eau entraîne celles de la **vitesse d'écoulement** d'eau et de la **hauteur** du plan d'eau au point considéré.

La courbe des débits en un point est appelée **hydrogramme**.

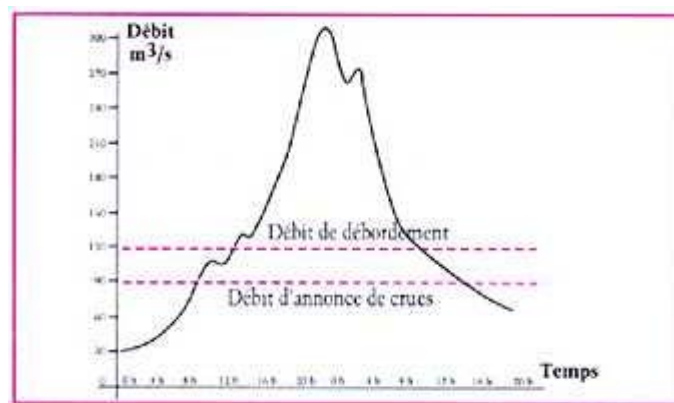


Figure 19 : hydrogramme (source : MATE)

La **laisse** d'inondation est la trace laissée par le niveau des eaux les plus hautes : les dégradations sont fonction de la durée, de la hauteur de submersion et de la vitesse d'écoulement.

Grâce à l'analyse des **crues historiques** (dates, secteurs concernés, débits, laisses...), on procède à une classification des crues en fonction de leur **fréquence** (probabilité qu'un événement a d'apparaître chaque année ou comme le nombre moyen d'événements similaires se produisant pendant une période donnée à un endroit donné). A l'inverse, la **période de retour** est l'intervalle moyen de temps séparant des événements similaires (crues d'intensité comparable, en débits ou hauteurs, ou en couple débit-hauteur), lorsqu'on observe les événements à l'échelle de plusieurs siècles. Ainsi, la **crue centennale** est une crue de forte amplitude qui, chaque année, a une probabilité sur cent de se produire (crue dont le débit atteint le niveau A sur la figure 19). La crue trentennale est une crue qui a une probabilité sur trente de se produire (les crues dont le débit atteint le niveau B sur la figure 19).

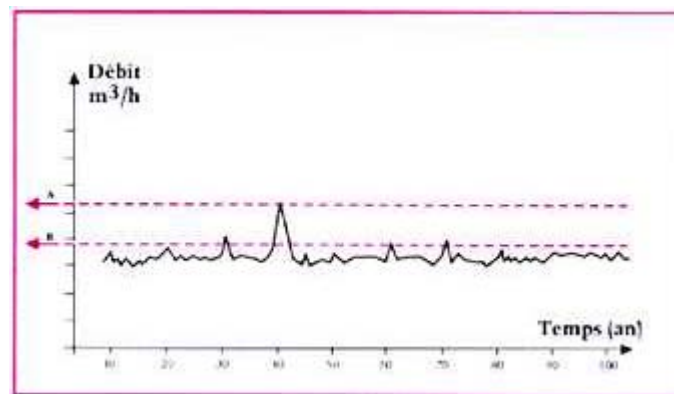


Figure 20 : fréquence des crues (source : MATE)

Ces paramètres peuvent varier de façon importante en fonction des caractéristiques géomorphologiques du site : bassin versant, couvert végétal, qualité du sol (terre, pavés, asphalte...).

#### 4.4 L'ALEA

Le Guide pour la Conduite des Diagnostics des Vulnérabilités aux inondations pour les Entreprises Industrielles propose la définition suivante de l'aléa :

" Le terme d'aléa s'applique au phénomène physique à l'origine du sinistre, ici l'inondation. Il se caractérise par plusieurs paramètres hydrauliques qui expliquent la capacité plus ou moins destructrice de l'inondation. Il se caractérise également par sa probabilité d'apparition appelée aussi période de retour. "

Ce même guide propose de retenir trois grands types d'aléas :

- L'inondation avec des hauteurs d'eau moyennes de quelques dizaines de centimètres, pouvant localement dans des points bas ou des lieux d'accumulation, atteindre ou dépasser le mètre. Cette inondation provient soit d'un débordement de faible ampleur, soit d'un refoulement ou dysfonctionnement de réseau, soit d'une remontée de nappe. Son apparition n'est pas brutale ; elle se déroule sans vitesse de courant marquée, sinon parfois lors de la décrue pour les débordements de cours d'eau.
- L'inondation de plaine avec des hauteurs d'eau supérieures ou égales au mètre : les eaux arrivent plutôt lentement, la crue a été prévue et la zone inondable peut être appréciée ; les hauteurs de submersion peuvent atteindre plusieurs mètres dans les cas les plus graves et la durée de submersion peut dépasser plusieurs jours. La vitesse peut être marquée dans les zones basses qui servent d'exutoire naturel.
- L'inondation rapide par crues torrentielles, par ruissellement pluvial urbain en site à forte pente, par rupture d'ouvrage proche du site : les eaux arrivent brutalement sur le site, avec de grandes capacités de destruction en raison des vitesses du courant et du transport solide que ces vitesses permettent ; les hauteurs d'eau peuvent être très variables ; la prévision est difficile ou impossible. Le comportement des flux est souvent aléatoire.

## 5. LES MOUVEMENTS DE TERRAIN

---

### 5.1 DEFINITION

Un **mouvement de terrain** est un déplacement plus ou moins brutal du sol ou du sous-sol déstabilisé par des sollicitations naturelles ou artificielles sous l'effet de la pesanteur. Il est fonction de la nature et de la disposition des couches géologiques.

L'action de la mer, la fonte des neiges ou une pluviosité anormalement forte, un séisme, sont autant de phénomènes naturels pouvant être à l'origine d'un mouvement de sol ou du sous-sol.

L'action de l'homme peut aussi être un facteur déclenchant ou aggravant, en modifiant les conditions du milieu naturel par la déforestation, le terrassement, l'exploitation de manière inconsidérée des matériaux ou des réserves aquifères...

L'expression générique « mouvements de terrain » regroupe plusieurs types de phénomènes d'instabilité des terrains, variables en fonction du mécanisme mis en jeu (évolution de l'instabilité, vitesse de mouvement durant la phase d'instabilité majeure, surface de rupture, désorganisation des terrains...).

On distingue deux grandes familles : les mouvements lents et continus et les mouvements rapides, quasi-instantanés et discontinus. Cependant, la distinction n'est pas toujours nette entre ces deux types de mouvements. Un mouvement lent et continu peut, sous certaines conditions, s'accélérer et aboutir à une rupture brutale. C'est fréquemment le cas des glissements.

### 5.2 LES MOUVEMENTS LIES A LA PRESENCE D'UNE CAVITE NATURELLE OU ARTIFICIELLE

#### 5.2.1 Les différents types de cavités

Les cavités susceptibles de créer des affaissements ou des effondrements peuvent être de natures différentes :

- les carrières et les mines ;
- les autres ouvrages souterrains anthropiques (tunnels, sapes de guerre...) ;
- les cavités naturelles.

La description de ces différentes cavités est reprise dans les paragraphes ci-dessous.

##### 5.2.1.1 Les carrières et mines

Les carrières résultent de l'exploitation intensive par les siècles passés de calcaire, de craie, de gypse, d'ardoise et les mines de l'exploitation du sel, du charbon...

La typologie des carrières souterraines repose sur la grande diversité des méthodes d'exploitation utilisées décrites ci-après. Ces dernières dépendent des conditions topographiques, géologiques et géotechniques du site ainsi que des caractéristiques mécaniques du matériau extrait. Ces conditions permettent d'exploiter jusqu'à un certain taux, appelé « taux d'exploitation » ou « **taux de défruitement** », qui correspond au pourcentage des vides laissés au sein de la couche. Ce taux est généralement compris entre 60 et 80 % avec des valeurs plus exceptionnelles de 90 à 95 %.

Les différents types d'exploitation sont les suivantes :

- **l'exploitation par galeries** : « filantes » ou en rameaux ;



- **l'exploitation par chambres et piliers abandonnés** : c'est la méthode d'exploitation la plus généralement utilisée et la plus ancienne. L'exploitation consiste à laisser des petits piliers, dont la forme et l'alignement sont d'autant plus géométriques que les exploitations sont plus récentes. Dans ce dernier cas les piliers réguliers et de section aussi égale que possible sont répartis de façon soit orthogonale, soit parfois décalés en quinconce pour assurer une meilleure stabilité du toit en présence de fractures ;
- **l'exploitation par hagues et bourrages** : il s'agit d'une méthode par dépliage intégral qui ne semble avoir été appliquée qu'à partir du XVI<sup>ème</sup> siècle uniquement en région parisienne et dans la région de Reims, dans des carrières de calcaire grossier. La stabilité du toit à proximité du front d'extraction, encore appelé front de masse, était assurée dans un premier temps par des empilements de moellons non liés entre eux appelés « piliers à bras », ensuite par un remblaiement (bourrage) à l'aide de déchets d'exploitation ou de matériaux d'apport. Les zones remblayées étaient délimitées et cloisonnées par des murets en pierres sèches appelés « hagues » ; ces hagues encadrent les cheminements appelés « rues de service » qui relient le front de masse à l'entrée de l'exploitation. Pour pallier localement à une stabilité jugée très précaire, un pilier de section importante appelé « étai de masse » était maintenu en place. Ainsi, ne laissant aucun pilier en arrière du front de taille, elle permet une extraction de la quasi-totalité de la couche ;
- **l'exploitation par foudroyage ou affaissement dirigé** : comme la méthode par hagues et bourrages, il s'agit d'une méthode de dépilage intégral dont la suppression des piliers résiduels est réalisée par un torpillage à l'explosif. Les opérations bien menées conduisent à une suppression pratiquement totale des vides, mais les réajustements de terrains de couverture déconsolidés entraînent inévitablement des tassements différés de la surface qui peuvent subsister longtemps après l'exploitation ;
- **l'exploitation par puits et chambres de type « catiches ou bouteilles »** ;
- **l'exploitation par chambres** : technique particulière des ardoisières.

Les roches généralement exploitées et qui, de par leurs caractéristiques mécaniques ou chimiques peuvent être à l'origine d'affaissement sont notamment la craie, les calcaires, le gypse, le charbon et le sel.

Les **calcaires** se présentent sous forme de bancs de résistance ou d'épaisseur extrêmement variables, qui sont exploités pour la construction (pierres de taille) ou la fabrication du ciment. Les qualités mécaniques du calcaire sont généralement supérieures à celles de la craie. Certains faciès, notamment les calcaires tendres, peuvent cependant s'en rapprocher. Les carrières de calcaire n'ont pas nécessairement été toutes exploitées en souterrain, dans la mesure où la topographie ou l'absence de recouvrement a permis de l'éviter.

Les carrières de calcaire sont le plus souvent exploitées selon la méthode classique des chambres et piliers, mais aussi par puits bouteilles (catiches de la craie en région Lilloise) ou par puits et chambres.

La dimension de l'exploitation peut atteindre, pour la méthode en chambres et piliers, et dans les secteurs favorables, plusieurs hectares. Elle peut avoir été pratiquée sur plusieurs niveaux superposés, chaque niveau faisant 2 à 3 m de haut (secteur de Loudun par exemple). Les exploitations en bouteille ont une hauteur variable de 7 à 15 m et une surface de 1 000 à 10 000 m<sup>2</sup>.

La **craie** (roche calcaire) a été utilisée comme amendement, pour la chaux (marnières de Normandie) et, pour certains bancs de craie peu gélive, comme pierre de construction. Ce

matériau a des qualités mécaniques médiocres qui entraînent de fréquents effondrements dans les cavités.

Le **gypse** et les roches encaissantes, possède des qualités mécaniques assez médiocres, qui se dégradent dans le temps. Les conséquences de cette mauvaise tenue peuvent être aggravés par l'extension rapide de la dissolution du niveau. Ceci conduit à de nombreux effondrements (§ 5.1.3.1).

L'exploitation souterraine de **charbon** s'accompagne le plus souvent de phénomènes d'affaissements qui peuvent avoir des effets dommageables aux constructions et installations de surface. L'abaissement de la surface du sol est surtout néfaste dans les régions où la nappe phréatique est très proche du sol ; le relèvement de cette nappe crée des étangs dans les campagnes ou des infiltrations d'eau dans les caves et les sous-sols. L'affaissement modifie les pentes et peut même les inverser, ce qui est grave pour les canalisations d'eau, les canaux, les collecteurs d'égouts dans les villages, les voies ferrées, en particulier dans les gares de triage. Les déformations se transmettent aux bâtiments par pression des terrains sur les murs verticaux enterrés et par frottement du sol sur les fondations. La nature des terrains intervient pour réduire ou pour aggraver les effets des extensions ; les cassures sont larges quand la craie est proche du sol, amorties quand un sol plastique le recouvre. Les allongements ont une influence désastreuse sur les canalisations d'eau, de gaz, et les sols durs répercutent directement sur les immeubles les compressions qu'ils subissent.

L'exploitation du **sel** par dissolution avec de l'eau envoyée sous pression provoque, à l'aplomb de chaque puits de forage, l'apparition d'une cavité (« chambre ») qui s'agrandit, rejoint ses voisines, et leur coalescence constitue ce que les exploitants appellent un « canal » où l'eau circule plus ou moins forcée et sous pression. Mais, outre les compresseurs et les pompes, chaque ligne est équipée d'un appareil qui enregistre en continu les pressions de la nappe et les changements de pression avertissent des mouvements de terrain.

Très lié à l'influence de la profondeur, l'affaissement est symptomatique des exploitations minières (mines profondes), sauf en présence de terrains au comportement plastique comme pour certaines crayères ou argilières.

#### 5.2.1.2 Les autres ouvrages souterrains d'origine anthropique (tunnels, sapes de guerre...)

De tout temps, les hommes ont creusé le sous-sol à des fins de sécurité ou de stockage. On trouve ainsi de très nombreuses cavités et galeries souterraines abandonnées et souvent oubliées, reliant les caves des villages et le château.

Affectant des surfaces importantes, significatives à l'échelle de l'analyse à 1/1 500 000, il faut mentionner plus particulièrement les sapes de guerre de 14 - 18 (le Nord, le Pas-de-Calais, la Somme, l'Oise et la Marne en sont affectés). Il s'agit des ouvrages creusés de part et d'autre de la ligne de front permettant aux troupes de s'abriter ou de tenter la pénétration des lignes ennemies. Ces ouvrages sont en général creusés dans des zones à topographie plate, et sont constitués par une tranchée de surface, une galerie d'accès inclinée et une chambre ou salle souterraine. Les tranchées ont une profondeur et une largeur de 1 à 2 m. Les galeries accès (1m\*2m) s'enfoncent rapidement en marquant parfois des paliers jusqu'aux salles souterraines dont la taille est variable et qui constitue souvent un réseau relié par des galeries.

### 5.2.1.3 Les cavités naturelles

Elles peuvent être formées :

- soit par **dissolution** de roches solubles :

- a) la dissolution des **roches carbonatées** ou **karstification**. Les roches affectées par ce phénomène sont la craie et les calcaires.

