

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra

Faculté des Sciences Technologiques

Département : Génie Civil & Hydraulique



جامعة محمد خيضر بسكرة

جامعة محمد خيضر بسكرة

كلية العلوم التكنولوجية

قسم: الهندسة المدنية والري

# Eléments de sismologie

à l'usage des étudiants en master génie civil (Structures - Voies et ouvrages d'art - Géotechnique) ; Master hydraulique (Ouvrages hydrauliques) ; Master génie mine et master architecture.

Préparé par :

*Dr. Bensmaine Aissa*

Décembre 2019

## Sommaire

1. Introduction .....	1
2. Objectifs de la sismologie appliquée à la construction .....	2
3. Caractérisation générale des séismes .....	2
3.1. Origine des séismes .....	2
3.1.1. Les catégories des séismes .....	2
Les séismes volcaniques .....	3
Les séismes artificiels et d'effondrements .....	3
Les séismes tectoniques .....	3
3.1.2. Les séismes tectoniques .....	3
3.1.2.1. La structure interne de la terre .....	3
3.1.2.2. Cause des séismes tectoniques (Tectonique des plaques) .....	5
Les différents mécanismes de rupture des failles actives .....	8
Classification des séismes tectoniques .....	10
3.1.2.3. Distribution des séismes sur la planète terre .....	13
La ceinture Circumpacifique .....	13
La ceinture Alpin-himalayenne .....	13
La zone des dorsales océaniques .....	13
3.2. Caractérisation d'une source sismique (ou d'un séisme) .....	16
3.3. Echelles des séismes .....	18
3.3.1. Echelle d'intensité .....	18
3.3.2. Echelle de Magnitude .....	18
3.3.3. Enregistrement des séismes (Sismographe) .....	18
4. Les séismes enregistrés en Algérie .....	23
5. Les grands séismes enregistrés dans le monde .....	26
6. L'aléa (risque) sismique local .....	26
6.1. Effets directs du séisme .....	27
6.1.1. Le mouvement " au rocher " .....	27
6.1.2. Les bouleversements topographiques à grande échelle .....	28
6.1.3. Le jeu d'une faille en surface .....	28
6.2. Les effets du site .....	28
6.2.1. Les effets du site topographiques .....	28
6.2.2. Les effets du site liés à la structure et à la nature du sous-sol .....	28
6.3. Les effets induits .....	28
6.3.1. Liquéfaction des sols .....	28
6.3.2. Les tsunamis .....	29
7. Conclusion .....	31
Références bibliographiques .....	32

# Eléments de sismologie

## 1. Introduction :

Le terme « *tremblement de terre* » ou « *séisme* » désigne un ensemble de secousses, c'est-à-dire de mouvements vibratoires alternés et d'accélération associées, qui sont ressenties à la surface de la terre (croûte terrestre). Il provient de la fracturation des roches en profondeur de la planète terre. 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.

Lors de toute catastrophe naturelle, on se doit de protéger avant tout les vies humaines qui, près des lieux des désastres, courent un danger imminent. Cela implique à la fois une connaissance scientifique du phénomène ainsi que la maîtrise des moyens techniques pour y faire face, et une considération totale du problème. Comme les éruptions volcaniques et les raz de marée, les tremblements de terre sont des phénomènes naturels catastrophiques qui sont les plus incompris jusqu'à ce jour. Les sismologues et géophysiciens se livrent à des recherches toujours plus poussées pour caractériser la sismicité de la planète terre. L'objectif principal des études scientifiques concernant ce phénomène, a été toujours axé sur la protection des personnes et des biens. Ainsi, pour assurer cette protection, les méthodes existantes visent :

- D'une part, la *prévision et la prédiction* des séismes, mettant en œuvre des méthodes mathématiques diverses, visant à avertir les populations dans les zones à risques ;
- D'autre part, la *prévention*, qui consiste à concevoir des constructions (bâtiments, et ouvrages divers) pouvant résister aux secousses terrestres : c'est l'objet de la construction parasismique.

La combinaison de ces deux méthodes étant bien plus efficace. Ainsi, la connaissance des caractéristiques principales des séismes à l'échelle du globe, permet en passant à l'échelle locale : de délimiter les zones de risque sismique et d'introduire les notions de prévisions et de prédictions. Ces derniers éléments constituent les fondements de toute conception de protection parasismique, c'est-à-dire apte à s'opposer ou à résister aux effets des séismes.

Notons que dans l'état actuel des choses, il est question de prévoir et non de prédire la survenue d'un séisme. C'est à dire qu'on peut assez bien caractériser ce qui peut arriver dans une zone sismique, et lui associer une probabilité de survenance, mais *pas* encore dire *quand*. Ainsi on peut assez bien :

- définir la " violence " possible des séismes pouvant survenir sur les failles sismogènes, c'est à dire leurs magnitudes,
- établir la manière dont la distance va atténuer l'amplitude des oscillations,
- définir la manière dont un sol ou un site donné va modifier les oscillations qu'il reçoit, en les amplifiant éventuellement,

- définir la manière dont un sol peut voir ses caractéristiques mécaniques se dégrader (tassements, éboulements...) de façon inacceptable pour la sécurité des personnes et activités qui s'y trouvent.

Ce qui permettra de faire les bons choix en matière de construction, et en général d'aménagement du territoire.

## 2. Objectifs de la sismologie appliquée à la construction :

- Identification des sources sismiques pouvant concerner le site à construire. Estimation de l'énergie sismique pouvant arriver sur le site (Estimation de l'aléa sismique régional) ;
- Connaissance du comportement prévisible du site sous l'effet des séismes régionaux possibles (Estimation de l'aléa sismique local) ;
- Maîtrise de la réponse potentielle des bâtiments, viabilités et équipements aux mouvements prévisibles du sol ;
- Adoption de politiques d'allègement du risque sismique ;
- Traduction réglementaire des connaissances.

## 3. Caractérisation générale des séismes :

### 3.1. Origine des séismes :

#### 3.1.1. Les catégories des séismes :

Selon leur mode de génération, les séismes sont pratiquement classés comme suit :

Tableau 1 : les catégories des séismes

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

### Les séismes volcaniques :

Les séismes volcaniques se produisent en même temps que l'activité volcanique avec ou sans 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 ondes sismiques sont perçues dans des zones relativement réduites. En effet, ces séismes, même lorsqu'ils sont violents, sont peu agressifs pour les personnes 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 :

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

### Les séismes tectoniques :

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 extrêmement dévastateurs et entraînent des catastrophes parmi les pires que l'on connaisse.

## 3.1.2. Les séismes tectoniques :

Pour mieux comprendre les origines de cette catégorie de séismes, on doit examiner les parties essentielles de la structure interne de la planète terre :

### 3.1.2.1. La structure interne de la terre :

La planète terre est constituée d'une succession de couches de propriétés physiques différentes dépendant de la composition chimique, de la densité, de la température. La terre se subdivise, de son centre vers sa surface, en plusieurs couches concentriques de nature et d'épaisseur différentes (Fig.1) :

- Le **noyau** ( $T^\circ = 4\ 000$  à  $5\ 000^\circ\text{C}$ ) qui forme 17 % du volume terrestre, qui est constitué de fer et de nickel et qui est divisé en noyau externe visqueux et en noyau interne solide.
- Le **manteau** ( $T^\circ = 900$  à  $4\ 000^\circ\text{C}$ ) qui constitue 81 % du volume terrestre et qui comprend :
  - Le **manteau inférieur**, très rigide.
  - Le **manteau supérieur** dont la partie supérieure est solide et dont la partie inférieure, appelée *asthénosphère* est plastique,

### *La lithosphère :*

La lithosphère est une couche solide externe qui comprend une partie du manteau supérieur et la croûte terrestre (Fig.1), est divisée en plaques qui se déplacent les unes par rapport aux autres sous l'effet des courants de convection qui animent l'asthénosphère [couche plastique

(partie inférieure) du manteau supérieur]. Ces courants de convection dans l'asthénosphère sont générés par la forte chaleur du noyau.

La lithosphère se présente comme un ensemble rigide et par conséquent fragile ; la température et la pression, qui augmentent avec la profondeur, modifient ce comportement, qui devient de plus en plus ductile, c'est-à-dire capable de se déformer sans casser. Ce passage du domaine cassant au domaine ductile marque la *limite lithosphère-asthénosphère*.

➤ **La croûte terrestre (ou écorce terrestre) :** qui constitue moins de 2% du volume de la terre et qui est solide. On distingue deux types de croûte terrestre ( $T^{\circ} = 0$  à  $900^{\circ}\text{C}$ ) :

- la **croûte océanique** mince ( $\approx 7$  km), formée de roches basaltiques et qu'on nomme aussi *SIMA* (*Silicium-Magnésium*). C'est un socle rocheux "éphémère" produit par l'arrivée sur les dorsales océaniques du magma qui refroidit. Sous l'effet des déplacements des plaques tectoniques océaniques elle "retourne" fondre dans l'asthénosphère dont elle est issue ;
- la **croûte continentale** : qui se situe au niveau des continents. Ce sont des socles rocheux "originels" formés lors du refroidissement de la planète. Elle est plus épaisse ( $\approx 35$  km) et de plus faible densité, formée de roches granitiques à intermédiaires de densité variant de 2.7 à 3, et qu'on nomme aussi *SIAL* (*Silicium-Aluminium*).

➤ **La couverture sédimentaire :** est une mince pellicule de sédiments (dépôts de sols) produits et redistribués sur la surface de la croûte par les divers agents d'érosion (eau, vent, glace...) et qui compte pour très peu en volume.

Les sismologues *Mohorovicic* et *Gutenberg* ont donné leurs noms aux deux discontinuités importantes séparant croûte, manteau et noyau (Fig.2).