La **craie** est une roche sédimentaire marine dont le composant principal est le carbonate de calcium. Elle correspond approximativement à l'extension du Crétacé Supérieur, et est donc largement représentée dans le Bassin Parisien et les Charentes.

Le **calcaire** : compte tenu de sa faible solubilité, le développement des cavités naturelles dépend du temps d'exposition et de la sensibilité.

La circulation d'eaux souterraines, chargées en gaz carbonique dans des terrains moyennement solubles comme les roches carbonatées a créé la formation d'un réseau de cavités, appelé **karst**. Ces circulations d'eau se conjuguent avec la présence de rivières souterraines qui donnent naissance à des galeries.

En surface, les formes typiques de modelé karstique qui affectent le relief sont les suivantes :

- les **lapiez**, sortes de cannelures ou de rigoles creusées à la surface des plateaux calcaires et séparées par des arêtes tranchantes ;
- les **dolines**, qui matérialisent des dépressions circulaires de dimensions très variables dont le fond est tapissé d'argile rouge, résidu de la dissolution du calcaire ;
- les **avens** ou **gouffres**, qui sont des cheminées de diamètre très variable s'ouvrant en profondeur. Elles résultent de l'effondrement des terrains situés au-dessus de la cavité souterraine.

- b) la dissolution des **roches évaporitiques** : elle est plus rapide que celle des roches carbonatées. Les roches concernées sont le gypse et le sel gemme.

Le **gypse** est un sulfate de calcium hydraté très soluble dans l'eau, formé par évaporation dans des milieux lagunaires. Les périodes géologiques qui ont favorisé son dépôt sont principalement le Trias et l'Eocène. Au Trias, les niveaux de gypse sont accompagnés d'argiles, et à l'Eocène (Ludien) de marnes. Toutes les formations de gypse comprenant localement des intercalations argileuses et marneuses sont le siège de phénomènes de dissolution naturelles importantes. Sa dissolution par les eaux souterraines donne naissance à des cavités, en particulier dans les niveaux ou amas gypseux localisés dans des terrains encaissants de qualité mécanique médiocre. Les exemples de ce type de formation sont nombreux : gypse ludien (Eocène) en région parisienne se présentant en bancs superposés appelés masses, dépôts triasiques (marnes et argiles bariolées) en Lorraine et en Alsace, dans les Alpes, le Sud du Ventoux, la Provence, le Sud des Causses, le Jura, le Nord des Pyrénées et les Landes qui n'ont que peu fait l'objet d'exploitations souterraines.

Le **sel gemme** est particulièrement sensible aux phénomènes de dissolution, en particulier le sel du Trias du Jura et de l'Oligocène d'Alsace. Les conséquences en surface sont rares en raison de la relativement plus grande profondeur des gisements.

- Les cavités naturelles peuvent également être formées par érosion mécanique dans les sols hétérogènes à granularité étendue, c'est le phénomène de **suffosion**.

Dans un sol de granularité étendue, c'est-à-dire formé de grains de taille variée (ex. : blocs, galets, sables, limons, argiles), il peut y avoir entraînement des particules fines (argiles, limons, sables) par les circulations d'eau souterraine dans des chenaux préférentiels. Les plus gros éléments, formant le squelette, se trouvent peu à peu « entourés de vide » et s'affaissent. Ce phénomène se manifeste dans des formations géologiques superficielles (éboulis anciens, alluvions, moraines...).

L'épaisseur des terrains susceptibles d'être affectés est de l'ordre de quelques dizaines de mètres. Les vides étant généralement de petite taille, l'affaissement n'est visible que si le phénomène est relativement superficiel. Dans le cas contraire, le foisonnement l'empêche de déboucher en surface.

### 5.2.2 Les mouvements lents et continus : les affaissements

Ces mouvements, sont liés à l'existence et à l'évolution de cavités souterraines dont l'effondrement est amorti par le **comportement souple des terrains superficiels**. Ils consistent donc en **un abaissement lent et continu du niveau du sol, sans rupture apparente du sol et se traduisent par une dépression topographique, parfois en cuvette**.

La Figure 21 ci-après illustre le mécanisme d'affaissement. Considérée en coupe, cette cuvette se caractérise généralement par un fond plat, correspondant à l'affaissement maximal ( $A_{max}$ ), et des bords fléchis sous forme d'un S, sans qu'apparaissent de fractures. Cette courbe en S est appelée courbe de bord de taille.

La composante du mouvement est essentiellement verticale et prépondérante au milieu de la cuvette, mais les déplacements horizontaux associés, résultant des efforts de traction ou de flexion, sont susceptibles d'engendrer des effets latéraux en bordure de cuvette, très dommageables pour les structures.

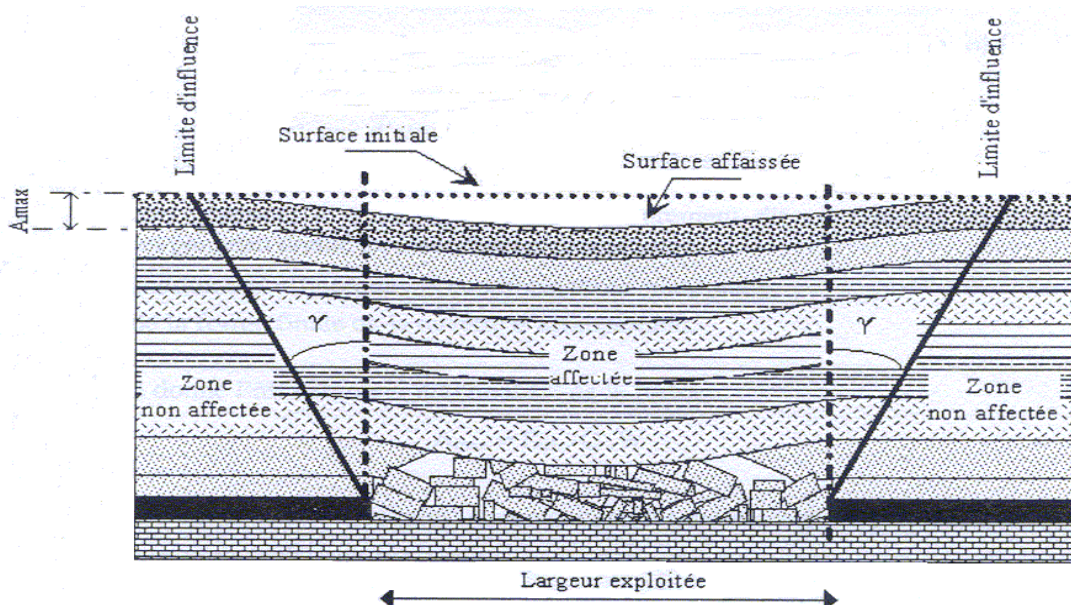


Figure 21 : Affaissement d'une succession de couches de terrains meubles (source : INERIS)

Le mouvement peut être souple ou bien se faire par une succession de mouvements du sol plus brutaux par éboulements successifs des bancs du toit et du recouvrement. Dans ce

dernier cas, le **coefficient de foisonnement** des terrains éboulés ainsi que la **profondeur** sont des facteurs essentiels dans l'évolution des montées de voûte et son arrêt par autocomblement de la cavité.

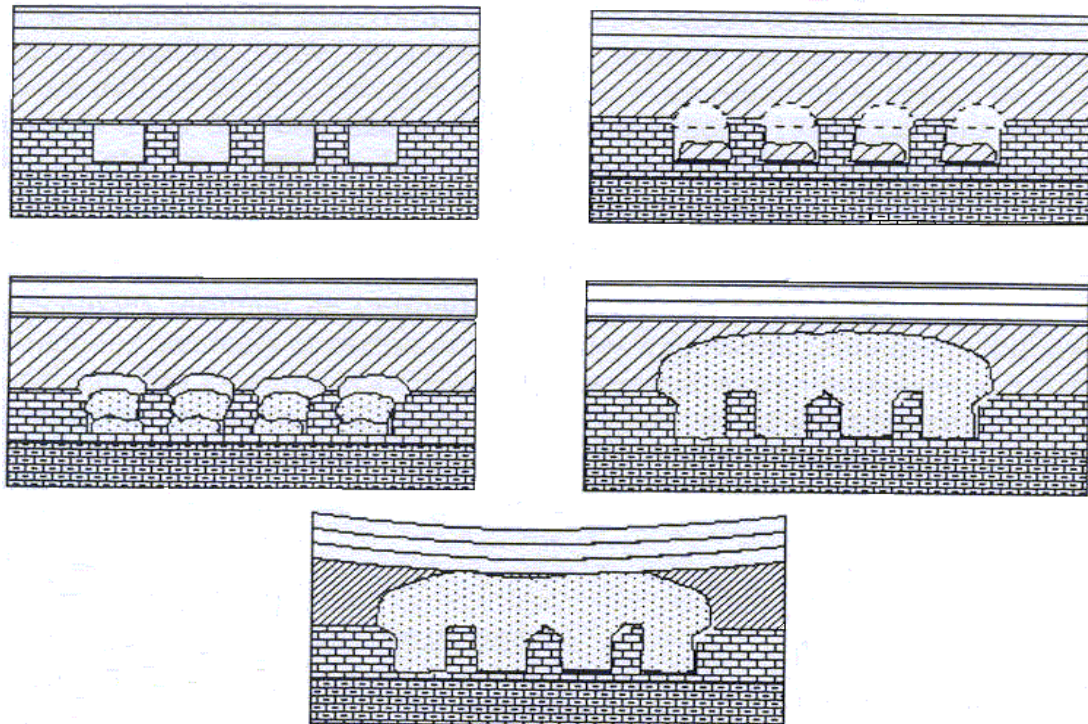


Figure 22: Autocomblement de montées de voûte grâce au foisonnement  
(d'après Delbecq, 1977)

### 5.2.3 Les mouvements rapides et discontinus : les effondrements

Comme les affaissements, ces mouvements sont également liés à l'existence et à l'évolution de cavités souterraines naturelles ou anthropiques précédemment inventoriées. Mais ils se manifestent par des **déplacements verticaux instantanés de la surface du sol par rupture brutale et discontinue de ces cavités préexistantes**.

En France, les exemples de dommages liés à ce type de mouvement sont nombreux (gypse de la Région parisienne, karst de Provence, carrières de Gironde, mines de fer de Lorraine, sel de Poligny-Jura).

L'effondrement résulte de la rupture des appuis (piliers, bords du massif) ou du toit de la cavité souterraine préexistante.

Ces ruptures laissent apparaître des escarpements plus ou moins verticaux caractérisés par des formes bien connues et diverses : fontis (excavations grossièrement cylindriques), dolines, cuvettes d'effondrement...

On distingue globalement deux types d'effondrement :

- l'effondrement localisé ;
- l'effondrement généralisé.

### 5.2.3.1 L'effondrement localisé

Le plus souvent, il se manifeste sous la forme d'un **fontis** (ou cloche d'effondrement) observable en surface par un entonnoir ou cratère dont le diamètre et la profondeur peuvent varier de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres. Les fontis se développent préférentiellement au surplomb des carrefours de galeries ou des piliers ruinés car ce sont les endroits où la surface portante du toit non soutenue par des piliers est la plus importante et donc les risques de chutes de toit les plus élevés. De plus, c'est la présence d'une couverture constituée de roches peu résistantes ou meubles (sables, marnes) qui permet à l'instabilité initiale de se propager jusqu'au jour et de donner naissance à un fontis.

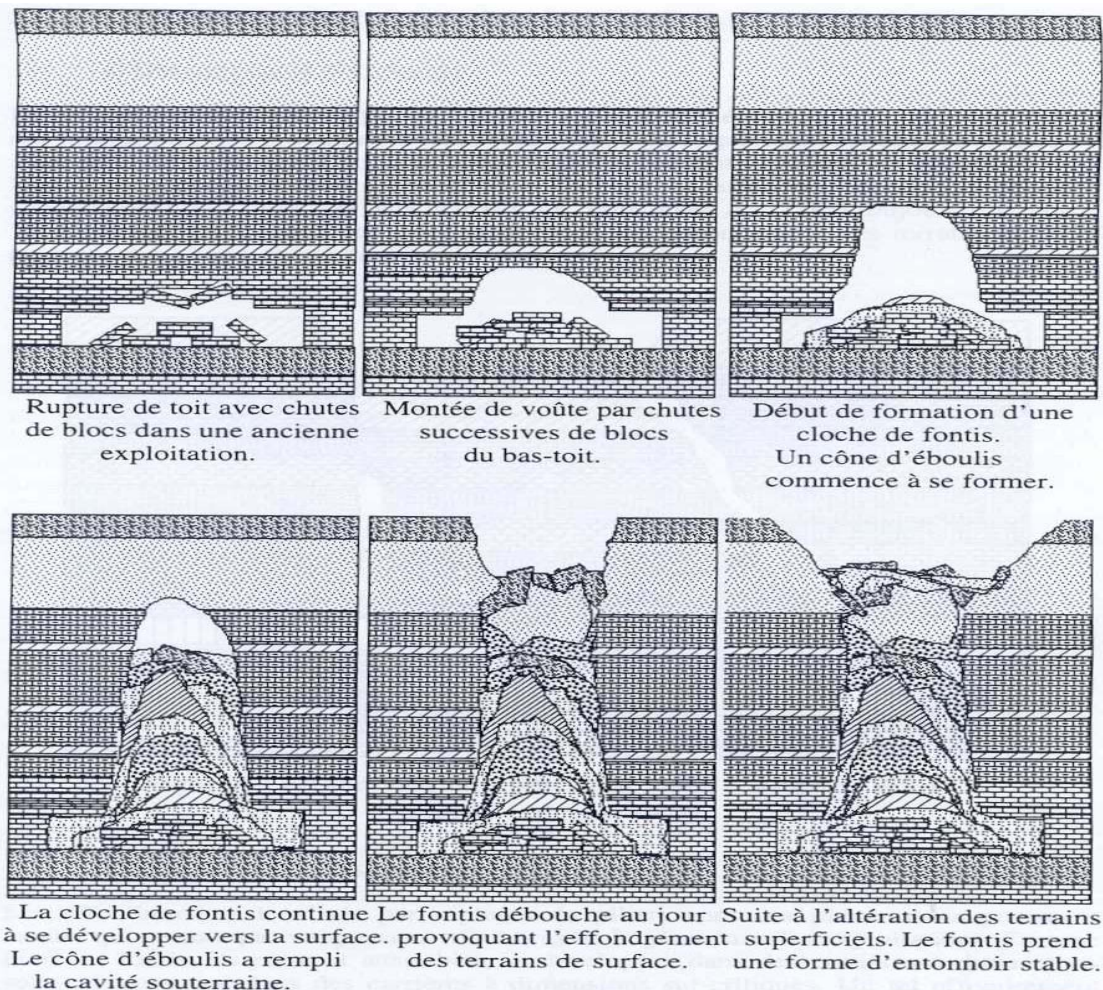


Figure 23 : Différentes phases de l'évolution d'un fontis (d'après Vachat, 1982)

En effet, comme le montre cette figure, les effondrements de galerie, proches de la surface ou même parfois situées plus en profondeur, ne se font pas toujours par rupture directe de leur voûte, mais par propagation de petits effondrements et chute de blocs du toit et des parois, souvent le long d'une fracture. L'ouverture en surface, d'abord étroite, peut s'élargir ultérieurement ; elle s'ouvre sur des vides qui s'élargissent vers le bas, en forme d'entonnoir

Les piliers de carrières, souvent sous-dimensionnés, supportent mal les déformations et peuvent transmettre celles-ci au haut-toit résistant jusqu'à ce qu'il atteigne sa résistance limite et se rompe. Leur écroulement aggrave les conséquences du fontis et les bords de la

zone effondrée présentent le plus souvent des plans d'arrachement verticaux.

### 5.2.3.2 L'effondrement généralisé

Contrairement au fontis, il s'agit d'un phénomène violent et spontané consécutif à une rupture d'extension importante des terrains surincombants. Il affecte largement la surface sous forme d'un cratère d'effondrement à fond plat, bordé par des fractures subverticales de cisaillement dont le rejet peut atteindre plusieurs mètres.

Lorsque la violence du phénomène est particulièrement grande et s'accompagne d'une importante libération d'énergie sous forme d'ondes sismiques, on parle d'effondrement spontané accompagné de phénomènes dynamiques.

Les effondrements généralisés se produisent principalement là où l'épaisseur du recouvrement est la plus forte, la largeur exploitée très supérieure à celle-ci (l'aire est alors dite « supercritique »), et le taux de défrètement élevé. La propagation de tels effondrements ne peut être bloquée que par de larges « piliers barrières » (désignés également « piliers barrages » ou par des « étranglements » dans la géométrie d'exploitation qui agissent comme des bords fermes.

### 5.2.3.3 Les facteurs aggravants ou déclenchants

Il existe de nombreux facteurs aggravants, favorisant le phénomène d'effondrement, parmi lesquels :

- la mise en charge hydraulique : de nombreux effondrements surviennent après une longue période pluvieuse, même dans des carrières dont le dimensionnement initial des piliers semblait suffisant.
- l'influence de l'eau : une modification significative de la teneur en eau du milieu peut par infiltration d'eaux superficielles ou battements de la nappe phréatique, altérer considérablement la résistance mécanique du matériau.
- le fluage et l'influence du temps : les roches n'ont pas un comportement élastique parfait. L'expérience montre qu'une roche soumise à une contrainte constante sur une longue durée n'encaisse pas une déformation définitive instantanée mais continue à se déformer progressivement au cours du temps.
- l'activité sismique : elle est à prendre en compte, même si ses manifestations sont rares et généralement de faible amplitude.
- les actions anthropiques : les activités de surface (construction, terrassement, dépôts de remblais, circulation, transports, etc.) engendrent des surcontraintes, des vibrations ou des ébranlements susceptibles d'accélérer par surcharge statique ou dynamique le processus naturel de dégradation des cavités.  
Par ailleurs, les affouillements ou déboisements de la surface peuvent provoquer des modifications défavorables du régime d'écoulement des eaux superficielles voire souterraines. C'est également le cas des infiltrations d'eau parasite (fuite de canalisations, absence de réseau d'assainissement collectif, etc.).

## 5.3 LES AUTRES MOUVEMENTS

### 5.3.1 Les mouvements lents et continus

La déformation des terrains n'est pas accompagnée de rupture et aucune accélération brutale ne doit être redoutée. Leurs effets sont donc plus ou moins contrôlables. Ils n'induisent généralement aucun risque humain mais peuvent occasionner des pertes

économiques importantes.

Cette première famille regroupe glissements, affaissements (traités ci-avant), tassements et phénomènes de gonflement.

### 5.3.1.1 Glissements

Ces mouvements, au sens large du terme, consistent en un déplacement plus ou moins continu d'un versant instable de montagne ou de colline.

Le mouvement est engendré par l'action de la gravité, de forces extérieures (hydrauliques ou sismiques) ou d'une modification des conditions aux limites.

La masse de matériaux meubles ou rocheux fracturés se détache suivant une ou plusieurs surfaces de rupture par cisaillement qui correspondent souvent à des discontinuités préexistantes, visibles ou non, et de formes diverses.

Selon la géométrie de cette surface de faiblesse, on peut distinguer deux types principaux de glissements :

- **les glissements de type circulaire ou rotationnel** plus ou moins profonds, où la rupture se fait suivant une surface courbe dont la forme exacte, en coupe verticale, n'est jamais connue, et que l'on tend à assimiler pour des considérations théoriques à un cercle ou à une cycloïde. Le mouvement est caractérisé en général par l'existence d'une zone de départ nette et par un bourrelet frontal plus ou moins marqué ; le remaniement interne dépend de la nature des terrains et de l'importance du déplacement. Il se produit en particulier en terrains meubles, dans les roches homogènes à faible cohésion ou très divisées (fréquents dans les marnes et les argiles).
- **les glissements de type plan** qui affectent de préférence la partie superficielle d'un versant et dont le déplacement des matériaux se fait à partir d'une surface plane, en pente (discontinuité lithologique, structurale...).

Ces deux types de mouvements se combinent l'un à l'autre pour donner des glissements quelconques et variés, dont la section verticale de la surface de glissement est de forme irrégulière.

Un glissement se caractérise :

- dans sa partie amont, par des niches d'arrachement ou crevasses, principales et latérales, avec brusque rupture de pente (pente concave) ;
- dans sa partie aval, par un bourrelet de pied (ou frontal) à pente convexe. La poussée exercée par le bourrelet de pied se marque fréquemment par un tracé anormal des cours d'eau en aval ;
- par une surface topographique bosselée (ondulations, dissémination de blocs de forte taille...)



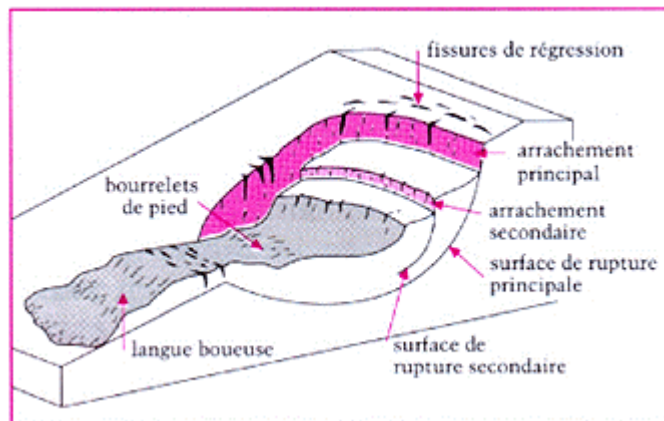


Figure 24 : glissement de terrain (source : MATE)

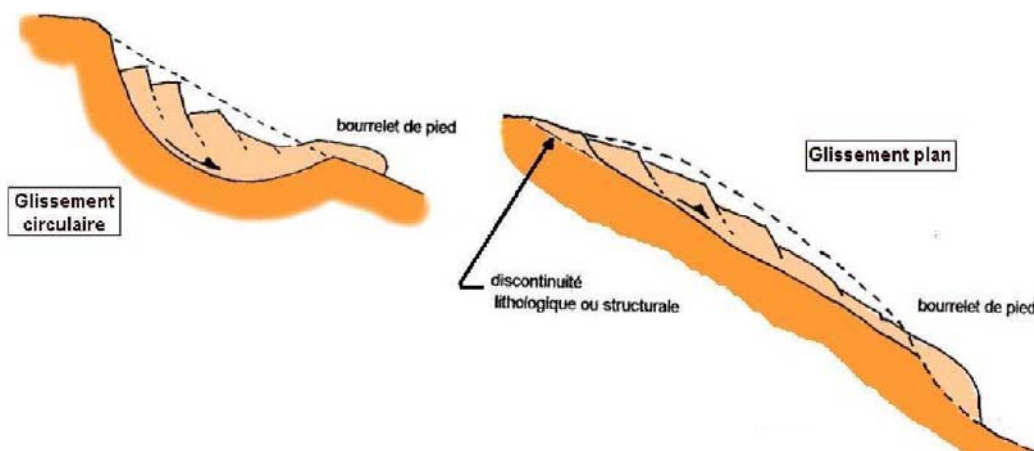


Figure 25 : les différents types de glissements de terrain (source : BRGM)

Des manifestations telles que fissuration des bâtiments, arbres couchés ou inclinés, déformation du réseau routier traversant le glissement sont aussi des critères d'identification de mouvements actifs.

Selon le stade d'évolution du glissement, la désorganisation plus ou moins importante de la masse glissée et l'importance du couvert végétal peut rendre difficile la perception du glissement de terrain.

Lors d'un phénomène de glissement de terrain :

- **les volumes** de matériaux mis en jeu sont extrêmement variables ; ils dépendent de la surface et de la profondeur de la rupture. Ils peuvent être parfois considérables (jusqu'à plusieurs millions de m<sup>3</sup> de roches); on parle alors de glissement de versant.
- **La vitesse de déplacement** de la masse glissée est généralement lente (de quelques mm à quelques dm par an), mais peut cependant s'accélérer brutalement aux mauvaises conditions météorologiques (jusqu'à quelques m ou dizaines de par jour) pour aller jusqu'à la rupture et surtout dégénérer en coulée au contact de l'eau (fortes pluies, fonte des neiges...).
- **L'extension** dépend de la vitesse d'évolution du mouvement. Elle est généralement faible pour les ruptures circulaires et quelconques, et peut être beaucoup plus forte pour des glissements plans, selon le contexte morphologique.

L'apparition d'un glissement de terrain est le résultat de la conjonction de plusieurs facteurs qui peuvent être :

- **permanents**, c'est-à-dire peu ou pas variables dans le temps (nature et propriété mécanique des matériaux, présence de plans de rupture préférentiels, pente de terrains...)
- **semi-permanents**, c'est-à-dire évolutifs dans le temps (teneur en eau des matériaux, érosion en bas de pente, action anthropique...).

Lorsqu'un facteur subit une forte variation dans un laps de temps très court, il peut s'engendrer une déstabilisation du matériau et provoquer un glissement ou réactiver un glissement préexistant. On parle alors de facteur **déclenchant**. Il peut s'agir, par exemple d'un épisode pluvieux exceptionnel (entraînant une saturation en eau et/ou une érosion exceptionnelle), d'une secousse sismique, d'une action anthropique (création de talus routier, tranchée en bas de pente...).

### 5.3.1.2 Tassements

Il s'agit de la **diminution de volume de certains sols très compressibles (vases, tourbes, argiles) sous l'effet de charges appliquées et de l'abaissement du niveau des nappes aquifères par surexploitation.**

Par exemple, un drainage de marais tourbeux peut entraîner un abaissement du niveau de la nappe qui, habituellement, est presque toujours proche de la surface. Cet abaissement conduit, d'une part, à une humidification de la tourbe, à la transformation du biotope et, d'autre part, à son tassement. Outre les répercussions agricoles, ces tassements, qui varient d'une région à une autre selon le climat, le type de tourbe, l'importance du rabattement, peuvent causer des désordres dans les constructions ou les infrastructures, là où des agglomérations sont construites sur des terrains de ce genre, assainis par le drainage (ex. : les Everglades en Floride, le delta du Sacramento en Floride). Ces phénomènes peuvent être de grande extension et affecter des agglomérations entières (Mexico qui, construite sur des alluvions, s'est tassée de 7 mètres depuis le début du siècle par exploitation excessive de la nappe ; Osaka, Bangkok, Venise, Houston avec un tassement de plus de 2 m) ou être plus limitée (tour de Pise). Ils peuvent par ailleurs provoquer des inondations, comme à Bangkok en 1975 et 1978.

Les roches réservoirs, desquelles on retire le pétrole, sont souvent très poreuses, peu résistantes. Leur compaction, par la charge des terrains qui les recouvrent, qui peut atteindre plusieurs mètres et davantage dans le cas de réservoirs épais et superposés, peut se transmettre jusqu'à la surface, sous forme de tassements. Des cas spectaculaires sont connus, par exemple en Californie, où les digues du port de Long Beach ont dû être rehaussées de 9 m, dans les années 50, à la suite de l'affaissement lié à l'extraction dans le champ pétrolifère de Wilmington. Toujours en Californie, les déplacements horizontaux provoqués en surface par l'exploitation du champ d'Inglewood ont été la base des déformations et de la rupture de barrage de Baldwin Hills en 1963. La cuvette d'affaissement de Houston-Gavelston qui atteint plus de 2,5 m de profondeur et 60 km de diamètre est en relation avec le pompage de l'eau et également avec les extractions pétrolières.

Dans certaines conditions géologiques particulières, les répercussions en surface peuvent se faire sentir même quand le glissement se situe à une grande profondeur (comme en Mer du Nord).

### 5.3.1.3 Gonflements-retraits

Ces phénomènes sont **liés au changement d'humidité de certains sols très argileux** (montmorillonites, saponites et autres nontronites) **ou tourbeux** qui sont capables de fixer l'eau disponible mais aussi de la perdre en se rétractant en cas de sécheresse.

Ce risque, qui ne met qu'exceptionnellement en jeu la vie humaine, peut prendre des proportions catastrophiques : la sécheresse, qui a sévit de l'hiver 1988 à l'hiver 1990, a ainsi fait de gros dégâts sur les constructions (murs fendus, dalles disjointes ou cassées, routes déformées, parkings fissurés...). En Angleterre, les dommages s'élèvent à 700 millions d'euros pour l'année 1990. La même année, plus de 200 communes françaises sont déclarées sinistrées.

Les importants changements d'humidité ne sont pas uniquement d'origine climatique ; ils peuvent être provoqués par l'homme quand, par exemple dans les régions semi-arides, les tuyaux de descente des eaux des toits envoient l'eau dans le sol des fondations ou, quand, dans les régions humides, on plante des arbres qui peuvent réduire l'humidité et provoquer une rétraction du sol. Ou encore quand, construisant un parking ou un aéroport, et donc réduisant ou supprimant l'évaporation, on déclenche un gonflement des sols sensibles.

### 5.3.1.4 Les phénomènes d'érosion littorale et fluviale

#### 5.3.1.4.1 Erosion littorale : recul du trait de côte

Les zones littorales sont soumises à un recul quasi-généralisé du trait de côte, c'est-à-dire à un déplacement vers l'intérieur des terres de la limite entre le domaine marin et le domaine terrestre. Il concerne généralement des côtes basses meubles (sables, galets), mais aussi certaines côtes à falaises où se produisent glissements et effondrements.

L'érosion est souvent considérée comme un phénomène lent et progressif, mais ses conséquences peuvent être brutales et dangereuses sous certaines conditions défavorables. En effet, l'évolution du trait de côte se produit par à coups lors de tempêtes. A moyen et long terme, il peut être considéré comme continu et l'on peut parler de taux de recul moyen annuel (inférieur à 0.5 m/an), ce qui donne accès, par extrapolation, à la position prévisible du trait de côte à une période donnée (20 ans, 100 ans ...).