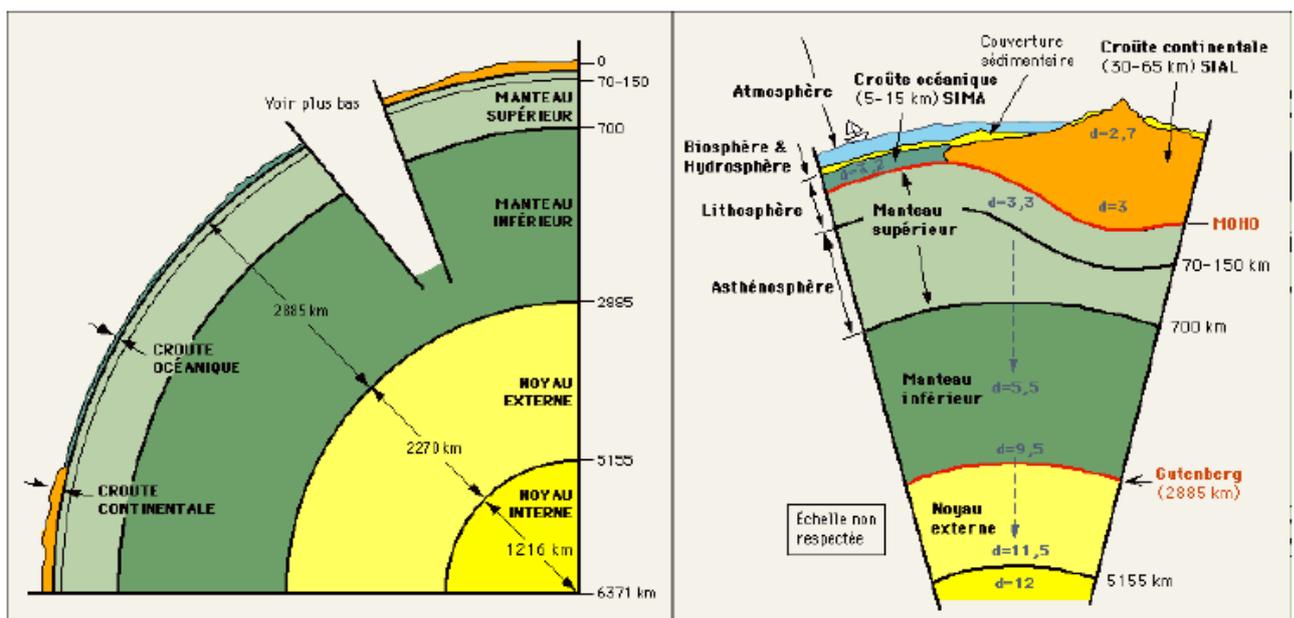


Figure 1 : Coupes schématiques sur la planète terre

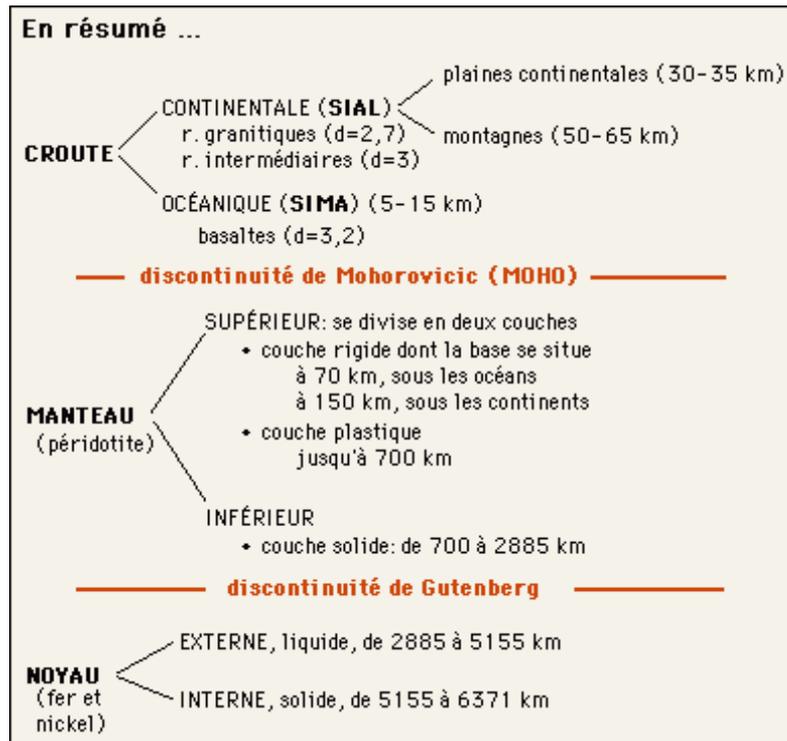


Figure 2 : Tableau synoptique de la composition de la planète terre

### 3.1.2.2. Cause des séismes tectoniques (Tectonique des plaques) :

Les plaques continentales et océaniques qui composent la croûte terrestre se déplacent à la surface de la planète sous l'effet des courants thermiques qui animent le magma visqueux situé en profondeur. Ce phénomène est étudié et connu sous le nom de " *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 (Fig. 3 et 9). 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 et deviennent par conséquent plus denses. Ils replongent alors vers les profondeurs pour s'y réchauffer à nouveau et ainsi de suite. Ces flux entraînent les plaques lithosphériques. Chaque plaque possède son mouvement horizontal propre, ce qui entraîne, au niveau des frontières, de mouvements relatifs d'éloignement, de convergence ou de coulissage.

Ces mouvements relatifs des dites plaques génèrent localement des " *contraintes croissantes* " de traction, de compression et de cisaillement respectivement à l'intérieur des roches qui les

constituent. Au-delà du niveau de contrainte admissible (limite de rupture) il y a rupture brutale du sous-sol rocheux : *séisme*.

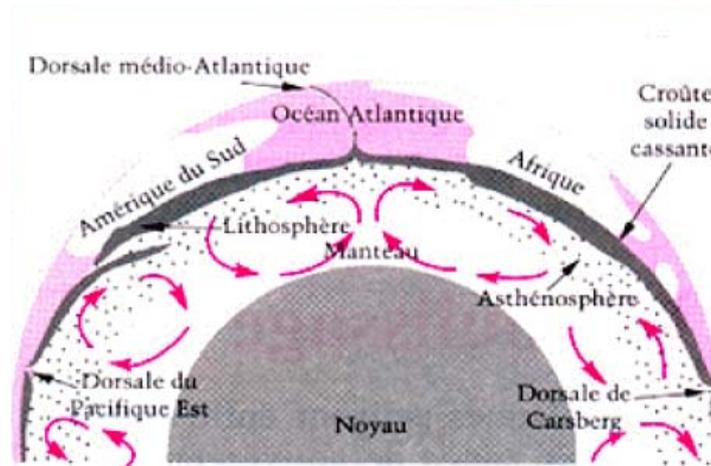


Figure 3 : les cycles de mouvements de convection

Ces ruptures se produisent essentiellement dans les zones situées à proximité des limites entre les plaques, là où les tensions sont les plus élevées dans les roches. 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 (ou frontières) 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 des plaques sont très importantes et se propagent 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. Seulement, les mouvements de ces fractures à long terme sont bien plus lents, et donc les séismes associés sont plus rares.

Comme n'importe quelle structure soumise à une contrainte croissante, trois stades de déformation affectent la croûte terrestre (Fig. 4) : élastique (réversible si on arrête la contrainte), plastique (irréversible même si on arrête la contrainte) et cassante (Fig. 5). Chaque système, pour un type de contrainte donné, a une courbe " contrainte-déformation " caractéristique. Ainsi, sous l'effet des contraintes dues le plus souvent aux mouvements des plaques tectoniques, la lithosphère accumule de l'énergie. Lorsqu'en certains endroits, la limite d'élasticité est atteinte et que le matériau ne peut pas plastifier (conditions physiques), il se produit une rupture sur un plan de **rupture** (ou plan de faille) qui **libère une partie de l'énergie accumulée : le séisme**.

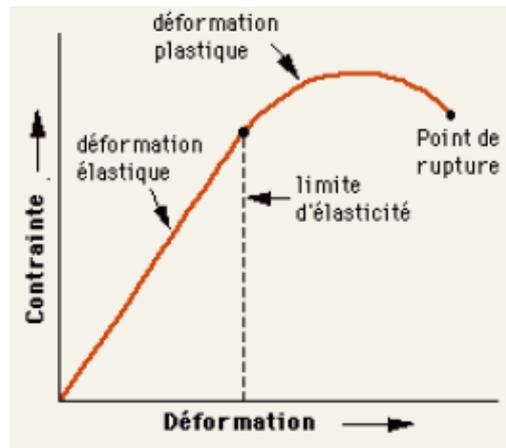


Figure 4 : Exemple de courbe contrainte-déformation

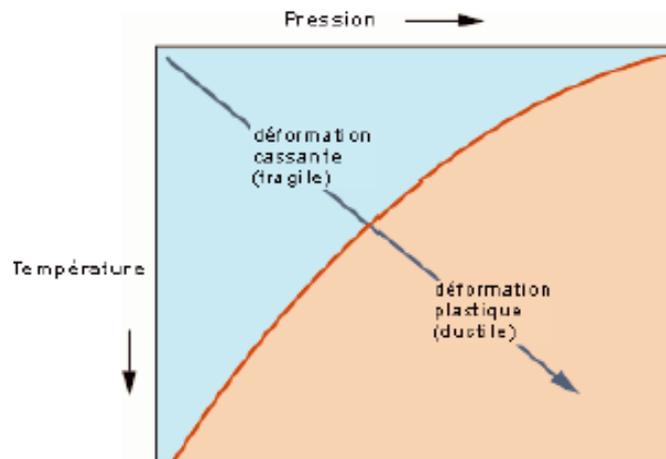


Figure 5 : Critères de déformation plastique et de déformation cassante : rupture.  
Courbe représentant l'influence des paramètres température et pression

### Déformation plastique des roches :

Ainsi, dans certains cas, les roches peuvent se déformer sans amorcer de rupture fragile :

- Déplacement tectonique lent,
- Température et pression interne élevée, sont des facteurs de plasticité (Fig.6).

### Déformation cassante des roches :

Lorsque les conditions nécessaires (niveau de contrainte, vitesse de déformation, relation température / pression) sont réunies, une rupture fragile de la roche peut survenir selon un " plan de faille ". *Le point d'amorce de la rupture est le foyer du séisme* (Fig.7).

*La propagation de la rupture depuis le foyer sur le plan de faille* provoque des déformations tectoniques irréversibles et cassantes. *La propagation des ondes sismiques (tridirectionnelle)* depuis le foyer provoque des déformations temporaires du sol (oscillations) et éventuellement définitives (effets induits comme les tassements de sol).

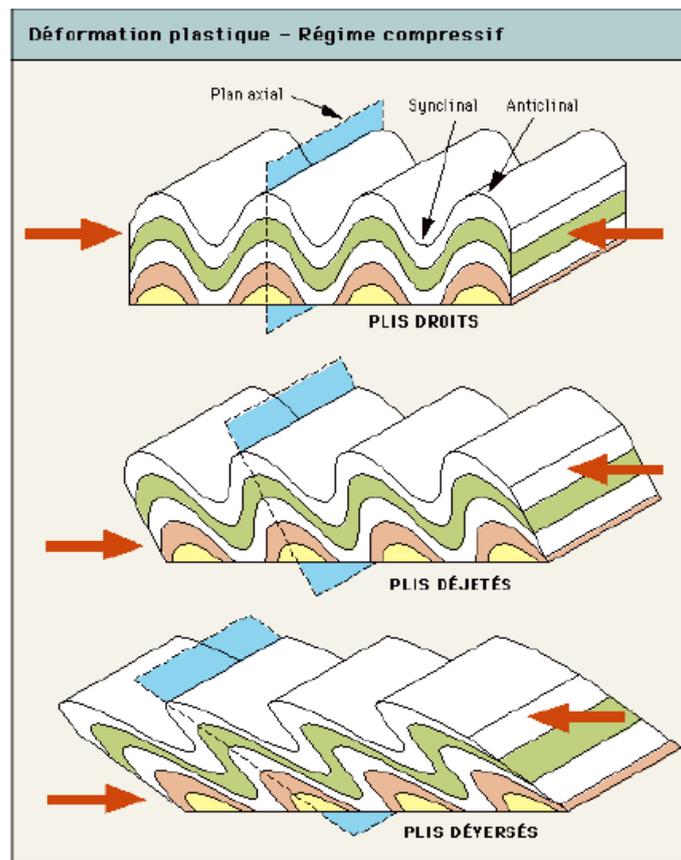


Figure 6 : Représentations schématiques de la déformation plastique des roches

### Les différents mécanismes de rupture des failles actives :

Les différents mécanismes des failles correspondent aux différents types de contraintes (Fig.8 et Fig.9). Or, la nature de la contrainte conditionne (avec d'autres paramètres) les cycles sismiques et les magnitudes possibles. En effet la roche résiste moins bien en traction qu'en cisaillement et qu'en compression. Ainsi une même roche soumise à une même vitesse d'accroissement de la contrainte rompra pour un niveau de contrainte plus ou moins élevé selon la nature de la contrainte. Ceci conditionnera donc un *cycle* plus ou moins rapide et des *magnitudes* plus ou moins fortes. L'identification des mécanismes des failles contribue à la compréhension et à la qualification de leur activité. Ainsi les arbitrages des politiques de prévention peuvent être pris pour chaque région en fonction de la gravité de l'exposition au phénomène sismique.

Les contraintes en traction ou en compression peuvent être associées à un cisaillement, on a alors un mécanisme composé. Un décrochement est "dextre" si, face à la faille, le déplacement se fait vers la droite, et "senestre" dans le cas contraire.

Cependant, dans la réalité, les déformations sont complexes et différents types de mouvement coexistent. Par exemple, les mouvements décrochant 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. 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'ensemble de séismes de magnitude inférieure observés avant et après, nommés respectivement **précurseurs** et **répliques**.

Il est à noter qu'on ne peut contrôler l'occurrence de la rupture fragile (séisme), même si la recherche vise à définir des probabilités de retour pour les différentes magnitudes possibles pour chaque faille ou réseau de failles.

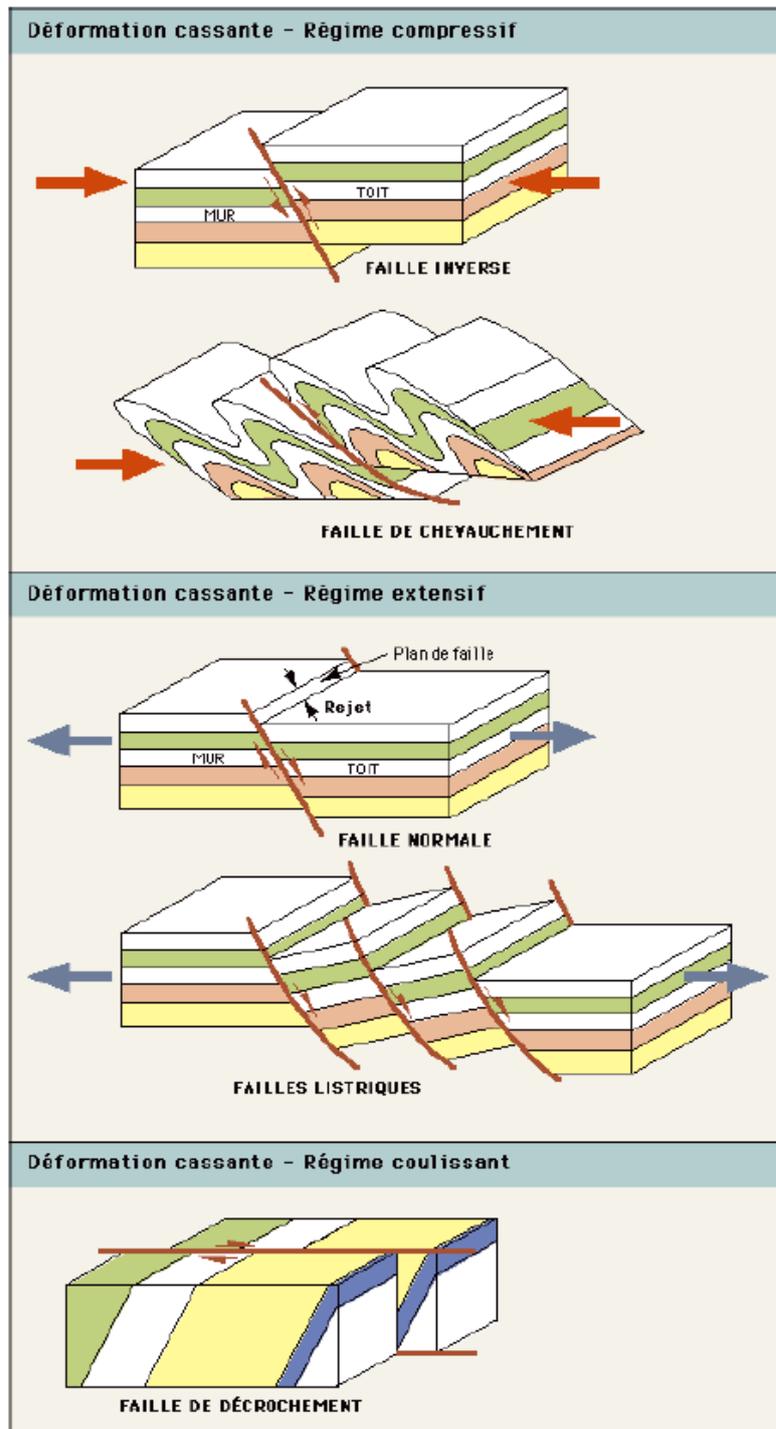


Figure 7 : Représentations schématiques des régimes de la déformation cassante des roches et des types de failles.

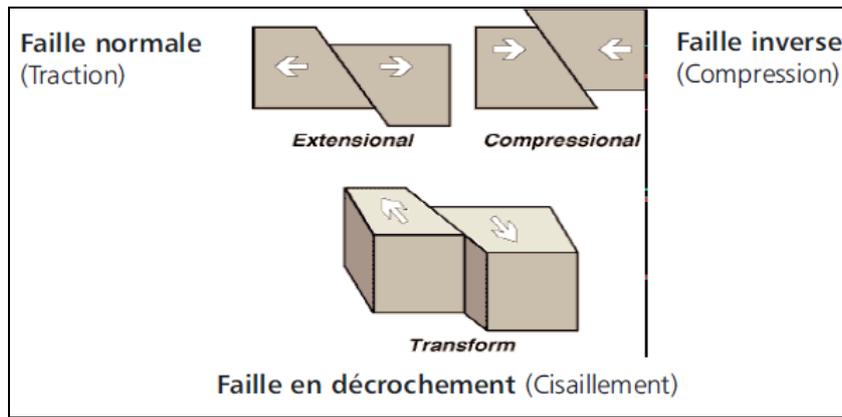


Figure 8 : Types de mécanismes des failles et des contraintes associées

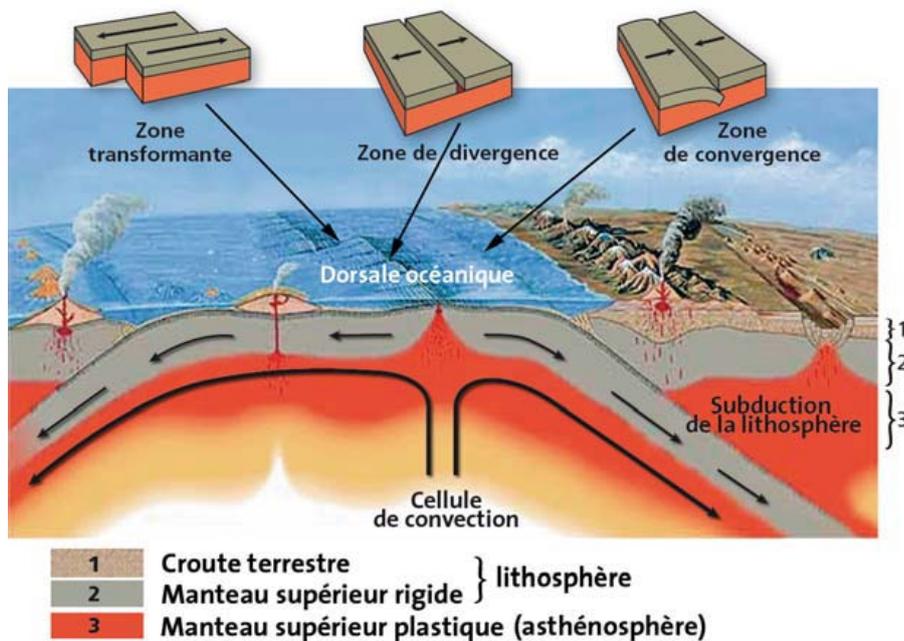


Figure 9 : Illustration des zones des différents types de mécanismes des failles

**Classification des séismes tectoniques :**

La **tectonique** est la partie de la géologie qui étudie la nature et les causes des déformations des ensembles rocheux, plus spécifiquement à grande échelle de la lithosphère terrestre. Une **plaque** est un volume rigide, peu épais par rapport à sa surface.

Les **plaques tectoniques** (Fig.10 et 11) sont en général " mixtes " et de tailles très variables : Les plaques continentales sont souvent associées dans leurs déplacements à un " morceau " de plaque océanique.

La **tectonique des plaques** est donc une théorie scientifique qui explique que les déformations de la lithosphère sont les conséquences des forces internes de la terre et que ces déformations se traduisent par le découpage de la lithosphère en un certain nombre de plaques rigides (Nombre = 13) qui bougent les unes par rapport aux autres en " glissant " sur l'asthénosphère.

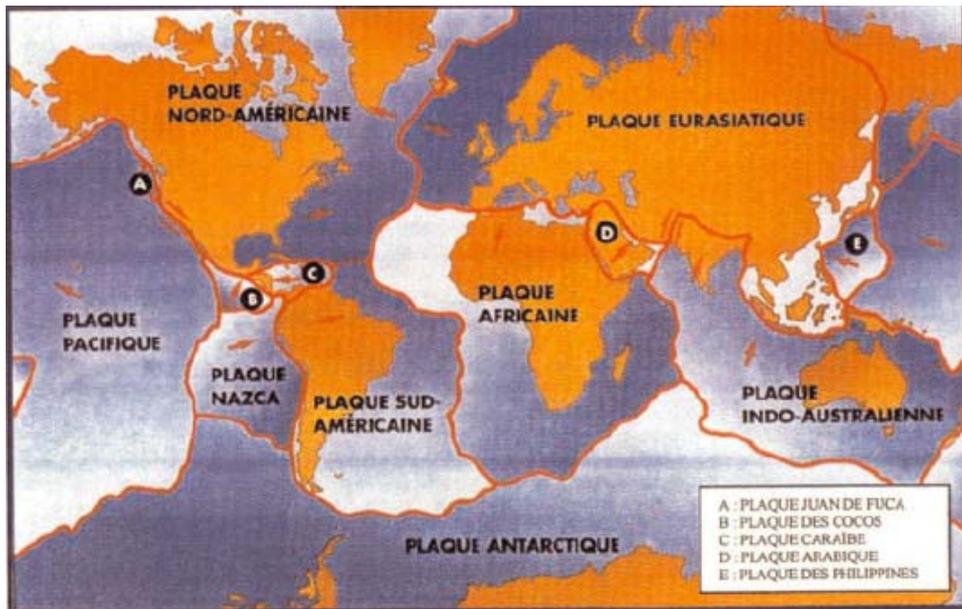


Figure 10 : Répartition des plaques tectoniques à la surface de la terre et sens du déplacement.