- **L'érosion des falaises** et leur recul résultent d'un processus en partie d'origine maritime et en partie d'origine continentale. La mer et les vagues sapent le pied des falaises dont des pans finissent par s'écrouler, le déséquilibre du versant s'exacerbant. Ces reculs, irréguliers, résultent souvent de la conjonction de fortes tempêtes et de précipitations importantes. Bien souvent, la circulation d'eaux douces dans des roches diaclasées contribue largement à fragiliser la roche, et l'écroulement est le plus souvent d'origine mixte. Si le recul est assez lent en roches dures, il en va autrement en roches tendres (craie, formations de solifluxion périglaciaire, loess...), d'autant plus qu'à la faible résistance primaire des roches s'ajoute l'impact amplifié des circulations d'eaux douces, des eaux d'irrigation des espaces verts ou des eaux usées non reliées à un réseau d'égout, etc.
- **L'érosion des plages** est un phénomène quasi généralisé dans le monde et en France où, chaque année, 800 km reculent de 1 m et 1 000 km reculent de 0,5 m. Il est engendré par un déficit sédimentaire soit naturel, soit artificiel. Si les sources d'approvisionnement sous-marin se sont amenuisées, les sources de sables en provenance des dunes bordières ont été réduites par l'imperméabilisation des surfaces

construites. Les différents ouvrages, construits le plus souvent à des fins touristiques, ont souvent modifié les transits sédimentaires littoraux. Ce phénomène n'est pas à séparer de l'évolution des dunes côtières. Pour en être persuadé, il suffit de recenser les bunkers du mur de l'Atlantique aujourd'hui déchaussés et basculés sur les estrans de l'Atlantique. Les effets des avancées dunaires sont généralement limités mais les volumes de sable mis en jeu peuvent, quand ils sont importants, menacer les biens et exceptionnellement les personnes (« avalanches dunaires »).

#### 5.3.1.4.2 Erosion fluviale

Le lit des rivières alluvionnaires « sauvages », c'est-à-dire non contraintes, est en perpétuel mouvement. L'équilibre morphodynamique ne peut, de ce fait, être appréhendé qu'à une grande échelle temporelle. En permanence, la rivière construit et reconstruit son lit mineur à l'intérieur de son lit majeur. Suivant les cas, la rivière développe des tresses ou des méandres avec une forte dissymétrie entre l'intrados des courbes, où les matériaux transportés sédimentent, et l'extrados où se manifestent de fortes érosions de berges. Le phénomène est plus ou moins cyclique. Les méandres, par exemple, glissent de sorte que des secteurs anciennement soumis à érosion deviendront ultérieurement des secteurs de dépôt de sédiments.

Ces phénomènes, dont les effets peuvent être appréhendés à l'échelle de quelques dizaines d'années, ne sont toutefois pas sans poser des problèmes aux riverains : sapement des terrains bordant la rivière, perturbation des limites administratives quand celles-ci sont sensées suivre l'axe de la rivière. Afin de réduire, voire d'éliminer ces perturbations, de nombreuses rivières sont aujourd'hui contraintes par des endiguements et des protections de berges dans le but d'empêcher toute divagation.

### 5.3.2 Les mouvements rapides et continus

Ces mouvements sont particulièrement dangereux et parfois meurtriers en raison de leur soudaineté.

Il s'agit des effondrements des terrains de surface à l'aplomb de cavités, des éboulements et chutes de blocs de falaises instables, des coulées boueuses et laves torrentielles.

#### 5.3.2.1 Eboulements et chutes de blocs

Ces phénomènes concernent les falaises ou pentes instables.

Ils affectent des matériaux rigides, durs et fracturés et se produisent dans des discontinuités préexistantes (comme les failles). Dans les roches massives comme les granites, la masse est prédécoupée par un réseau de fractures qui sont les seules discontinuités. Dans les roches sédimentaires, à ce réseau de fractures s'ajoute la stratification qui accroît le découpage de la masse rocheuses.

Ces phénomènes résultent de l'érosion (eau, gel-dégel) de falaises ou de pentes abruptes ainsi que de fortes contraintes tectoniques lors de l'orogénèse.

##### 5.3.2.1.1 Eboulement d'une masse rocheuse

Il consiste en la chute soudaine et rapide d'une masse rocheuse se détachant d'une paroi ou d'un versant très raide, qui tombe en se désorganisant et dont les fragments roulent le long de la pente, en s'entrechoquant. Son volume, supérieur à plusieurs centaines de mètres cubes, peut atteindre des dimensions considérables. Dans ce cas, on parle d'écoulement catastrophique (plusieurs millions de mètres cubes et plus), l'extension des matériaux

éboulés est important, la vitesse de propagation est supérieure à 100 km/h et le comportement global des matériaux en mouvement est très différent. La masse s'écroule à l'image d'un fluide et peut aller extrêmement loin.

La masse rocheuse écroulée forme au pied de la falaise ou de la pente un **chaos rocheux**, c'est-à-dire un entassement confus, désordonné, de blocs et de rochers. Mais l'on constate fréquemment que certains blocs, lorsque les conditions topographiques sont favorables, ne sont pas solidaires de cet amoncellement et poursuivent leur chemin plus aval.

#### 5.3.2.1.2 Chutes de pierres et de blocs

Ces phénomènes rapides et événementiels consistent en la chute libre (isolée ou en groupe) ou le roulement au départ depuis un sommet ou une pente, après rupture, de blocs de roches plus ou moins homogènes formés par fragmentation. Ces mouvements proviennent effectivement de l'évolution mécanique et de la dégradation de falaises ou d'escarpements rocheux très fracturés.

Le mouvement peut ensuite se poursuivre par une série de rebonds de hauteur décroissante (dans le cas d'une pente régulière).

Les blocs déstabilisés ont une trajectoire plus ou moins autonome. L'extension du phénomène est donc variable, car la distance parcourue par les blocs rocheux sera en fonction de la taille des blocs, de la raideur de la pente et de l'amortissement des chocs...

L'accumulation de pierres et de blocs qui tombent sporadiquement et individuellement forme un éboulis au pied de la pente, à distinguer du chaos rocheux, conséquence d'un écroulement en masse. Mais il n'est pas toujours facile de dire, en présence d'un amas de blocs éboulés, si ceux-ci sont tombés en une fois ou se sont accumulés au cours du temps.

Les chutes de blocs se caractérisent par une forte désorganisation ou dislocation des matériaux mis en mouvement. Le volume de matériaux mis en jeu est extrêmement variable, de quelques m<sup>3</sup> à quelques centaines de m<sup>3</sup>.

Pour que ce phénomène puisse se produire, un certain nombre de conditions doit être réuni. Il s'agit :

- de l'existence de blocs au sein de la formation massive fracturée ou d'une formation hétérogène présentant une matrice meuble à grains fins,
- de facteurs favorables à la mobilisation des blocs :
  - topographie en falaise ou existence de reliefs rocheux fissurés ou hétérogènes dominant les pentes,
  - orientation favorable des blocs,
  - présence éventuelle d'une formation sous-jacente plus meuble, déformable ou érodable,
  - action mécanique de l'eau (pressions hydrauliques interstitielles).

L'ampleur du phénomène est liée d'une part à la quantité et au volume de blocs mobilisables, d'autre part à la surface et la topographie de l'aire de réception des blocs éboulés.

Facteur aggravant, le phénomène sismique peut généraliser la mobilisation de blocs instables et/ou élargir l'étendue de l'aire de réception, les blocs pouvant parcourir un trajet plus important. De plus, en provoquant leur déchaussement, une secousse sismique peut

provoquer la remobilisation de blocs déjà éboulés et stoppés dans les parties de l'aire de réception présentant une forte pente.

Comme le montre le Tableau 2 ci-dessous, la chute de blocs ne concerne qu'un nombre réduit d'éléments; pour les éboulements, la masse instable est beaucoup plus volumineuse.

<b>Chutes de pierres</b>	< 0,1 m <sup>3</sup>
<b>Chutes de blocs</b>	0,1 à 10 m <sup>3</sup>
<b>Eboulements</b>	10 à 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>
<b>Eboulements majeurs</b>	10 <sup>4</sup> à 10 millions de m <sup>3</sup>
<b>Eboulements catastrophiques</b>	> 10 millions de m <sup>3</sup>

Tableau 2 : Volumes de matériaux mis en jeu pour les éboulements et les chutes de blocs

### 5.3.2.2 Coulées boueuses et laves torrentielles

#### 5.3.2.2.1 Coulées boueuses

Les coulées sont caractérisées par le transport sur les versants de matériaux meubles dont la teneur en eau a augmenté de manière importante jusqu'à franchir leurs limites de liquidité.

Il s'agit de matériaux sans cohésion ou susceptibles de perdre leur cohésion que sont les argiles, les limons, les sols, les roches décomposées ou les éboulis fins.

Ainsi, souvent rapides et extrêmement dangereuses, les coulées sont déclenchées par un excès d'eau (pluies exceptionnelles, fonte des neiges ou d'un glacier...).

Si l'alimentation en eau est suffisante, de telles coulées peuvent également s'être formées à la suite d'un glissement, la coulée se distinguant du glissement par le fait que la masse, visqueuse est soumise à un remaniement interne au cours de sa progression.

En effet, lors d'un phénomène de coulée boueuse :

- le degré de remaniement de la masse en mouvement est total,
- la vitesse et la distance parcourue par une coulée boueuse sont très variables, dépendant de nombreux facteurs comme la nature des matériaux, la quantité d'eau, la viscosité du mélange eau/matériau, la topographie, la saturation en eau des sols sur lesquels se déplace la coulée.

Le phénomène de coulée boueuse montre presque toujours :

- une **zone supérieure élargie** (rassemblement de matériaux par exemple au pied d'un glissement, zone de départ de la coulée),
- un **chenal d'écoulement** beaucoup plus étroit et de longueur extrêmement variable (zone de transfert), la longueur d'une coulée de boue étant toujours très supérieure à la largeur,
- un **lobe terminal** (zone d'accumulation) élargi en une sorte de cône de déjection mais de profil convexe.

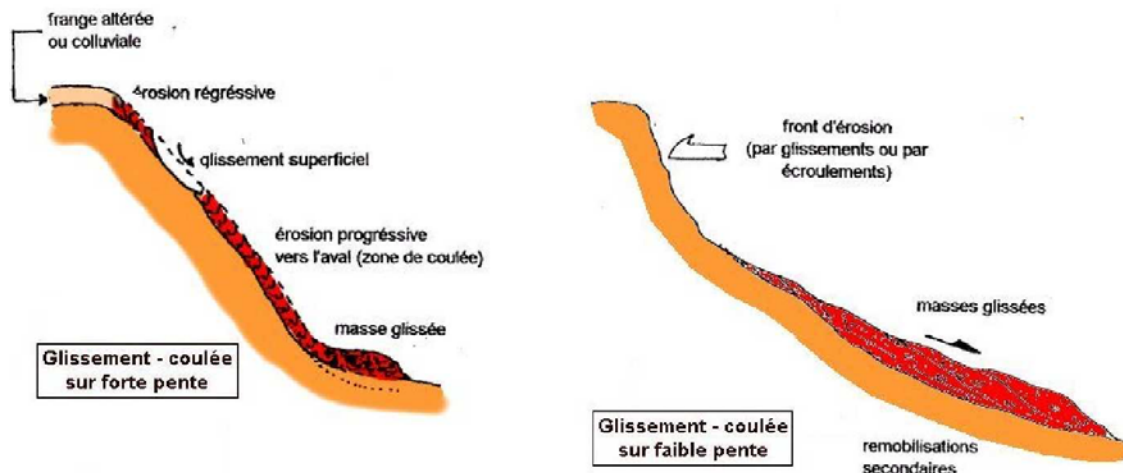


Figure 26 : les glissements-coulées (source : BRGM)

Les facteurs prédominants pour l'occurrence des coulées boueuses sont :

- la faible cohésion du matériau,
- le fort degré de remaniement,
- l'augmentation de la teneur en eau et des pressions interstitielles par des épisodes pluviométriques intenses notamment en montagne,
- l'apport brutal d'énergie (caractère accidentel) par un glissement, un écroulement ou par un séisme.

Quelques coulées sont célèbres par leur extension : 1,8 km pour la coulée du Châtelard (Savoie) en 1931 ; de nombreuses coulées, de quelques centaines de mètres au moins, ont lieu chaque année en France, et n'attirent l'attention que lorsqu'elles menacent un ouvrage d'art, une route, un village.

Une coulée de boue est généralement difficile à stabiliser et peut se remettre en mouvement périodiquement, aux mêmes endroits et prendre la forme d'une véritable lave à la suite de précipitations importantes.

#### 5.3.2.2 Laves torrentielles

Une lave peut être considérée comme une coulée devenue extrêmement liquide (teneur en eau plus élevée) et circulant de ce fait très rapidement dans le lit d'un torrent de montagne en période de crue. Le plus souvent, elles apparaissent après de fortes précipitations dans un lit encombré de débris et affecté par des effondrements de berge. L'eau, de plus en plus boueuse, voit sa densité augmenter. Ce sont des phénomènes particulièrement dévastateurs en raison de leur vitesse de déplacement et des volumes transportés qui peuvent atteindre des centaines de milliers de m<sup>3</sup>.

Les laves de Pontamafrey (Savoie) sont les plus souvent citées lorsque l'on évoque ce type de phénomène. Un vaste glissement situé à 1 600 m au-dessus de l'Arc et distant d'environ 6 km est à l'origine de ces laves qui, périodiquement, coupent la route et la voie ferrée.

Bien qu'elles soient généralement plus modestes que celles de Pontamafrey, les laves qui apparaissent souvent de manière irrégulière et imprévisible sont, pour cette raison, un des phénomènes les plus redoutés car difficiles à maîtriser.

On notera que la distinction entre coulée de boue et lave torrentielle n'est pas toujours très nette. Il s'agit d'un type de phénomène intermédiaire entre les mouvements de terrain et les inondations.

Enfin, les **lahars** sont des coulées boueuses à débris de roches volcaniques. Leurs effets destructeurs sont supérieurs aux éruptions qui les précèdent.



## 6. LES TEMPETES

### 6.1 DEFINITIONS

Une **tempête** est une violente perturbation atmosphérique entraînant des vents moyens supérieurs à 89 km/h (degré 10 de l'échelle de Beaufort qui en comporte 12) et en général de fortes pluies et des orages.

De façon générale, on désigne par **perturbation** tout phénomène météorologique engendrant une dégradation du temps. Sous les latitudes tempérées, ce terme est employé pour désigner l'ensemble front chaud, secteur chaud, front froid et éventuellement occlusion. On l'utilise aussi pour désigner la zone nuageuse associée à cet ensemble, voire même la zone nuageuse associée à un front froid isolé.

Le **front** est la surface fictive de discontinuité de deux masses d'air voisines, de caractéristiques thermiques différentes. Le front est généralement marqué par une zone nuageuse. Il existe deux grands types de fronts, le front chaud et le front froid.

Le **front chaud** est un front qui sépare une masse d'air chaud se déplaçant plus vite qu'une masse d'air froid et la poussant. L'air chaud, plus léger et plus rapide, glisse et se superpose au-dessus de l'air froid, le long d'une pente très douce, d'environ 1 %. Il est par conséquent très étendu et il détermine le temps sur un millier de kilomètres.