Ainsi, les séismes n'ont pas une répartition aléatoire à la surface de la planète, mais sont localisés pour leur immense majorité sur les frontières des plaques lithosphériques (Fig.11), ce qui facilite leur étude et la mise en place de politiques de prévention pour les régions très exposées.



Figure 11 : frontières des plaques lithosphériques.

### 1<sup>ère</sup> approche caractéristique : selon la profondeur de la source :

On peut en première approche classer les séismes selon la profondeur de leur source, qui peut dépendre du type de frontière. On distingue d'ailleurs trois classes de séismes :

#### • les séismes superficiels :

Les séismes superficiels 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 :

Les séismes intermédiaires se produisent entre 60 et 300 kilomètres de profondeur et se concentrent uniquement au voisinage des limites convergentes.

#### • les séismes profonds :

Les séismes profonds se produisent à des profondeurs pouvant atteindre plusieurs centaines de kilomètres (de 300 à 700 km...) par rupture sous l'effet de la pesanteur des plaques " plongeant " vers la base de l'asthénosphère. Ces séismes se trouvent exclusivement sur les limites convergentes. Très amortis, ils ne provoquent pas de désordres sur les constructions et communément, en matière de définition de l'aléa sismique régional on appelle " séismes profonds " les séismes intermédiaires.

### 2<sup>ème</sup> approche caractéristique : le type de frontière entre les plaques tectoniques :

Une deuxième approche pour classer les séismes consiste à comprendre leurs mécanismes, et le domaine tectonique qui leur est associé. C'est le long des limites entre plaques que l'activité sismique est la plus importante et que la caractérisation des domaines tectoniques doit être réalisée. Les mouvements relatifs entre les plaques définissent trois types de frontières entre elles (Fig.9 ; 11 ; et 12) :

- les **zones d'expansion** océanique, dans lesquelles naît de la croûte océanique,
- les **zones de subduction**, dans lesquelles disparaît du matériel crustal,
- les **zones transformantes**, le long desquelles couissent des plaques ou des fragments de plaques sans création ni résorption de croûte.

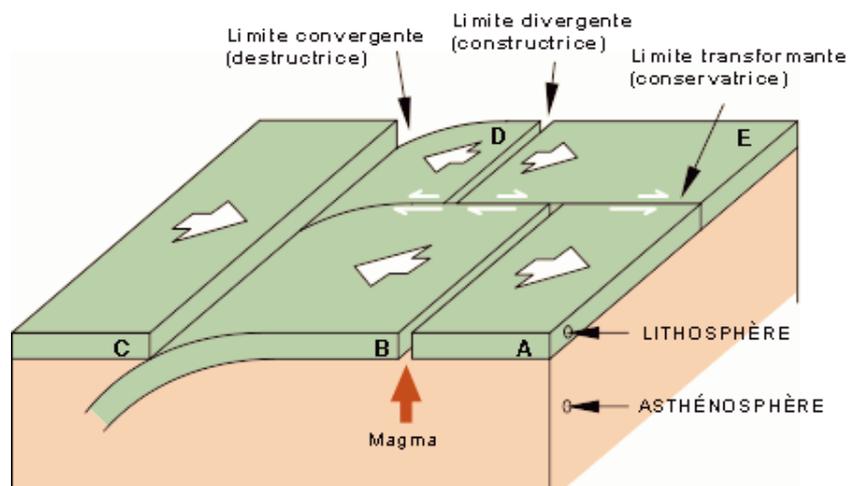


Figure 12 : Types de frontières entre plaques :

En se référant à la figure 12, on peut distinguer les frontières suivantes :

- 1) les **frontières divergentes**, là où les plaques s'éloignent l'une de l'autre et où il y a production de nouvelle croûte océanique ; entre les plaques A et B, et entre D et E (Fig.12) ;
- 2) les **frontières convergentes**, là où deux plaques entrent en collision, conséquence de la convergence ; entre les plaques B et C, et entre D et C (Fig.12) ;
- 3) les **frontières transformantes**, lorsque deux plaques glissent latéralement l'une contre l'autre, le long de failles ; ce type de limites permet d'accommoder des différences de vitesses dans le déplacement de plaques les unes par rapport aux autres, comme ici entre A et E, et entre B et D, ou même des inversions du sens du déplacement, comme ici entre les plaques B et E (Fig.12).

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 ou 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%.

### 3.1.2.3. Distribution des séismes sur la planète terre :

Les tremblements de terre se produisent dans les régions actives du point de vue géologique (zones de subduction), les zones des dorsales océaniques et les régions de formation de chaînes de montagnes. Ils se localisent dans les zones de limites des plaques tectoniques (frontières des plaques). Les zones où se produisent fréquemment des séismes sont dites ceintures sismiques. On connaît trois principales ceintures sismiques à la surface de la Terre (Fig. 13 ; 14 et 15) :

- **La ceinture Circumpacifique :**

C'est la zone qui entoure l'océan pacifique. C'est la plus importante zone sismique à la surface de la Terre et libère plus de 80 % de l'énergie sismique de notre planète. Cette chaîne couvre le Chili, le Pérou, l'Amérique Central, la région des Caraïbes, le Mexique, Kamtchatka, le Japon, les Philippines, L'Indonésie, la Nouvelle Zélande.... Cette zone coïncide avec les zones de subduction et les foyers des séismes peuvent être profonds.

- **La ceinture Alpin-himalayenne :**

La ceinture Alpin-himalayenne comprend la bande plissée allant des Açores à la Birmanie en passant par l'Espagne, le Maroc, l'Algérie, l'Italie, la Turquie, l'Iran, le Nord de Inde et l'Himalaya. La majorité des séismes de cette ceinture sont superficiels.

- **La zone des dorsales océaniques :**

Des séismes sont localisés le long des dorsales océaniques. Ils sont en général imperceptibles étant donné qu'ils se produisent au milieu des océans.

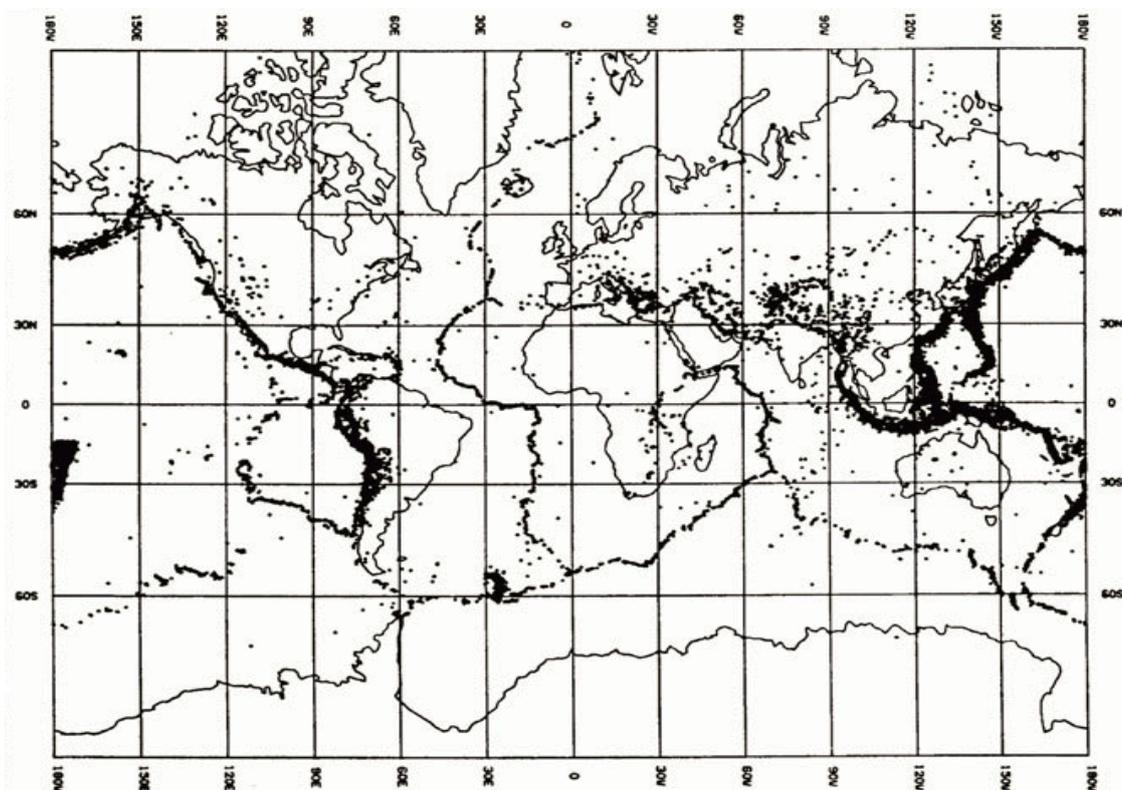
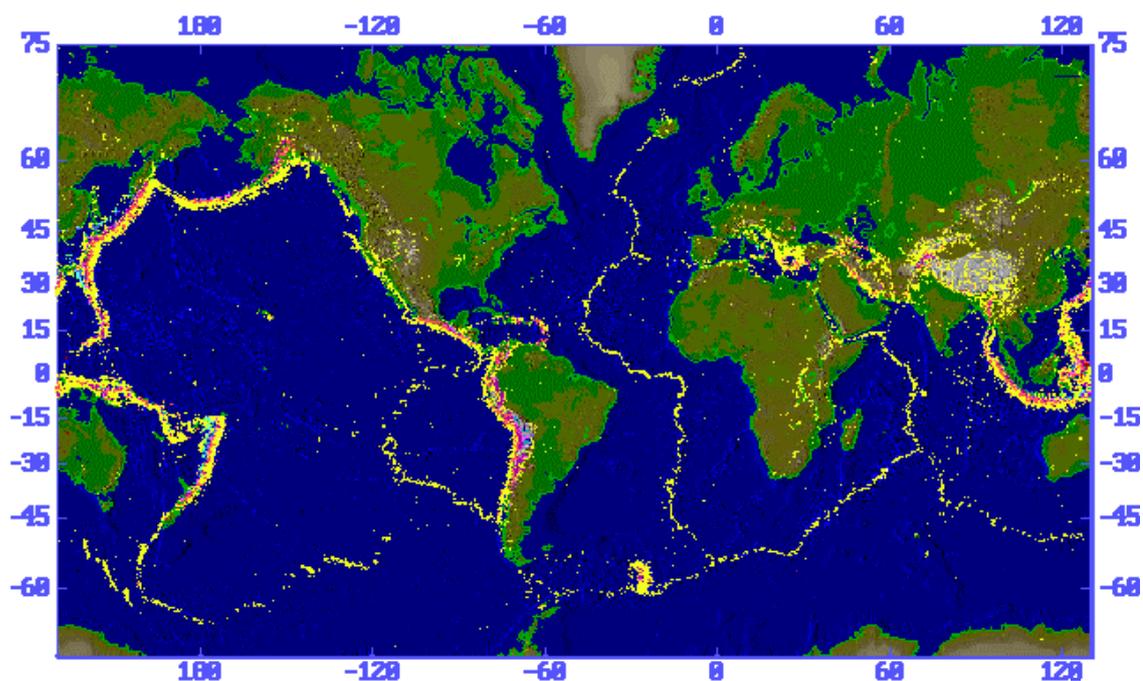