L'arrivée du front chaud se signale par un voile de nuages légers, étalés et élevés : les cirrus. Plus bas, le long du front chaud, l'air chaud, chargé d'humidité, voit sa pression diminuer et se refroidit au contact de l'air froid : la condensation engendre l'épaississement des nuages (du haut vers le bas : cirrostratus, altostratus, nimbostratus) et des précipitations continues en avant de la trace de ce front. Le passage d'un front chaud occasionne la formation progressive de nuages bas et s'accompagne d'une pluie fine qui tombera pendant plusieurs heures ou en hiver, il est responsable des bonnes chutes de neige. Après cette pluie, le ciel s'éclaircit de nouveau et l'arrivée d'air chaud entraîne une baisse de pression et une hausse de la température. Les changements associés aux fronts chauds se font plus graduellement que lors des passages de front froid.

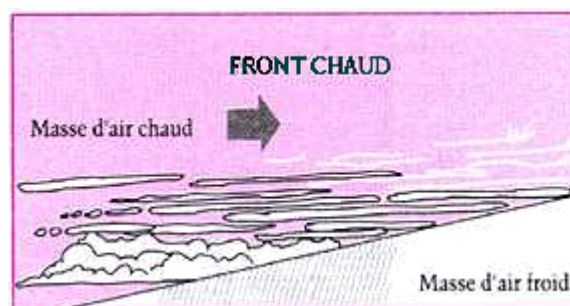


Figure 27 : le front chaud (source : MATE)

Le **front froid** est un front qui sépare une masse d'air froid poussant une masse d'air chaud. L'air froid, plus lourd, glisse en dessous de l'air chaud qui, refoulé brutalement en altitude, se refroidit et se condense avec formation de nuages (cumulus ou cumulonimbus), de vent et de pluie. Ce type de front donne souvent des orages et des averses brusques. Toutefois, la zone pluvieuse est peu étendue en arrière du front froid.

Lorsque le front de nuages est passé, de l'air froid et dense envahit la région, la pression monte donc, la température diminue et le ciel s'éclaircit.

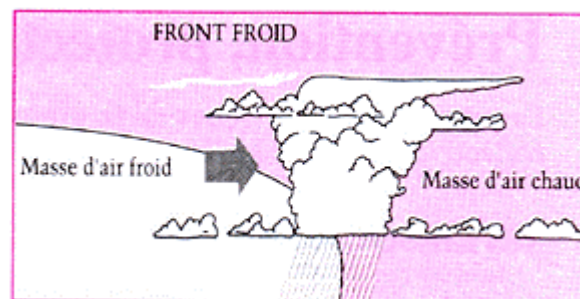


Figure 28 : le front froid (source : MATE)

L'**occlusion (front occlus)** se produit quand le front froid d'une perturbation rattrape le front chaud, le rejetant en altitude.

La **dépression** est une zone de basses pressions (inférieures à 1015 hPa en moyenne). Plus on s'approche de son centre, plus la pression diminue. On dit d'une dépression qu'elle se creuse si la pression en son centre diminue ou au contraire qu'elle se comble si la pression augmente. Dans l'hémisphère nord, les vents tournent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre autour de la dépression. Dans l'hémisphère sud, c'est l'inverse : les vents tournent dans le sens des aiguilles d'une montre autour d'une dépression.

La **cyclogénèse** désigne la phase de creusement d'une dépression et la formation d'une perturbation associée.

La **traîne** est la partie postérieure d'une perturbation, située après le front froid. Elle est constituée de nuages de type cumuliforme, ce qui se traduit par des averses et des orages.

Le **courant-jet** est un tube de vents violents des hautes altitudes (vers 9 km). Les variations de vitesse du vent le long du tube se traduisent par de grandes bandes nuageuses que nous montrent les satellites. Les plus importantes régions de variation de vitesse du vent sont aux extrémités du rail. A l'ouest, le vent en altitude accélère, équivalent atmosphérique de la confluence de ruisseaux ou de rivières. L'autre se situe à l'extrémité est du rail. Là, le courant-jet s'étale, les vitesses diminuent, comme dans le delta d'un fleuve : c'est une région de **diffluence**.

## 6.2 MORPHOLOGIE

Les dépressions et les tempêtes sont typiques des latitudes tempérées froides. En Europe du Nord-Ouest, elles dominent en automne et en hiver.

La Figure 29 ci-dessous illustre la morphologie d'une tempête tempérée. Les isolignes noirs représentent la pression. En rouge, la forme du champ de température près de la surface ; les flèches tiretées indiquent les vents les plus forts près de la surface. Les zones blanches transparentes suggèrent la forme du système nuageux associé à chaque système ; les flèches bleues montrent le vent en altitude.

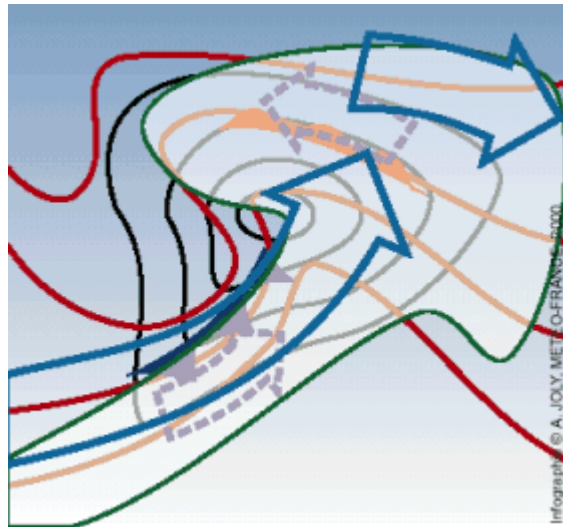


Figure 29 : une tempête tempérée (source : Météo-France)

Une dépression des latitudes tempérées est profondément asymétrique, c'est même la base de sa structure.

Dans une tempête des latitudes tempérées, les vents les plus forts en surface s'organisent en tubes, près des fronts.

Les dépressions des latitudes tempérées fonctionnent à partir des contrastes thermiques horizontaux de l'air. Plus ceux-ci occupent une grande épaisseur, plus les possibilités de renforcement d'une dépression sont grandes. Il est donc possible à une dépression de se renforcer ailleurs que sur mer, bien que la terre ferme induise une perte d'énergie par frottement qu'il faut compenser par une plus grande efficacité du « moteur atmosphérique ».

### 6.3 MECANISMES

Il existe une très grande diversité de cycles d'évolution.

Les phénomènes ont été, et sont encore, analysés à travers différentes écoles de pensée (climatologique/statistique, massique/frontologique, dynamique), qui se sont succédé en se juxtaposant et/ou en se superposant, sans intégration véritable. Chaque école a élaboré ses propres définitions et il n'existe pas de véritable synthèse entre les différentes perceptions (inconciliables entre elles).

On disposait, voici une quinzaine d'années, de trois propositions pour expliquer l'origine des dépressions météorologiques, correspondant à trois situations types.

La première associe les dépressions naissantes à l'instabilité linéaire d'un front extrême, la limite entre deux fluides de densités différentes. Il s'agit là d'une version ancienne, bizarrement persistante, en dépit de résultats absolument négatifs.

L'autre situation type est celle de la **zone barocline**, zone de variation thermique continue et modérée, en équilibre avec un courant-jet en altitude. Deux types de propositions s'appuient sur cette situation : d'une part, des théories de stabilité linéaire assez convaincantes et, d'autre part, une théorie exploitant l'existence de structures organisées persistantes en altitude, théorie encouragée par l'étude de cas réels.

Dans ces trois approches, la situation favorable à la cyclogénèse est bidimensionnelle et stationnaire.

Enfin, un dernier concept se base sur les anticyclones mobiles polaires.

### 6.3.1 L'instabilité linéaire d'un front extrême

Au début du 20e siècle, des météorologistes norvégiens ont proposé une vision nouvelle et cohérente de l'évolution de l'atmosphère aux latitudes tempérées. Cette vision reposait sur un concept : le « front polaire », sorte de surface séparant l'air polaire d'un côté et l'air tropical de l'autre. Selon ses créateurs, cette limite préexiste et se maintient en permanence, faisant plus ou moins le tour de la Terre.

De stationnaire (1), le front polaire peut devenir instable : il ondule (2) et des mouvements tourbillonnaires naissent autour d'une zone de basse pression (dépression) qui se creuse (3) et s'amplifie entre un front chaud en avant et un front froid en arrière (4). Ces deux fronts engendrent des précipitations pouvant dégénérer en tempête. Une dépression naît et s'amplifie, suivie d'une autre. Elles se déplacent plus ou moins vers l'est, poussées par des courants-jets. La fin de la dépression arrive lorsque le front froid, plus rapide, rattrape le front chaud et se fusionne avec lui pour ne plus former qu'un seul front, pluvieux : le front occlus. Après quelques tempêtes du même type, une période plus calme s'installe puis le cycle reprend.

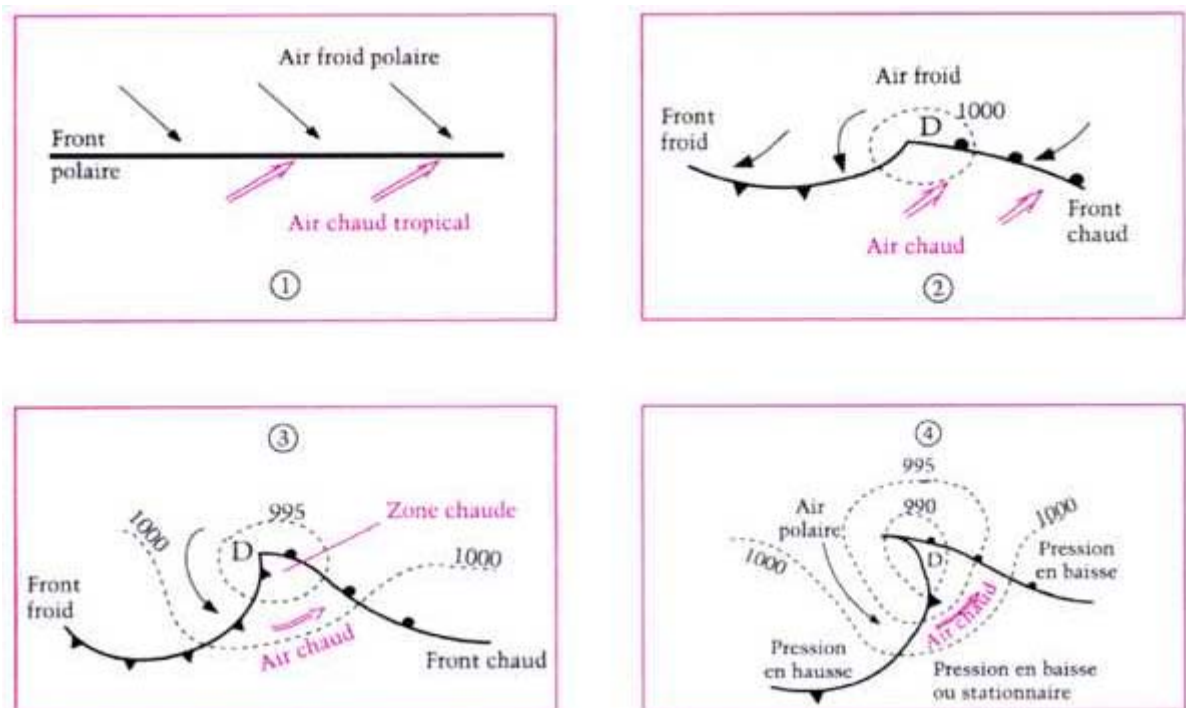


Figure 30 : frontogénèse (source : MATE)

*Le front chaud est désigné par des symboles arrondis, le front froid par des symboles pointus ; les lignes pointillées sont des isobares*

La notion de famille de dépression est l'ancêtre de la vision actuelle de configuration zonale du rail. Ce modèles « classique » représente encore le « dogme » plus de 30 ans après les premiers clichés satellitaires qui n'ont pas confirmé, entre autres, l'ondulation des

fronts. Les limites du concept de front polaire sont bien connues. En voici quelques-unes :

- Un fait d'expérience simple tout d'abord : on n'observe simplement pas de limite aussi extrême très étendue et quasi-permanente ; les limites intenses existent mais sont limitées dans l'espace et le temps ;
- Le front polaire explique la présence de ces limites, de ces fronts donc, au sein des dépressions . Reste alors à expliquer l'origine et le maintien du front polaire lui-même : selon les norvégiens, c'est la circulation générale, les « centres d'action », révélés par les cartes moyennes, qui le crée. Il est facile, aujourd'hui d'extraire la composante « lente » de l'évolution atmosphérique et de calculer sa capacité à faire un front de grande étendue : on constate que, sur l'essentiel de l'Atlantique, cette circulation « défait » les contrastes, c'est-à-dire le contraire de ce qu'il faut pour vérifier l'idée norvégienne ;
- Autre fait, des dépressions se forment sans qu'il existe au préalable de front ;
- Le passage d'un concept descriptif à une théorie physique, c'est-à-dire la vérification par le calcul que l'instabilité du front polaire donne des dépressions telles qu'on le connaît, n'a pas été possible (il n'y a pas de théorie du front polaire) ;
- Le front polaire rend plutôt bien compte des périodes de configuration ouest-est du moderne rail des dépressions. Mais il peine à rendre compte de la configuration bloquée et échoue avec l'irrégularité des durées et des transitions d'une configuration à l'autre.

Il reste qu'on observe des fronts, en effet. Les fronts résultent de la formation des dépressions et sont des structures très transitoires, rarement très étendues. Le mécanisme de formation de ces fronts, subtil, a été identifié vers 1970.

### 6.3.2 L'interaction barocline

Si les mécanismes de création semblent variés, un seul mécanisme physique, l'interaction barocline, assure le développement.

L'association zone barocline/courant-jet/dépression fonctionne très bien pour décrire un cas unique de dépression. Toutefois, dès qu'on passe à une échelle de temps couvrant plusieurs cas, il est utile de distinguer le courant-jet moyen (ou zone barocline principale) et la trajectoire d'un ensemble de dépressions, qui coupe le courant-jet de diverses manières. Ainsi naît **la notion de rail des dépressions**, région de contraste thermique modéré (quelques °C par 1000 km du sud au nord) caractérisé par le courant-jet. Cette notion généralise celle de zone barocline à de plus grandes échelles de temps (une à plusieurs semaines). Il y a interaction non-linéaire entre le rail et la dépression. Si le rail oriente et détermine la force de chaque dépression, celles-ci, en retour, déforment, déplacent, cassent ou allongent le rail. Elles restituent alors une partie de l'énergie qu'elles avaient puisée lors de leur développement. On pourrait dire que la notion de zone barocline est utile pour décrire une dépression comme un effet de la présence du courant-jet, un seul sens de l'interaction, donc l'effet des dépressions sur la zone barocline. L'idée de rail des dépressions est fondée sur la notion de variabilité atmosphérique et couvre avec un seul concept tous les types de temps. Le contraste thermique horizontal sur une épaisseur de 8-9 km sur la verticale représente une énergie potentielle convertible en vent. Le courant-jet symbolise et marque la présence d'un réservoir d'énergie potentielle thermique qu'un moteur atmosphérique pourrait convertir en vent, en tempête.