Figure 13 : Carte de la distribution des tremblements de Terre  
(Carte planisphère de sismicité)

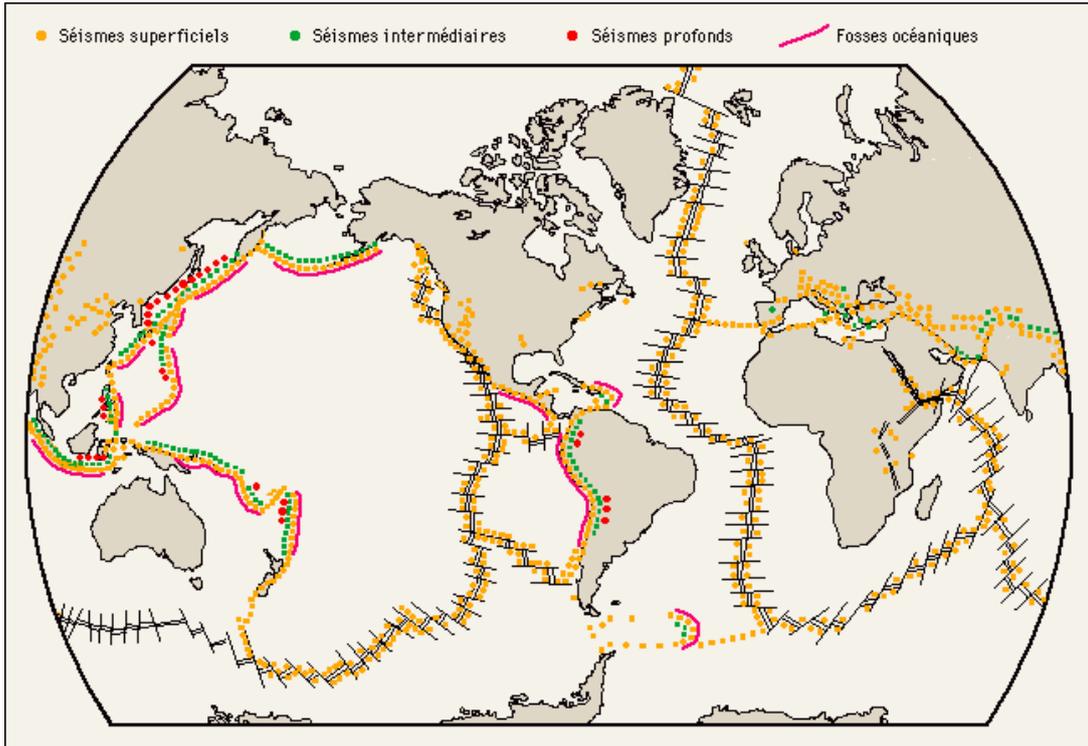


Figure 14 : Carte planisphère de corrélation entre la sismicité terrestre et les limites tectoniques

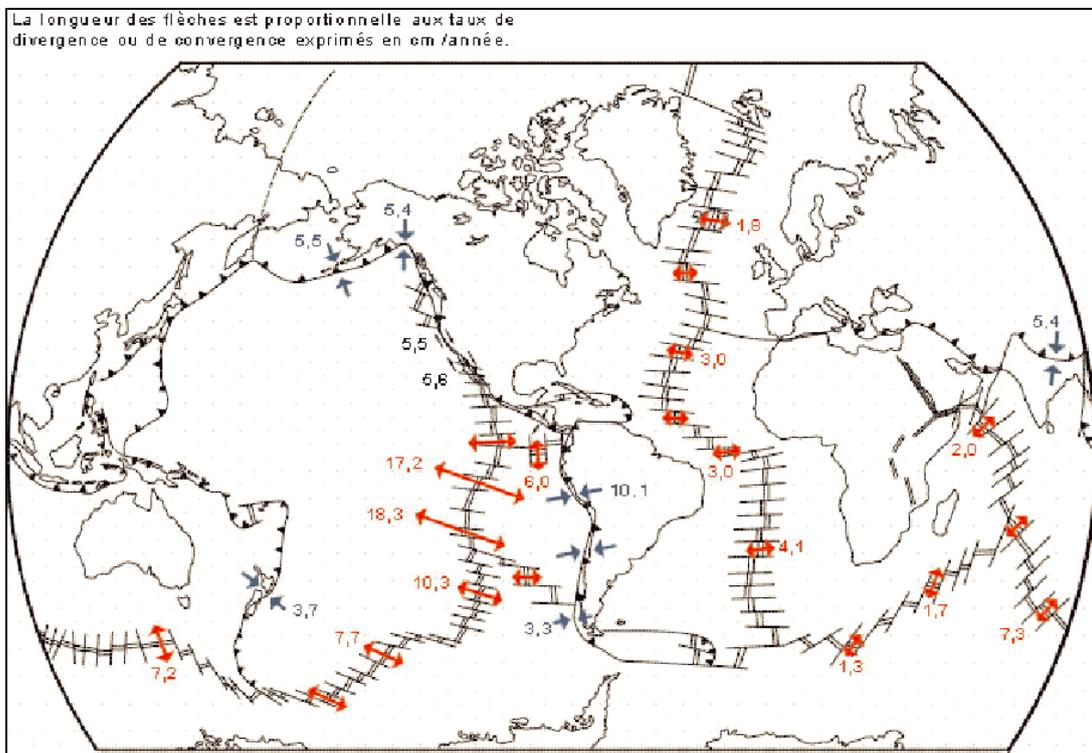


Figure 15 : Représentation schématique des mouvements tectoniques à la surface de la planète

### 3.2. Caractérisation d'une source sismique (ou d'un séisme) :

La chute de contrainte provoquée par la rupture brutale de la roche sur le plan de faille libère de l'énergie, sous forme de chaleur et d'émission d'ondes élastiques. Plus la surface de rupture et le déplacement sont importants, la quantité d'énergie libérée est plus importante. Les paramètres suivants définissent la source sismique (Fig.16), qui est le segment de la faille sismogène qui a rompu :

- **Foyer ou hypocentre** : lieu du plan de faille où commence la rupture (Point de déclenchement de la rupture).
- **Epicentre** : le point de la surface terrestre, situé verticalement au-dessus du foyer
- **Azimut de la faille** : Angle compris entre l'axe du méridien et celui de la faille (orientation de la faille).
- **Pendage de la faille** : Inclinaison de la faille.
- **Surface** : Surface du plan de faille concernée par la rupture (Longueur x hauteur).
- **Déplacement moyen** : Longueur du glissement de la roche de part et d'autre du plan de faille.
- **Magnitude** : Mesure de l'énergie libérée, dépend du " moment sismique ", donc de la rigidité du milieu, de la surface et du déplacement de la rupture.
- **Vitesse de rupture** : Vitesse de propagation de la rupture dans la roche, dépend du type de roche.
- **Chute de contraintes** : Différence entre l'état de contraintes dans la roche.
- **Isoséistes** : les lignes d'égalité de force (intensité) ou d'égalité d'accélération d'un tremblement de terre (Fig. 17).
- **L'intensité d'un séisme** : est définie en un lieu par rapport aux effets produits par ce séisme (effets et conséquences du séisme en un lieu donné) (Fig.16 et 18).

Notons que l'établissement des caractéristiques des sources sismiques possibles sur les failles identifiées fait partie des outils de la prévention.