Il est important de souligner que ce n'est pas « l'alimentation » en air chaud ou froid qui fait la dépression, c'est la dépression, source de vent et donc des déplacements d'air, qui fait circuler autour d'elle l'air qui lui permettra de s'amplifier davantage ou non. C'est le

rôle même des dépressions, en se creusant, d'entraîner de l'air chaud aux hautes latitudes et altitudes et de l'air froid aux basses latitudes et altitudes. A l'issue de cette mise en marche, les masses d'air se déplacent et l'air froid, en particulier, prend cette forme lenticulaire si identifiable appelée « traîne ».

**Première étape : une nouvelle dépression naît.**

Les phases de genèse et celles de maturation / amplification sont plutôt indépendantes, c'est-à-dire que le type de naissance ne présage en rien, statistiquement, de l'évolution ultérieure de la dépression. Les mécanismes peuvent être très différents. De fait, seule l'interaction barocline est significative dans la maturation, alors qu'elle ne représente que 20 % au mieux, des genèses.

**Deuxième étape : le voyage vers l'est.**

La majorité des dépressions se forment du côté « chaud » du rail. L'interaction avec le courant-jet commence souvent par les propager avant de les laisser s'amplifier. Plus le courant-jet est intense, plus la jeune dépression progresse vite (près du sol). Ceci semble logique, mais attention : ce n'est pas le vent qui pousse la dépression, car le vent fort est en altitude et la dépression en général confinée en surface. La durée de cette phase détermine la longitude la plus à l'est que va atteindre cette dépression : comme on va le voir bientôt, la fin de cette phase entraîne un changement de direction. En revanche, la pression ne baisse guère vite, voire pas du tout, pendant ce temps.

Rappelons qu'en présence d'un courant-jet homogène, l'extension verticale de la jeune dépression détermine sa capacité à s'amplifier en plus de se propager. Une faible extension verticale limite la possibilité d'amplification. Disons qu'on peut relier cela au rendement du moteur atmosphérique. Il dépend de la différence de température entre la surface, côté air chaud, et celle à la limite supérieure de la jeune dépression, côté air froid.

**Troisième étape du cycle d'évolution : la phase de creusement explosif** par interaction entre la dépression et l'extrémité diffluante du courant-jet.

La dépression, à partir d'une certaine amplitude, interagit directement avec le courant-jet. Elle force le passage du côté « chaud » au côté « froid ». dans le même temps, la dépression se vide de son air, la pression dégringole brusquement. Le moteur fonctionne alors à plein régime, le vent s'accélère avec force.

Dès qu'elle est passée, l'amplification cesse, la structure se simplifie, la progression vers l'est est terminée. Sur mer, la dépression est comme une toupie qui erre en s'atténuant très lentement. Sur terre, son affaiblissement est plus rapide, le frottement avec la surface absorbe davantage d'énergie que la surface de la mer. Le rail peut être plus ou moins affecté : il est généralement cassé en deux tronçons. Nette et intervenant très à l'ouest, cette cassure peut entraîner un changement de configuration, un blocage.

Cette théorie du « mécanisme non linéaire complexe » soutenue par Joly, n'explique pas davantage que la précédente le processus réel de la cyclogénèse, précisément la formation de la dépression initiale.

Marcel Leroux fait en outre remarquer que cette théorie n'explique toujours pas pourquoi une dépression se creuse en surface (à part spontanément), et pourquoi sous l'effet de la force géostrophique, le vent ne converge pas de tous les côtés vers le centre de la dépression.

### 6.3.3 Les anticyclones mobiles polaires (AMP)

#### 6.3.3.1 Définition

Les AMP sont des lentilles d'air froid et dense relativement homogènes et grossièrement circulaires, de faible épaisseur : 1500 mètres en moyenne au départ des pôles, mais de vaste dimension (diamètre de 2000 à 3000 km). Ils sont responsables dans les hautes et moyennes latitudes des variations : de pression, de direction et de vitesse du vent, de température, d'humidité, de nébulosité et de pluviosité, et donc de la variation perpétuelle du temps, comme de la variabilité du climat, à toute échelle de durée.

#### 6.3.3.2 Formation des AMP

Ils résultent du refroidissement à la base et de l'affaissement de l'air au-dessus des régions polaires, provoqué par le bilan radiatif constamment déficitaire à la surface (absence de rayonnement solaire en hiver, faiblesse de l'angle d'incidence, fort albédo). Le froid polaire est régulièrement exporté, de manière discontinue et rapide, par le détachement d'imposantes masses d'air dense. Cette éjection s'effectue sous l'impulsion combinée de l'augmentation de la masse refroidie, de la force centrifuge et de la pente (sur le Groenland et surtout sur l'Antarctique) ; la dispersion, se réalise dans toutes les directions. La coulée froide originelle, de forte vitesse, (ou une succession de coulées qui se rejoignent) s'organise rapidement en anticyclone mobile sous l'action de la force géostrophique (forte dans les hautes latitudes) qui lui assure sa cohérence. Le départ d'un AMP laisse un vide relatif, une dépression momentanée, dont l'attraction accélère le transfert d'air « chaud » vers la zone polaire ; le refroidissement de l'air advecté régénère ensuite rapidement des hautes pressions de basses couches qui constituent un nouvel AMP. Les mouvements sont inversés en fonction des niveaux : dans les basses couches le transport en masse d'air froid s'éloigne du pôle, tandis qu'au-dessus, en compensation, l'air chaud se dirige vers le pôle. Entre ces deux trajectoires superposées, un niveau d'inversion de vent et de température est situé en moyenne vers 1500 mètres au-dessus de la surface du sol dans l'Arctique

La formation d'AMP au-dessus de l'Arctique se réalise de manière continue : presque 1 AMP naît chaque jour, en toutes saisons, avec une fréquence un peu plus élevée en hiver.

#### 6.3.3.3 Evolution de l'AMP

Ils se déplacent d'une manière générale d'ouest en est, avec une composante méridienne (variable) qui les éloigne des pôles.

Les conditions dynamiques du déplacement des AMP varient en fonction de la saison et du substratum survolé. La variation saisonnière dépend du déficit thermique polaire : en hiver les AMP ont une plus forte puissance et leur trajectoire se déporte davantage vers le Tropique, en été leur puissance est moindre et leur trajectoire s'éloigne moins rapidement du pôle. Les océans offrent en permanence un espace sans entrave à leur déplacement, et c'est ainsi au-dessus d'eux que sont observées les vitesses les plus rapides. Les continents perturbent fortement ces conditions dynamiques, par accroissement du frottement, et surtout par la présence des reliefs. L'air froid est dense et inapte à s'élever. L'influence de l'orographie est fonction de sa propre altitude et de l'épaisseur des AMP, comme de la direction de leur déplacement et de l'orientation des reliefs.

Tant que l'avantage de sa propre densité lui permet d'écarter les autres flux ou masses d'air de son passage, l'AMP est entouré d'un champ dépressionnaire.

En effet, le soulèvement de l'air chaud sur la face avant de l'AMP provoque une baisse de pression dans les basses couches et la formation d'une dépression dynamique, dont le

creusement est fonction de l'intensité de l'ascendance. Cette dernière dépend de conditions mécaniques (puissance de l'AMP, vitesse de déplacement de l'AMP, barrage orographique éventuel et force géostrophique plaquant le flux dévié sur la face avant de l'AMP) et thermiques (contraste de densité entre l'AMP et le flux antérieur). La dépression initiale organise alors la circulation des basses couches selon la rotation cyclonique et se transforme en un couloir dépressionnaire périphérique, plus creusé sur la face avant de l'AMP (cf. 31 ci-dessous).

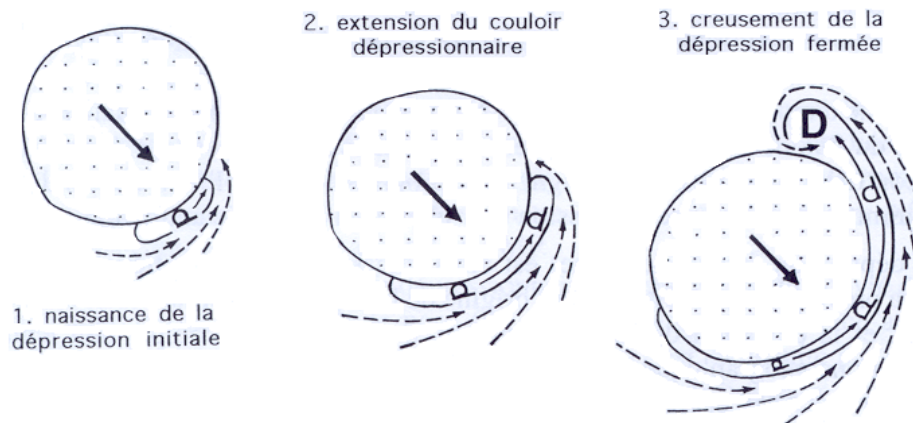


Figure 31 : Etablissement du champ de pression et de vent associé à un AMP (hémisphère Nord) (d'après Leroux, 2000)

L'AMP, le couloir dépressionnaire périphérique, le flux dévié et le cyclone restent étroitement accolés en se déplaçant vers l'est, puis ils se séparent, la ligne de confluence entre l'air froid et l'air chaud s'étirant et s'éloignant de l'anticyclone mobile. L'AMP se dirige vers le Tropique tandis que la circulation déviée sur la face avant et la dépression fermée (vortex) s'éloignent dans la direction du pôle.

Les AMP perdent progressivement de leur dynamisme : l'étalement accroît la force de frottement, l'excédent relatif de vitesse par rapport à la surface de la Terre diminue, et le mouvement est progressivement ralenti.

En raison des différences de dynamisme des AMP, un AMP peut être aussi rattrapé par l'AMP, plus récent et plus froid qui le suit : une fusion (partielle ou totale) en résulte. Mais l'action la plus vigoureuse émane du relief qui, en fonction de son altitude et de l'épaisseur des AMP, freine, canalise, bloque et provoque l'emboîtement des AMP qui se succèdent, pour former une agglutination anticyclonique (AA).



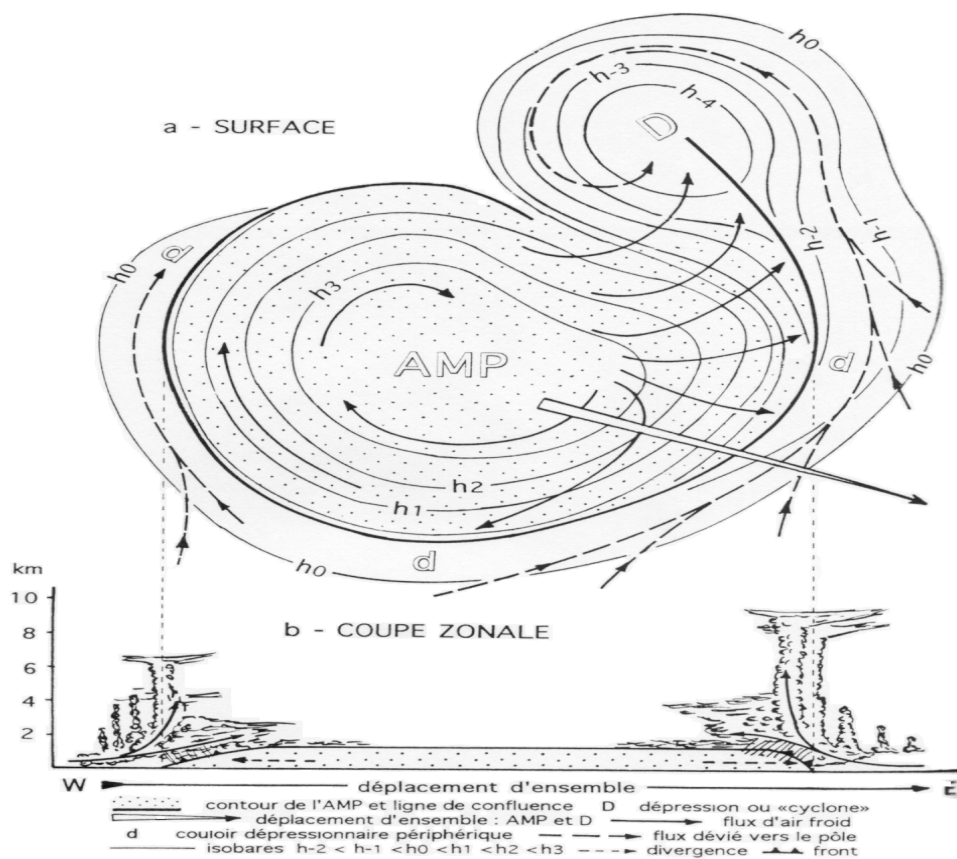


Figure 32 : L'anticyclone Mobile Polaire : surface et coupe verticale zonale (d'après Leroux, 2000)

#### 6.3.3.4 Les AMP dans l'hémisphère Nord

A partir du bassin arctique, la division des trajectoires des AMP est précoce en raison de la présence du Groenland. Trois espaces sont relativement bien délimités par les reliefs :

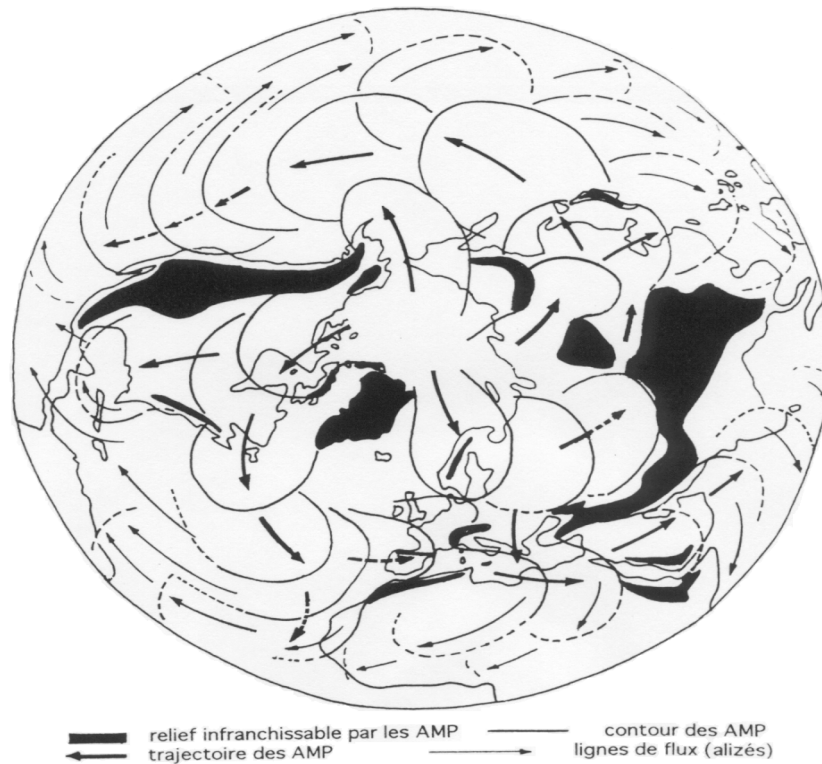
- l'espace Amérique du Nord et centrale/Atlantique Nord/Europe Occidentale,
- l'espace Europe du Nord et centrale/Asie occidentale/Afrique septentrionale/Arabie,
- l'espace Asie orientale/Pacifique Nord.