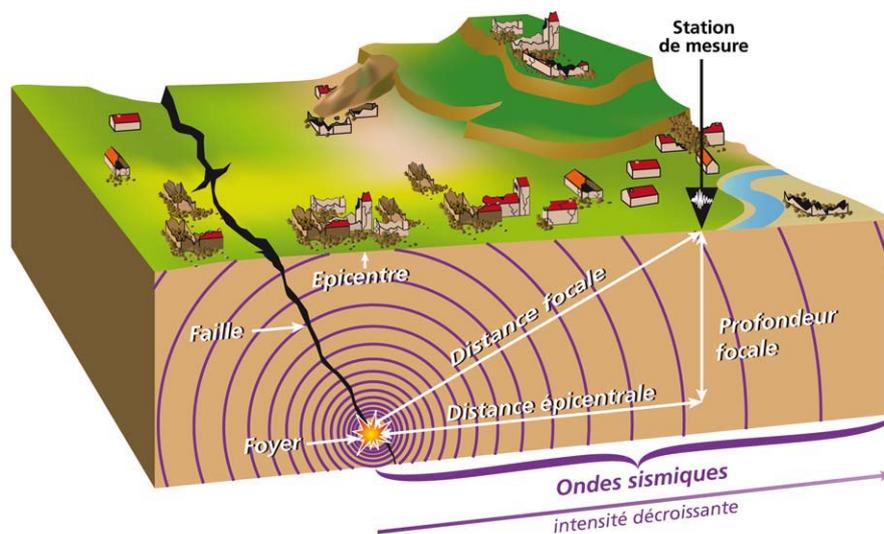


Figure 16 : Représentation schématique d'une source sismique

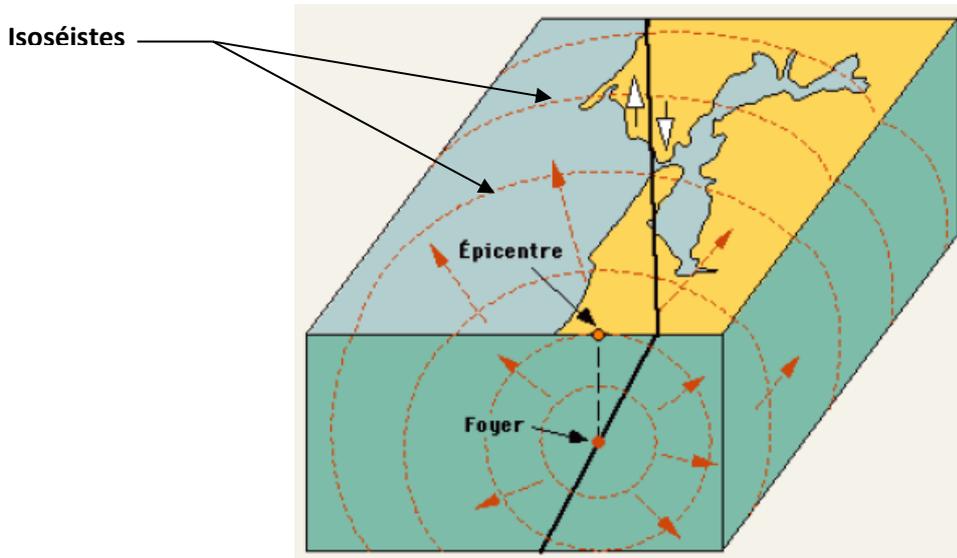


Figure 17 : Représentation schématique des isoséistes

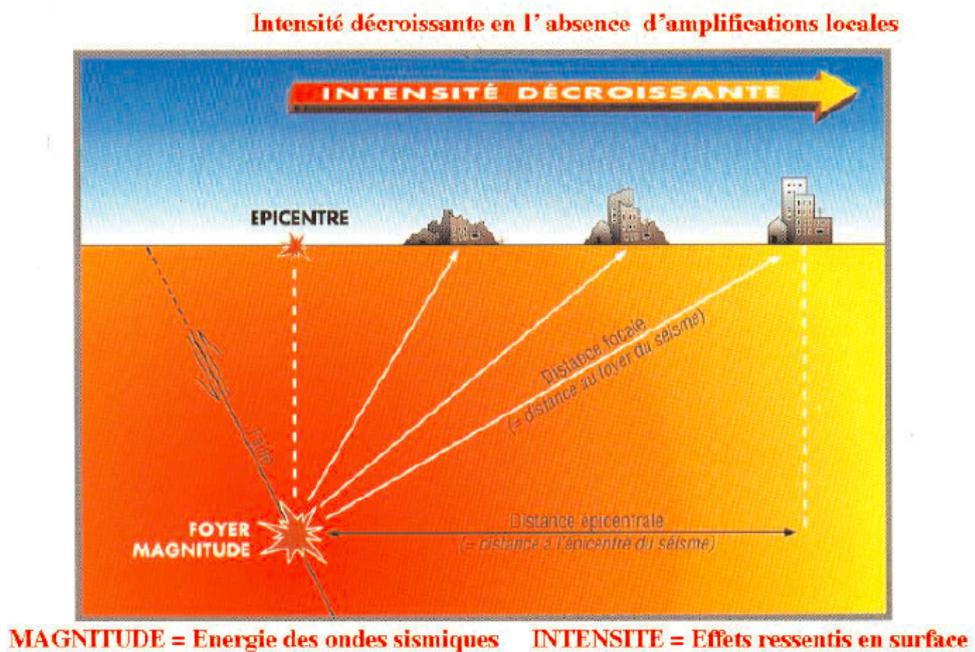


Figure 18 : Schéma symbolisant l'atténuation de l'énergie sismique avec la distance.

### 3.3. Echelles des séismes :

#### 3.3.1. Echelle d'Intensité :

L'intensité d'un séisme est une estimation approximative des dommages causés par un tremblement de terre aux constructions et vies humaines.

L'intensité était utilisée avant l'avènement des mesures instrumentales de la taille et de la force des séismes. Elle est basée sur l'échelle de *Mercalli* (1902) qui est graduée de **1** pour aucun dommage, à **12** pour une destruction totale (tableau 2). L'intensité dépend évidemment autant de la géologie que des activités anthropiques.

L'échelle de *Mercalli* (1902) a été précisée par la suite notamment par l'échelle de *Medvedev - Sponheuer - Karnik* en 1964 (aussi appelée échelle *MSK*) (tableau 3), puis par l'échelle macroséismique européenne [Européen *Macroseismic Scale (EMS)*] (1998), actuellement utilisée en Europe.

**Attention !** Il ne faut pas confondre *intensité* et *magnitude* :

- L'intensité est relative et dépend de la position du point d'observation par rapport au foyer ;
- La magnitude est un paramètre physique absolu qui quantifie l'énergie libérée ;
- Ex : un séisme de forte magnitude sera ressenti avec une forte intensité par l'observateur situé à proximité du foyer (et inversement) (Fig.18).

#### 3.3.2. Echelle de Magnitude :

La magnitude d'un séisme est une mesure instrumentale, introduite par *Richter* (1935), qui quantifie *l'énergie libérée*. La magnitude (tableau 4) est aujourd'hui principalement estimée à partir des mesures de l'amplitude des ondes de surface du séisme en fonction de la distance à l'épicentre à l'aide de la formule empirique suivante :

$$Ms = \log (A / T) + 1,66 \log (D) + 3,3$$

Avec :

- A* : amplitude de l'onde de surface ;
- T* : période de l'onde de surface ;
- D* : distance à l'épicentre.

**Attention :** la magnitude est une échelle logarithmique : un séisme de magnitude 6 est 10 fois plus fort qu'un séisme de magnitude 5 et 100 fois plus qu'un séisme de magnitude 4...etc.

Les valeurs de l'échelle de *Richter* et la description des différents niveaux des séismes ainsi que des effets correspondants ressentis sont indiqués dans le tableau 2. Les plus grandes magnitudes observées sont de l'ordre de 9 : (9,5 au Chili en 1960 et 9.3 à Sumatra en 2004).

#### 3.3.3. Enregistrement des séismes (Sismographe) :

Un **sismographe** (Fig. 19) est un appareil qui enregistre les mouvements (vibrations et ondes) créés par les tremblements de terre durant la durée du séisme. Un sismographe doit être attaché à la surface de vibration de la terre et vibre en même temps que cette surface. Les sismographes actuels, sont des instruments de très haute précision capables de détecter des mouvements extrêmement faibles de l'ordre de quelques microns par seconde.

Tableau 2 : Echelle Mercalli

## ECHELLE DE MERCALLI MODIFIEE (1931)

Intensité	Effets ressentis
I	Aucun mouvement n'est perçu.
II	Quelques personnes peuvent sentir un mouvement si elles sont au repos et/ou dans les étages élevés de grands immeubles.
III	A l'intérieur de bâtisses, beaucoup de gens sentent un léger mouvement. Les objets suspendus bougent. En revanche, à l'extérieur, rien est ressenti.
IV	A l'intérieur, la plupart des gens ressentent un mouvement. Les objets suspendus bougent, mais aussi les fenêtres, plats, assiettes, loquets de porte.
V	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.
VI	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.
VII	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.
VIII	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.
IX	Tous les immeubles subissent de gros dommages. Les maisons sans fondations se déplacent. Quelques conduits souterrains se brisent. La terre se fissure.
X	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.
XI	La plupart des constructions s'effondrent. Des ponts sont détruits. Les conduits souterrains sont détruits.
XII	Presque tout est détruit. Le sol bouge en ondulant. De grands pans de roches peuvent se déplacer.

Tableau 3 : Echelle M.S.K

Degrés	Dégâts observés	Magnitude équivalente
I	Secousse non perceptible. La secousse est détectée et enregistrée seulement par les sismographes.	< 3,4
II	Secousse à peine perceptible; quelques individus au repos ressentent le séisme.	3,5-4,2
III	Secousse faible ressentie de façon partielle. La vibration ressemble à celle provoquée par le passage d'un camion léger.	3,5-4,2
IV	Secousse largement ressentie. La vibration est comparable à celle due au passage d'un gros camion.	4,3-4,8
V	Réveil des dormeurs. Le séisme est senti en plein air.	4,9-5,4
VI	Frayeur. Le séisme est senti par la plupart des personnes aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur des habitations. Les meubles sont déplacés.	5,5 -6,1
VII	Domages aux constructions. Quelques lézardes apparaissent dans les édifices.	5,5 -6,1
VIII	Destruction de bâtiments. Les cheminées des maisons tombent.	6,2-6,9
IX	Domages généralisés aux constructions. Les maisons s'écroulent. Les canalisations souterraines sont cassées.	6,2-6,9
X	Destruction générale des bâtiments. Destruction des ponts et des digues. Les rails de chemin de fer sont tordus.	7,0 -7,3
XI	Catastrophes. Les constructions les plus solides sont détruites. Grands éboulements.	7,4-7,9
XII	Changement du paysage et bouleversements importants de la topographie. Les villes sont rasées.	> 8

Tableau 4 : Echelle de Richter

Description	Magnitude de moment	Effets	Fréquence moyenne à l'échelle du Globe
<b>Micro</b>	moins de 1,9	Micro tremblement de terre, non ressenti.	8 000 par jour
<b>Très mineur</b>	2,0 à 2,9	Généralement non ressenti mais détecté/enregistré.	1 000 par jour
<b>Mineur</b>	3,0 à 3,9	Souvent ressenti sans causer de dommages.	50 000 par an
<b>Léger</b>	4,0 à 4,9	Secousses notables d'objets à l'intérieur des maisons, bruits d'entrechoquement. Les dommages restent très légers.	6 000 par an
<b>Modéré</b>	5,0 à 5,9	Peut causer des dommages significatifs à des édifices mal conçus dans des zones restreintes. Pas de dommages aux édifices bien construits.	800 par an
<b>Fort</b>	6,0 à 6,9	Peut provoquer des dommages sérieux sur plusieurs dizaines de kilomètres. Seuls les édifices adaptés résistent près du centre.	120 par an
<b>Très fort</b>	7,0 à 7,9	Peut provoquer des dommages sévères dans de vastes zones ; tous les édifices sont touchés près du centre.	18 par an
<b>Majeur</b>	8,0 à 8,9	Peut causer des dommages très sévères dans des zones à des centaines de kilomètres à la ronde. Dommages majeurs sur tous les édifices, y compris à des dizaines de kilomètres du centre.	1 par an
<b>Dévastateur</b>	9,0 et plus	Dévaste des zones sur des centaines de kilomètres à la ronde. Dommages sur plus de 1 000 kilomètres à la ronde.	1 à 5 par siècle

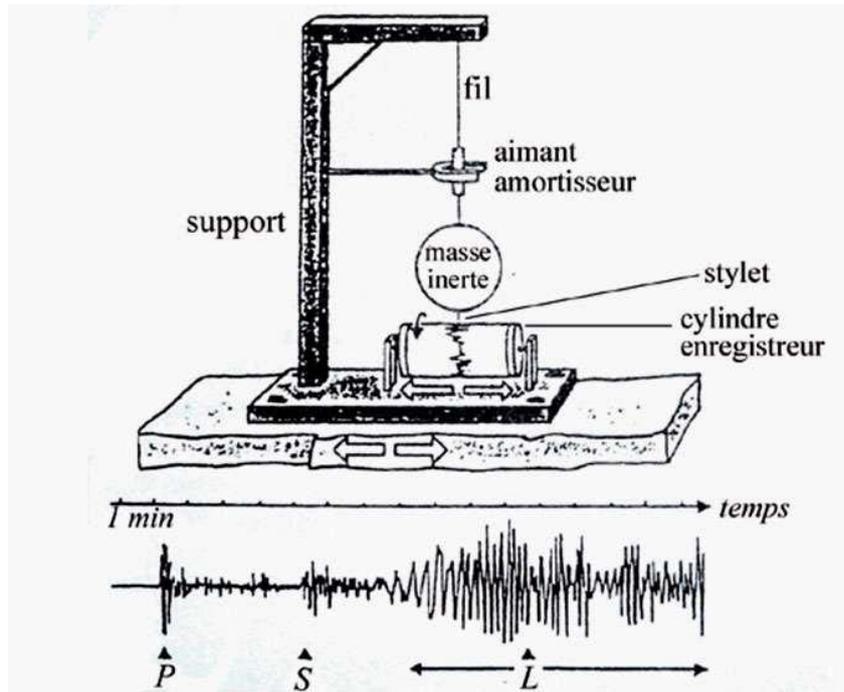


Figure 19 : Schéma simplifié et illustrant le principe de fonctionnement d'un sismographe. En bas, on distingue l'enregistrement (sismogramme) d'une série d'ondes : ondes P (ondes primaires), S (ondes secondaires) et L (ondes de surface ou ondes de Love).