Les AMP ont une trajectoire préférentielle américaine, puis atlantique. En effet, le Groenland force le départ des AMP sur l'Amérique du Nord : environ 1 AMP arctique sur 2 est envoyé sur le Canada. Les Rocheuses forment un rempart infranchissable et les AMP ne peuvent rejoindre l'Atlantique qu'au sud de la latitude 60°N. La trajectoire principale vers l'Atlantique se situe entre la Terre de Baffin, le Groenland et le nord des Appalaches. La plus grande partie de l'air polaire advecté reste dans l'espace atlantique, les possibilités de fuite se situent : au nord des Alpes vers l'Europe centrale, vers la Méditerranée occidentale, et vers l'Afrique septentrionale du sud de l'Atlas en hiver lorsque les AMP ont une trajectoire plus méridionale.

La France se trouve à un carrefour de trajectoires d'AMP, les plus fréquents (plus de 70 %) venant de l'Ouest qui accueille les trajectoires américano-atlantiques des AMP en bout de course. La rencontre d'AMP peut se traduire, en toutes saisons, par des agglutinations anticycloniques de longue durée.

Les événements météorologiques intenses, pluies diluviennes, tempêtes, tornades, chutes de neige en plaine, orages de grêle, coups de froid ou vagues de chaleur, aux conséquences

souvent dramatiques, ne sont pas dus à la simple fatalité et donc imprévisibles, mais résultent de conditions particulières, locales et générales, et sont associés à des AMP bien individualisés, que l'on peut suivre aisément. Leroux explique ainsi les mécanismes qui ont provoqué les inondations de novembre 1999 dans le Languedoc et le Roussillon.



*Figure 33 : Trajectoire des AMP dans l'hémisphère Nord et circulation résultante dans les basses couches de la troposphère (d'après Leroux, 2000)*

## 5. CONCLUSION

---

La description des phénomènes naturels réalisée dans ce document a montré leur complexité, leurs relations et la grande diversité de leurs manifestations.

Il était nécessaire de bien connaître leurs mécanismes afin de pouvoir appréhender et prévenir leurs effets sur les installations industrielles.

Au delà de la connaissance du phénomène, l'objectif de cette synthèse est de mettre en évidence pour chaque phénomène considéré (séisme, inondation, mouvement de terrain, tempête) les paramètres qui influent sur le comportement des installations ou équipements.

### Cas du séisme :

L'analyse des mécanismes et des caractéristiques d'un séisme montre que l'action sismique est avant tout définie par un mouvement de sol. Ce mouvement peut être caractérisé en terme de déplacement, vitesse ou accélération. Chacun de ces paramètres fluctue avec le temps et suivant toutes les directions de l'espace.

Généralement, l'accélération et le déplacement sont considérés comme caractéristiques temporelles de l'action sismique. Cette dernière se propage à travers les bâtiments où sont installés les équipements ou directement sur l'équipement, en modifiant leurs caractéristiques temporelles (amplitude et contenu fréquentiel). Les équipements subissent alors ces accélérations ou déplacements imposés par leurs appuis.

L'action sismique peut également être définie par une définition fréquentielle de cette action. Ainsi, l'APFS définit l'action sismique au sol par des spectres de réponse élastique normalisés, horizontaux et verticaux combinés avec l'accélération nominale du site considéré.

### Cas des inondations

Le terme inondation regroupe plusieurs phénomènes ayant des caractéristiques et des dynamismes tout à fait différents. Néanmoins, l'analyse montre que les facteurs pouvant avoir une influence sur l'intensité des dommages sont la vitesse du courant, la hauteur d'eau, la masse des matériaux entraînés, la durée de submersion.

La hauteur de submersion est le paramètre le plus explicatif des dommages, notamment en zone urbaine. Les dommages sont proportionnels à la hauteur de submersion.

La durée de submersion est surtout responsable des pertes d'exploitation dues à l'interruption des activités, des réseaux, ...

Si la vitesse du courant est suffisamment importante, elle peut fortement accroître les dégâts. Toutefois, la vitesse du courant dans les plaines d'inondation étant dans l'ensemble très faible, les zones où ce paramètre est prépondérant sont très localisées. La vitesse sera un paramètre important dans le cas des inondations torrentielles.

Deux autres paramètres influencent la nature et l'ampleur des dommages : la vitesse de montée des eaux et le délai d'alerte ou d'intervention ainsi que la période de survenance des crues.

### Cas des mouvements de terrain

La nature des mouvements de terrain est très variée : affaissements, tassements, glissements, écroulements. Les dommages consécutifs à de tels phénomènes seront donc également très variés. Aussi, il est difficile de déterminer des paramètres représentatifs communs à chaque événement, ayant une influence sur les dommages. Dans le cas

d'écroulements, la hauteur d'écroulement sera déterminante. Dans le cas des mouvements lents et continus, le comportement du sol aura une incidence directe sur le comportement des équipements.

Quels que soient les phénomènes considérés, le paramètre prépondérant et commun à tous sera la vitesse de survenance de l'événement.

#### Cas des tempêtes

Dans le cas de tempête, le paramètre déterminant influençant directement la nature et l'ampleur des dommages est la vitesse du vent.

L'identification des paramètres intervenant dans le comportement des équipements soumis à un phénomène naturel est primordiale. Elle permet d'évaluer le comportement desdits équipements et les dommages potentiels qu'ils peuvent subir. Cette analyse permet ensuite de définir les moyens à mettre en œuvre pour réduire les dommages et assurer ainsi l'intégrité des équipements.

## 7. REFERENCES

---

- ALLEGRE Claude, **Les fureurs de la terre**, éd. Odile Jacob (Paris), 1987.
- AYRAULT Franck et JOLY Alain, **Une nouvelle typologie des dépressions météorologiques : classification des phases de maturation**, *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes*, série IIa, vol 330, pp. 167-172, 2000.
- AYRAULT Franck et JOLY Alain, **L'origine des dépressions météorologiques sur l'Atlantique : une nouvelle perspective climatologique**, *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes*, série IIa, vol 330, pp. 173-178, 2000.
- BESSON Liliane, **Les risques naturels en montagne : traitement, prévention, surveillance**, éd. Artès – publialp (Grenoble), 1996
- Comité interministériel de l'évaluation des politiques publiques – Premier ministre – Commissariat général du Plan – **La prévention des risques naturels** – Rapport d'évaluation, éd° La Documentation Française, sept 1997.
- Bureau des Recherches Géologiques et Minières** : <http://www.brgm.fr/risques>.
- DAGORNE André et DARS René, **Les risques naturels**, éd. Que sais-je ? (Paris), 1999.
- European Seismological Commission, Conseil de l'Europe, **European Macroseismic Scale 1998**, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, éd. G. Grünthal (Luxembourg), 1998 :  
<http://www.gfz-potsdam.de/pb5/pb53/projekt/ems/index.html>
- FAVRE Raoul, **L'homme et les catastrophes**, éd. France-Sélection (Aubervilliers), 1992.
- FLAGEOLLET J.-C., **Les mouvements de terrain et leur prévention**, éd. Masson, 1998.
- KERT Christian, Assemblée Nationale, Sénat, **Les techniques de prévision et de prévention des risques naturels : séismes et mouvements de terrain**, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 1995
- LAMBERT Jérôme, **Les tremblements de terre en France : hier, aujourd'hui, demain**, éd. BRGM (Orléans), 1997.
- LEDOUX Bruno, **Les catastrophes naturelles en France**, éd. Payot & Rivages (Paris), 1995.
- LEROUX Marcel, **La dynamique du temps et du climat**, éd Dunod (Paris), 2000.
- MARTIN Pierre, **Ces risques que l'on dit naturels**, éd. EDISUD (Aix-en-Provence), 1998.
- Météo-France : <http://www.cnrm.meteo.fr>
- Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement,  
<http://www.environnement.gouv.fr>
- Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports, **Plans de prévention des risques littoraux (PPR) - guide méthodologique**, éd. La Documentation française (Paris), 1997.
- Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports, **Plans de prévention des risques naturels (PPR) - Risques de mouvements de terrain : guide méthodologique**, éd. La

Documentation française (Paris), 1999.

Ministère de l'environnement (Direction de l'eau et de la Prévention des Pollutions et des Risques), **Mouvements de terrain : Mesures de prévention**, éd. La Documentation Française (Paris), 1987.

Ministère de l'environnement (Direction de l'eau et de la Prévention des Pollutions et des Risques), **Guide pour la conduite des diagnostics des vulnérabilités aux inondations pour les entreprises industrielles**, Bruno Ledoux consultants-SAGERIS, 2000

TRITSCH J-J et PINEAU J-P, **Effets d'un séisme sur les installations industrielles (séisme survenu le 17 août 1999 dans la région d'Izmet, Turquie)**, INERIS (Verneuil-en-Halatte), 1999.

TRITSCH J-J. et DIDIER C., **Méthodologie pour la connaissance et l'identification des risques de mouvements de terrain**, INERIS (Verneuil-en-Halatte), 1996.

TRITSCH J-J., **Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines**, INERIS (Verneuil-en-Halatte), 2001. (*à paraître*)

Université de Laval, Département de géologie et de génie géologique : <http://ggl.ulaval.ca>

VUIDART Isabelle, **Les risques naturels**, DESS, 1996.

## 8. LISTE DES ANNEXES

---

<b>Repère</b>	<b>Désignation précise</b>	<b>Nb/N°pages</b>
A	Les plaques lithosphériques	1 page
B	Les failles transformantes : exemple de la faille de San Andreas	2 pages
C	Comparaison des différentes échelles d'intensité (d'après A. LEVRET)	1 page
D	Echelle de MERCALLI modifiée (1931)	1 page
E	Echelle d'intensité MSK64	4 pages
F	Résumé de l'échelle macroscopique européenne (EMS 98)	2 pages

**ANNEXE A**



## Les plaques lithosphériques



Les 7 plaques principales :

**la plaque Afrique**, limitée à l'ouest par la dorsale Atlantique, au sud et à l'est par la dorsale Indienne. Au nord d'une manière moins nette, d'abord par la mer rouge, puis par une série de failles transformantes qui parcourent les bordures nord de la Méditerranée pour rejoindre la dorsale Atlantique par une grande faille qui va de Gibraltar aux Açores.

**La plaque Eurasie**, limitée à l'ouest par la dorsale médio-indienne, à l'est par une série de zones de subduction qui vont des Kouriles jusqu'en Indonésie. Cette zone rejoint l'Himalaya, l'Iran et la zone de fractures nord-méditerranéenne que nous avons vue.

**La plaque Indienne ou plaque Australie**, limitée à l'ouest par la dorsale médio-Indienne, au sud par la dorsale circum-Antarctique. Vers le nord, la limite est située au niveau de l'Iran et de l'Himalaya et est considérée alors comme une zone de subduction comprenant la fosse de Java, l'arc de Banda, la zone de Nouvelle-Guinée, les fosses de Tonga-Kermadec, Nouvelle-Zélande.

**La plaque Pacifique** comprend l'ensemble de l'océan pacifique. Elle est bordée à l'ouest par un feston de zones de subduction, à l'est par la dorsale Est-Pacifique interrompue entre le golfe de Californie et la dorsale Juan da Fuca par la faille de San Andreas.

**La plaque Antarctique** qui comprend l'océan et le continent antarctiques est entourée de dorsales.

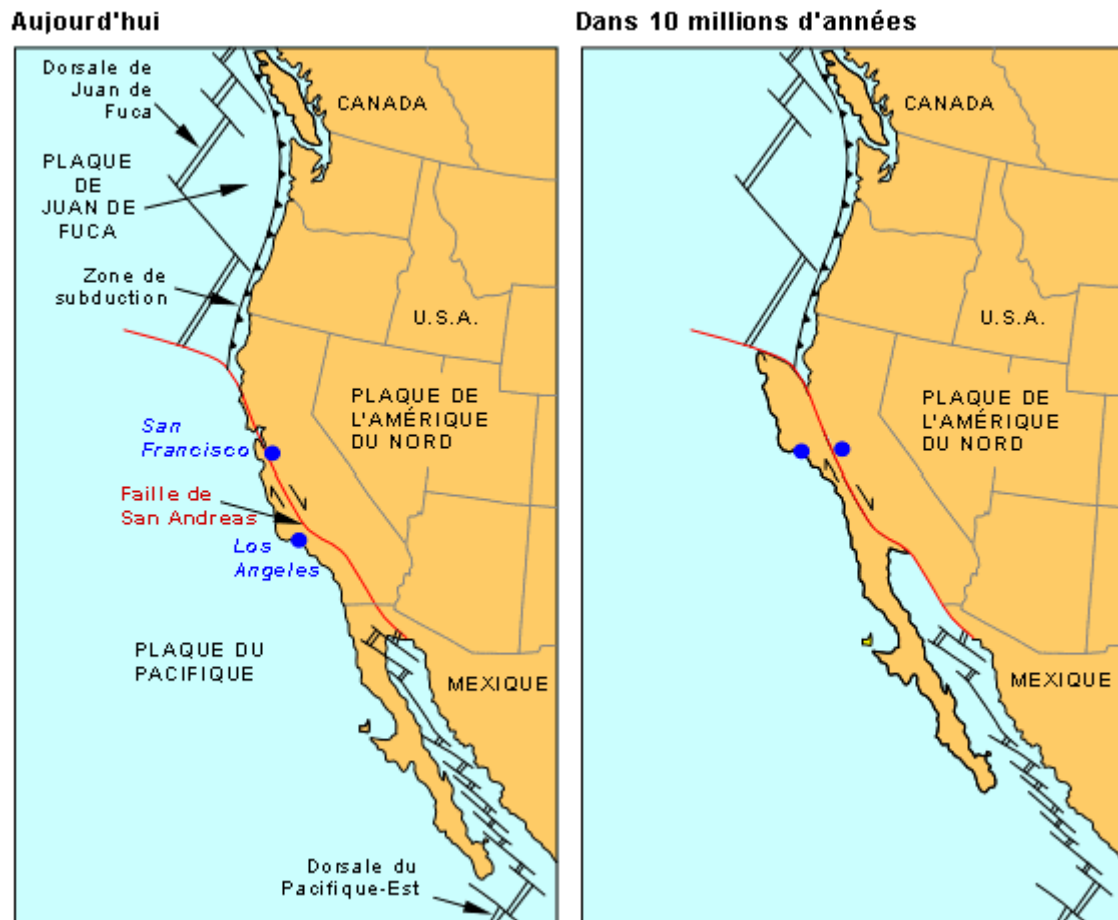
**La plaque Amérique** (Am du Nord et du Sud) est bordée à l'est par la dorsale médio-Atlantique. A l'ouest, ses frontières sont celles du continent américain dont la nature est

géologiquement complexe. Elle débute par une zone de subduction au nord.

**La plaque de Nazca**, dans l'intervalle entre le continent sud-américain et la dorsale Est-Pacifique.

**ANNEXE B**

## Les failles transformantes : exemple de la faille de San Andreas



Elle affecte à la fois la lithosphère océanique et la lithosphère continentale. Elle assure le relais du mouvement entre la limite divergente de la dorsale Pacifique-Est, la limite convergente des plaques Juan de Fuca-Amérique du Nord et la limite divergente de la dorsale Juan de Fuca.

Elle présente l'inconvénient de traverser la ville de San Francisco.

Au rythme actuel du déplacement (environ 5,5 cm/an), la ville de Los Angeles sera au droit de San Francisco dans 10 millions d'années.

Autres failles transformantes : Yougoslavie, la faille d'Anatolie (qui traverse le Nord de la Turquie), faille du Jourdain (longe la côte du Moyen-Orient), Vema, Mendocino, Chaman (dorsale indienne- zone de subduction himalayenne)

## **ANNEXE C**

Comparaison des différentes échelles d'intensité (d'après A. LEVRET)

Rossi-Forel 1873	Mercalli 1902	Mercalli Cancani Sieberg 1917	Mercalli modifiée 1931 Wood- Neumann	OBS Central Japon 1932 Ishimoto	Mercalli Cancani Sieberg modifiée 1942 Rothe	OBS Central Japon modifiée 1951 Kawasumi	Geofian URSS 1953 Medvedev	Mercalli modifiée 1956 Richter	Mercalli modifiée New- Zealand 1965 Eiby	EMI (Echelle macro-sis- mique internationale)	MSK 1964 Medvedev Sponhauer Karnik
I	I	I	I	0	I	0	I	I	I	I	I
II	II	II	II	I	II	I	II	II	II	II	II
III	III	III	III	II	III	II	III	III	III	III	III
IV	IV	IV	IV	III	IV	III	IV	IV	IV	IV	IV
V	V	V	V	IV	V	IV	V	V	V	V	V
VI	VI	VI	VI	V	VI	V	VI	VI	VI	VI	VI
VII	VII	VII	VII		VII	VI	VII	VII	VII	VII	VII
VIII	VIII	VIII	VIII		VIII	IX	VIII	VIII	VIII	VIII	VIII
IX	IX	IX	IX		IX	X	IX	IX	IX	IX	IX
X	X	X	X	VI	X	VI	X	X	X	X	X
		XI	XI		XI	XI	VII	XI	XI	XI	XI
		XII	XII		XII	XII		XII	XII	XII	XII

**ANNEXE D**

**ECHELLE DE MERCALLI MODIFIEE (1931)**

<b>Intensité</b>	<b>Effets ressentis</b>
<b>I</b>	Aucun mouvement n'est perçu.
<b>II</b>	Quelques personnes peuvent sentir un mouvement si elles sont au repos et/ou dans les étages élevés de grands immeubles.
<b>III</b>	A l'intérieur de bâtisses, beaucoup de gens sentent un léger mouvement. Les objets suspendus bougent. En revanche, à l'extérieur, rien est senti.
<b>IV</b>	A l'intérieur, la plupart des gens ressentent un mouvement. Les objets suspendus bougent, mais aussi les fenêtres, plats, assiettes, loquets de porte.
<b>V</b>	La plupart des gens ressentent le mouvement. Les personnes sommeillant sont réveillées. Les portes claquent, la vaisselle se casse, les tableaux bougent, les petits objets se déplacent, les arbres oscillent, les liquides peuvent déborder de récipients ouverts.
<b>VI</b>	Tout le monde sent le tremblement de terre. Les gens ont la marche troublée, les objets, tableaux, tombent, le plâtre des murs peut se fendre, les arbres et les buissons sont secoués. Des dommages légers peuvent se produire dans des bâtiments mal construits, mais aucun dommage structural.
<b>VII</b>	Les gens ont du mal à tenir debout. Les conducteurs sentent leur voiture secouée. Quelques meubles peuvent se briser. Des briques peuvent tomber des immeubles. Les dommages sont modérés dans les bâtiments bien construits, mais peuvent être considérable dans les autres.
<b>VIII</b>	Les chauffeurs ont du mal à conduire. Les maisons avec de faibles fondations bougent. De grandes structures telles que des cheminées ou des immeubles, peuvent se tordre et se briser. Les bâtiments bien construits subissent de légers dommages, contrairement aux autres qui en subissent de sévères. Les branches des arbres se cassent. Les collines peuvent se fissurer si la terre est humide. Le niveau de l'eau dans les puits peut changer.
<b>IX</b>	Tous les immeubles subissent de gros dommages. Les maisons sans fondations se déplacent. Quelques conduits souterrains se brisent. La terre se fissure.
<b>X</b>	La plupart des bâtiments et leurs fondations sont détruits. Il en est de même pour quelques ponts. Des barrages sont sérieusement endommagés. Des éboulements se produisent. L'eau est détournée de son lit. De larges fissures apparaissent sur le sol. Les rails de chemin de fer se courbent.
<b>XI</b>	La plupart des constructions s'effondrent. Des ponts sont détruits. Les conduits souterrains sont détruits.
<b>XII</b>	Presque tout est détruit. Le sol bouge en ondulant. De grands pans de roches peuvent se déplacer.



## **ANNEXE E**

**ECHELLE D'INTENSITE MSK64**  
simplifiée pour utilisation pédagogique  
(utilisée par le BCSF jusqu'au 31 décembre 1999)

Degré	Force	Effets du tremblement de Terre sur :		
		Personnes	Bâtiments	Nature
<b>I</b>	Secousse non perceptible la secousse est détectée et enregistrée uniquement par les sismomètres	La secousse n'est pas ressentie par l'homme		
<b>II</b>	Secousse à peine perceptible	La secousse est ressentie seulement par quelques individus au repos dans leur habitation, plus particulièrement dans les étages supérieurs des bâtiments.		
<b>III</b>	Secousse faible ressentie seulement de façon partielle	La secousse est ressentie par quelques personnes à l'intérieur des constructions et n'est ressentie qu'en cas de circonstances favorables. La vibration ressemble à celle causée par le passage d'un camion léger.	Des observateurs attentifs notent un léger balancement des objets suspendus, balancement plus accentué dans les étages supérieurs.	
<b>IV</b>	Secousse largement ressentie	Le séisme est senti à l'intérieur des constructions par de nombreuses personnes et par quelques personnes à l'extérieur. Des dormeurs isolés sont réveillés mais personne n'est effrayé. La vibration est comparable à celle due au passage d'un camion lourdement chargé.	Les fenêtres, les portes et les assiettes tremblent. Les planchers et les murs font entendre des craquements. Le mobilier commence à être secoué. Les liquides contenus dans les récipients ouverts s'agitent légèrement. Les objets suspendus se balancent légèrement.	

Degré	Force	Effets du tremblement de Terre sur :		
		Personnes	Bâtiments	Nature
V	Secousse assez forte Réveil des dormeurs	Le séisme est ressenti à l'intérieur par tout le monde et à l'extérieur par de nombreuses personnes. De nombreux dormeurs s'éveillent, quelques-uns sortent en courant.	Les constructions sont agitées d'un tremblement général. Les objets suspendus sont animés d'un large balancement. Les tableaux cognent sur les murs ou sont projetés hors de leur emplacement. Les objets peu stables peuvent être renversés ou déplacés. Les portes ou les fenêtres ouvertes battent avec violence. De légers dommages sont possibles dans les bâtiments : fissurations des plâtres, chutes de petits débris de plâtre.	Les animaux sont nerveux.
VI	Secousse forte Frayeur	Le séisme est ressenti par la plupart des personnes aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur des bâtiments. De nombreuses personnes sont effrayées et se précipitent vers l'extérieur. Quelques personnes perdent l'équilibre.	Les assiettes et les verres peuvent se briser, les livres tomber. Le mobilier lourd peut se déplacer et dans les clochers les petites cloches peuvent tinter spontanément. Fissurations des plâtres, chutes de petits débris de plâtre sont possibles pour des constructions en brique ordinaire ou en blocs de béton. Fissurations des murs, chute de tuiles sont possibles pour des maisons rurales.	Les animaux domestiques s'échappent de leur stalle. En certains cas, des crevasses de l'ordre du centimètre peuvent se produire dans les sols détrempés, des glissements de terrain peuvent se produire en montagne. On peut observer des changements dans le débit des sources et le niveau des puits.
VII	Secousse très forte Dommages aux constructions	La plupart des personnes sont effrayés et se précipitent au-dehors. Beaucoup ont de la difficulté à rester debout. La vibration est ressentie par des personnes conduisant des voitures.	De grosses cloches se mettent à sonner. Fissurations des plâtres, chutes de petits débris de plâtre sont possibles pour de nombreuses constructions armées. Fissurations des murs, chute de tuiles sont possibles pour des constructions en brique ordinaire ou en blocs de béton. Lézardes larges et profondes dans les murs, chutes de cheminée, voire effondrements partiels éventuellement, sont possibles pour des maisons rurales.	Des vagues se forment sur l'eau et celle-ci est troublée par la boue mise en mouvement. Les niveaux d'eau dans les puits et le débit des sources changent. Dans quelques cas, des sources tariées se remettent à couler et des sources existantes se tarissent. Glissements de terrain isolés sur des versants raides.

Degré	Force	Effets du tremblement de Terre sur :		
		Personnes	Bâtiments	Nature
VIII	Secousse destructrice Destruction de bâtiments	Frayeur et panique : même les personnes conduisant des voitures sont effrayées.	<p>Le mobilier, même lourd, se déplace ou se renverse. Les lampes suspendues sont endommagées en partie.</p> <p>Fissurations des plâtres, chutes de petits débris de plâtre dans de nombreuses constructions armées.</p> <p>Lézardes larges et profondes dans les murs, chutes de cheminée sont possibles pour quelques constructions en brique ordinaire.</p> <p>Effondrements partiels éventuellement, voire effondrement total pour certaines maisons rurales.</p> <p>Les monuments et les statues se déplacent, les stèles funèbres se renversent, les murs de pierre s'effondrent.</p>	<p>Dans quelques cas des branches d'arbres cassent.</p> <p>Les crevasses dans le sol atteignent plusieurs centimètres de largeur.</p> <p>L'eau des lacs se trouble.</p> <p>Des puits asséchés se remplissent et des puits existants se tarissent.</p> <p>Dans de nombreux cas, changement dans le débit et dans le niveau de l'eau.</p> <p>Glissement de talus sur les chaussées.</p>
IX	Secousse dévastatrice Dommages généralisés aux constructions	Panique générale.	<p>Dégâts considérables au mobilier.</p> <p>Lézardes larges et profondes dans les murs, chutes de cheminée, effondrements partiels, pour de nombreuses constructions armées.</p> <p>Effondrements partiels, voire totaux, pour les constructions en brique ordinaire.</p> <p>Effondrement total pour les maisons rurales.</p> <p>Les monuments et les colonnes tombent.</p> <p>Rupture partielle des canalisations souterraines.</p> <p>Dans quelques cas, des rails de chemin de fer sont pliés, des routes endommagées.</p>	<p>Les animaux affolés courent dans toutes les directions et poussent des cris.</p> <p>Des projections d'eau, de sable et de boue sur les plages sont souvent observées.</p> <p>Les crevasses dans le sol atteignent 10 cm et plus sur les pentes et les berges des rivières.</p> <p>Chutes de rochers.</p> <p>Nombreux glissement de terrain.</p> <p>Grandes vagues sur l'eau.</p>

Degré	Force	Effets du tremblement de Terre sur :		
		Personnes	Bâtiments	Nature
XI	Secousse catastrophique		<p>Domages sévères même aux bâtiments bien construits, aux ponts, aux barrages et aux lignes de chemin de fer. Les grandes routes deviennent inutilisables. Les canalisations souterraines sont détruites.</p>	<p>Le terrain est considérablement déformé aussi bien par des mouvements dans les directions horizontales et verticales que par de larges crevasses. De nombreux glissements de terrain et chute de rochers.</p>
XII	Grande catastrophe		<p>Pratiquement toutes les constructions au-dessus et au-dessous du sol sont gravement endommagées ou détruites.</p>	<p>Changement de paysage. La topographie est bouleversée.</p>

**ANNEXE F**

**Résumé de l'échelle macroscopique européenne (EMS 98)**

(utilisée par le BCSF depuis le 1er janvier 2000)

<b>Intensité</b>	<b>Définition</b>	<b>Description</b>
<b>I</b>	Non ressenti	Non ressenti, même dans les circonstances les plus favorables.
<b>II</b>	A peine ressenti	La vibration n'est ressentie que par quelques personnes au repos, en particulier dans les étages supérieurs des bâtiments.
<b>III</b>	Faibles secousses	Une faible vibration est ressentie à l'intérieur par quelques personnes. Des personnes au repos ressentent un balancement ou un léger tremblement.
<b>IV</b>	Largement observé	Le séisme est ressenti à l'intérieur par de nombreuses personnes et par un très petit nombre dehors. Quelques personnes sont réveillées. L'amplitude des vibrations reste modérée. Les fenêtres, les portes et la vaisselle vibrent. Les objets suspendus se balancent.
<b>V</b>	Fortes secousses	Le séisme est ressenti à l'intérieur par la plupart des personnes et par un petit nombre dehors. Les personnes endormies se réveillent. Quelques personnes sortent en courant. Les bâtiments entre en vibrations. Les objets suspendus oscillent fortement. La vaisselle, les verres tintent. La vibration est forte. Quelques objets lourds et instables se renversent. Les portes et les fenêtres s'ouvrent ou se ferment.
<b>VI</b>	Légers dégâts	Ressenti par la plupart des personnes à l'intérieur et par beaucoup dehors. De nombreuses personnes sont effrayées dans les bâtiments et courent vers les sorties. Les objets tombent. De légers dégâts apparaissent dans les bâtiments ordinaires : petites fissures dans les plâtres, chute de petits morceaux de plâtre ...
<b>VII</b>	Dégâts	La plupart des personnes sont effrayées et courent vers les sorties. Les meubles sont déplacés et de nombreux objets tombent des étagères. Un grand nombre de bâtiments ordinaires sont endommagés : petites fissures dans les plâtres, chute partielles de cheminées ...
<b>VIII</b>	Dégâts importants	Du mobilier peut être renversé. De nombreux bâtiments ordinaires sont endommagés : chutes de cheminées, larges fissures dans les murs et un petit nombre de bâtiments peuvent s'effondrer partiellement.
<b>IX</b>	Destructions bâtiments	Des monuments sont renversés. Destruction partielle de nombreux bâtiments ordinaires. Quelques bâtiments s'effondrent.
<b>X</b>	Nombreuses destructions	De nombreuses constructions s'effondrent.
<b>XI</b>	Destructions généralisées	La plupart des constructions s'effondrent.

<b>XII</b>	Destruction totale	Les constructions, à l'air libre ou en sous-sol, sont toutes fortement endommagées ou détruites.
------------	--------------------	--

*Adapté du résumé utilisé par le British Geological Survey (résumé original : Grünthal, G., (ed.), (1998). "European Macroseismic Scale 1998", Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie Volume 15, Luxembourg).*