Pour mesurer le mouvement vertical, les sismographes emploient une masse lourde supportée par un ressort. Le ressort est attaché au support qui est lui-même connecté à la terre. Lorsque la terre vibre, le ressort se comprime et se décomprime, mais la masse reste presque stationnaire.

Pour mesurer le mouvement horizontal, la masse lourde est suspendue comme une pendule qui oscille selon ses propres caractéristiques, tandis que le support reproduit le mouvement du sol provoqué par à une sollicitation sismique, - il y a un appareil pour mesurer les mouvements Est-Ouest et un autre pour mesurer les mouvements Nord-Sud-

Aujourd'hui, la plupart des sismographes sont électromagnétiques. Les mouvements du support, par rapport à l'aimant qui sert de masse, produisent des signaux qui vont être amplifiés par voie électronique et envoyés par satellite, ligne téléphonique ou radio aux réseaux de surveillance sismique.

La courbe dessinée par le sismographe s'appelle : **sismogramme** (Fig.19 et 20). En cas de séismes, plusieurs séries d'ondes vont parvenir coup sur coup au sismographe. Les premières sont les **ondes P**, dites **ondes primaires**. Ce sont les plus rapides. Celles qui suivent sont les **ondes S** ou **ondes secondaires**. Plus lentes, mais beaucoup plus violentes, ce sont elles qui créent en général le plus de dégâts. Arrivent enfin les **ondes dites de surface**, qui se propagent le long de la surface terrestre. La vitesse à laquelle ces ondes se déplacent dépend de la nature et du

type des roches traversées, mais elle varie généralement (pour les ondes P dans la croûte) de 3 à 8 km/s.

En connaissant la vitesse des ondes P et S et en mesurant la différence de temps entre l'arrivée de ces deux ondes, on peut calculer la distance entre le sismographe et l'épicentre. Et donc, par triangulation avec plusieurs sismographes, le lieu du séisme.

A partir de ces données, les sismologues pourront également déterminer la magnitude du séisme. Pour cela, ils vont tenir compte du type de sismographe utilisé, de la distance entre le séisme et la station d'enregistrement, de la profondeur du séisme et de la nature du sous-sol où se trouve la station d'enregistrement.

Toutes ces corrections vont permettre de dresser partout dans le monde la même carte d'identité du même séisme, avec son amplitude, sa localisation et sa magnitude. Et cela très rapidement. Quelques minutes seulement après un séisme majeure, et avant même d'en savoir plus sur ce qui s'est passé sur le terrain, les observatoires sismologiques vont être capables de donner une magnitude (ou au moins une fourchette de magnitude). Cette rapidité de diagnostic est capitale, car c'est elle qui va permettre d'évacuer très vite les lieux concernés, surtout si un tsunami menace.

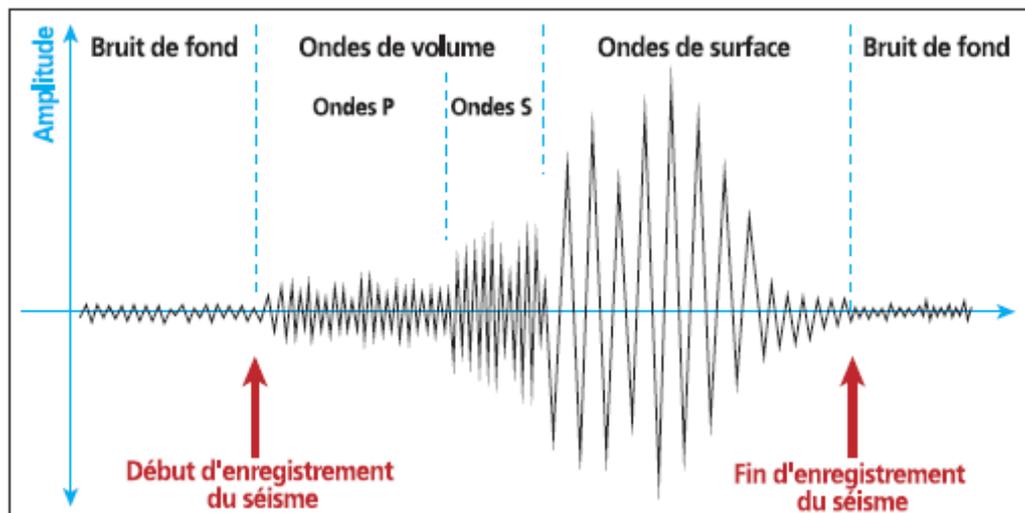


Figure 20 : Enregistrement (sismogramme) d'une série d'ondes : ondes P (ondes primaires), S (ondes secondaires) et L (ondes de surface ou ondes de Love).

#### 4. Les séismes enregistrés en Algérie :

Les séismes en Algérie sont concentrés principalement dans la partie nord de l'Algérie (littorale), plus précisément dans la région tellienne (Atlas tellien). Une partie de ces séismes sont survenus au large de l'Algérie en mer Méditerranée, indiquant que cette zone maritime est également active. Vu que l'Algérie (Nord du continent Africain) est située sur la plaque tectonique Africaine, et le nord Algérien est adjacent à la limite entre les deux plaques Africaine et Eurasiatique (Fig. 10 et 11). L'activité sismique en Algérie est générée par les mouvements de convergence (rapprochement) entre ces deux plaques tectoniques. Actuellement, en Algérie, les

principales failles actives montrent une activité associée à des chevauchements (cas de la faille de Chlef, de Tipasa, et de Boumerdès-Zemmouri).

L'historique des séismes en Algérie (Fig. 21) a révélé quatre zones majeures de sismicité : zone maritime, l'atlas tellien, les hauts plateaux et l'atlas saharien. Il a révélé que les hauts plateaux et l'Atlas Saharien sont caractérisés par une faible sismicité, par contre la zone maritime et l'atlas tellien sont caractérisés par une forte sismicité. La région tellienne est la plus exposée aux séismes modérés à faibles et parfois à de très forts séismes violents et destructeurs. Notons que la majeure partie de la population algérienne et des équipements socio-économiques et politiques du pays sont installés dans cette région tellienne.

Le plus puissant tremblement de terre de l'histoire enregistré en Algérie est celui qui s'est produit à Chlef (anciennement El-Asnam) le 10 octobre 1980. Sa magnitude a atteint 7,3 sur l'échelle de Richter. Ce séisme a fait 2600 morts et d'énormes dégâts matériels (70 % des bâtiments ont été détruits dans certaines zones). Les séismes les plus importants (magnitude supérieure à 6) en Algérie depuis plus d'un siècle (de 1910 jusqu'à 2019) sont donnés dans le tableau 5.

Tableau 5 : Les séismes les plus importants (Magnitude > 6) en Algérie de 1910 jusqu'à 2019.

Ville / Zone	Date	Magnitude	Nombre de victimes
Sour El Ghozlane	24/06/1910	M = 6,6	Inconnu
Nord de Chlef (anciennement El Asnam)	25/09/1922	M = 6,1	2 morts
Chlef (anciennement El Asnam)	09/09/1954	M = 6,7	1243 morts
Chlef (anciennement El Asnam)	10/10/1980	M = 7,3	2600 morts
Zemmouri (Boumerdès)	21/05/2003	M = 6,9	2300 morts

Le règlement parasismique algérien (RPA) (1999) modifié et complété en 2003, recommande et définit Cinq zones en Algérie en fonction de l'importance de la sismicité (Fig. 22) : **Zone 0** : sismicité négligeable ; **Zone I** : sismicité faible ; **Zone II a & Zone II b** : sismicité moyenne ; et **Zone III** : sismicité élevée.

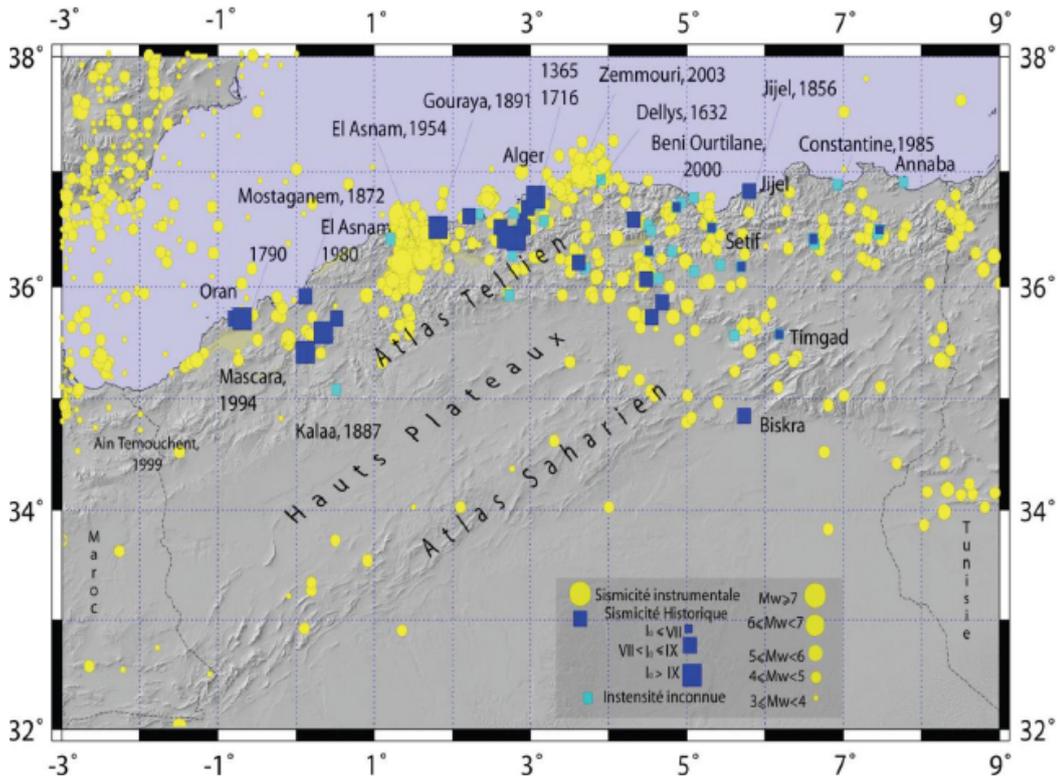


Figure 21 : Carte de la sismicité historique de 1359 à 1895 (Harbi, 2006) avec la sismicité instrumentale du Nord de l’Algérie de 1900 à 2005 [D’après Benouar (1995) et ISC (International Seismological Center)].

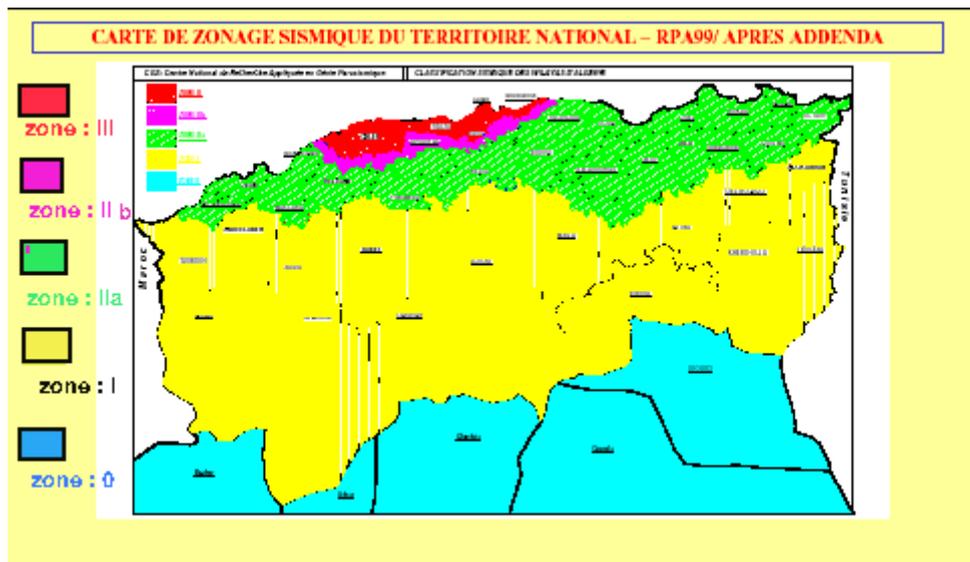


Figure 22 : Carte de zonage sismique de l’Algérie [D’après le C.G.S (Centre National de Recherche appliquée en Génie Parasismique) (2003)].

## 5. Les grands séismes enregistrés dans le monde :

Le plus puissant et violent tremblement de terre de l'histoire enregistré dans le monde est celui qui s'est produit au Chili (Amérique du sud) le 22 mai 1960. Sa magnitude a atteint 9,5 sur l'échelle de Richter, il est classé dans la catégorie des mégaséismes ( $M > 8,5$ ). Il a fait 3000 victimes. Les tremblements de terre les plus meurtriers dans le monde ces vingt dernières années sont donnés dans le tableau 6.

Tableau 6 : les séismes les plus meurtriers dans le monde ces vingt dernières années.

Ville / Zone	Pays	Date	Magnitude	Victimes
Bhuj	Inde	26/01/2001	M = 7,7	20 085 morts
Bam	Iran	26/12/2003	M = 6,6	26 200 morts
Sumatra	Indonésie	26/12/2004	M = 9,3	232 000 morts
Muzaffarabad	Pakistan	08/10/2005	M = 7,6	79 410 morts
Sud du pays et Lima	Pérou	15/08/2007	M = 7,7	900 morts
Province de Sichuan	Chine	12/05/2008	M = 7,9	87 149 morts
Sumatra	Indonésie	30/09/2009	M = 7,6	1 100 morts
Port-au-Prince	Haïti	12/01/2010	M = 7,2	230 000 morts
Concepción	Chili	27/02/2010	M = 8,8	524 morts
Province de Qinghai	Chine	14/04/2010	M = 6,9	3000 morts
Région de Tohoku	Japon	11/03/2011	M = 9,1	19 000 morts
Province de Van	Turquie	23/10/2011	M = 7,2	600 morts
Province de Yunnan	Chine	03/08/2014	M = 6,1	600 morts
Région de Katmandou	Népal	25/04/2015	M = 7,9	8000 morts

## 6. L'aléa (risque) sismique local :

Une fois défini l'aléa sismique régional du site à construire, et avant même d'entreprendre la phase " esquisse " du projet, il convient, en zone de risque sismique, de vérifier l'opportunité d'implantation du (des) bâtiment (s) sur le site retenu. En d'autres termes, de caractériser l'aléa sismique local. C'est obligatoire pour les ouvrages à risque spécial et souhaitable pour les autres. En effet, un séisme génère :

- **Des effets directs** : actions du sol sur les ouvrages, de type oscillatoire, jeu de la faille en surface.
- **Des effets du site** : modification sensible du signal par un site, pouvant amplifier les accélérations du sol pour certaines fréquences.
- **Des effets induits** : grands mouvements de sol ou d'eau pouvant agir sur les ouvrages :
  - déclenchement d'un phénomène latent par la mise en action des sols (chutes de pierres, glissements de terrain, éboulis, subsidence...)
  - genèse d'un phénomène lié au caractère ondulatoire du mouvement (liquéfaction des sols, tsunamis, seiches).

Les effets du séisme (Fig. 23) peuvent être plus ou moins destructeurs d'un lieu à l'autre, pour une même construction, parfois à quelques dizaines de mètres près. L'étude de l'aléa local permet ainsi de préciser la part du risque liée au site d'implantation. S'il peut être envisagé de répondre à l'action de type oscillatoire par des dispositions architecturales et constructives appropriées, il faut éviter absolument les conséquences des effets induits en agissant sur le phénomène avant le séisme (traitements adéquats des sols), ou en implantant le bâtiment hors zone d'effet induit.

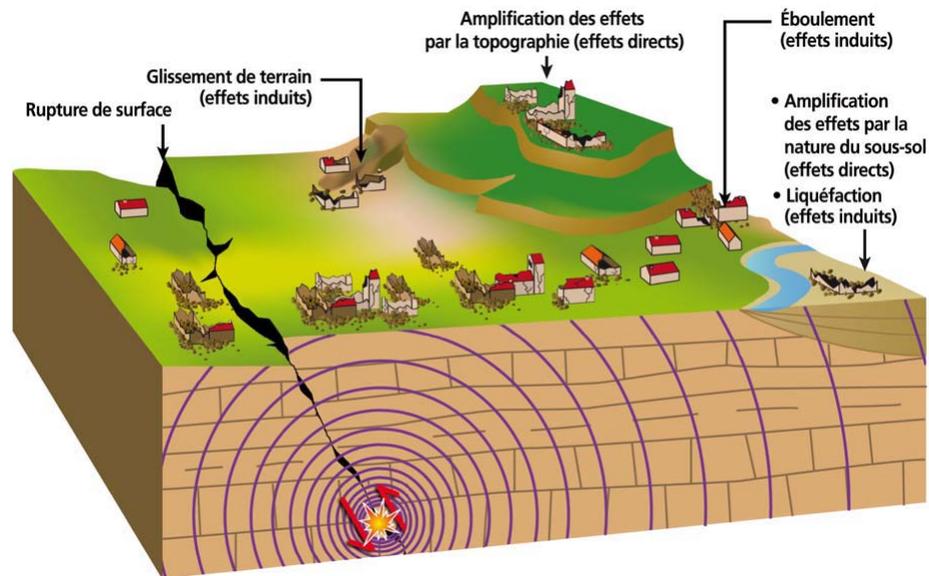


Figure 23 : Les effets du séisme

De même, il convient **de vérifier l'adéquation entre le programme et le site** :

- Le site lui-même peut ne pas aggraver la vulnérabilité potentielle d'un bâtiment, mais ses voies d'accès ou ses viabilités peuvent être très vulnérables. Ce qui n'est pas acceptable pour certaines classes de bâtiments qui ont une nécessité vitale de pérennité des viabilités et circulations, comme les hôpitaux ou les divers centres de secours par exemple ;
- Certains problèmes de sol d'implantation ne peuvent être identifiés qu'à la suite d'études géotechniques. D'autres peuvent être détectés par une simple observation du site sur place et/ou la lecture des cartes géologiques régionales. Il faut néanmoins prendre l'avis de spécialistes compétents afin de préciser l'aléa local.

## 6.1. Effets directs du séisme :

### 6.1.1. Le mouvement " au rocher " :

C'est le mouvement régional de référence (niveau d'accélération). Il est établi de façon déterministe ou probabiliste par les études d'aléa régional. Faute de mieux, on retiendra les valeurs réglementaires (spectres de réponse règlementaires) qui en tout état de cause sont les valeurs légales, même si les études montrent qu'elles sont souvent surestimées (ceci compense en général la possible sous-estimation des amplifications locales par des spectres de réponse réglementaires).

### **6.1.2. Les bouleversements topographiques à grande échelle :**

Heureusement assez rares, ces effets directs du séisme ne se produisent qu'en cas de séisme superficiel de magnitude très élevée. Les variations de niveau entre les " compartiments " situés de part et d'autre de la rupture ont atteint plusieurs mètres lors du séisme d'Alaska (1964). Le problème se pose pour les grandes agglomérations et ouvrages importants situés sur des sites tectoniques associés à ce type de conditions.

### **6.1.3. Le jeu d'une faille en surface :**

Le risque lié au jeu d'une faille en surface (déplacement visible du sol, de part et d'autre de la faille, en hauteur et/ou en longueur). Il doit être étudié précisément pour les ouvrages à risque spécial, et pour les bâtiments d'intérêt stratégique. Les constructions qui seraient implantées sur une faille jouant en surface verraient leurs fondations (et l'ensemble de la structure par conséquence) cisailées par ce déplacement pouvant atteindre plusieurs mètres dans certaines régions du monde !).

## **6.2. Les effets du 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 :

### **6.2.1. les effets du 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.

### **6.2.2. Les effets du 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 (dépôt de sol) récents.

## **6.3. Les effets induits :**

### **6.3.1. Liquéfaction des sols :**

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 totale de la résistance au cisaillement d'un matériau sableux saturé en eau, liée à une augmentation brusque de la pression interstitielle engendrée par les déformations cycliques (sismiques). C'est-à-dire que la pression de l'eau entre les grains (pression interstitielle) 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 (résistance nulle au cisaillement).

La déconsolidation brutale du milieu sol se traduit par la déstructuration du sol qui se liquéfie (perte totale de sa capacité portante), rendant particulièrement instables les constructions reposant sur ces formations. Les fondations peuvent s'enfoncer ou basculer (Fig.23), 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 état : peu compact ou lâche
- Leur cohésion : formations peu cohésives ;
- 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.



Figure 23 : Enfoncement et basculement des bâtiments à cause du phénomène de liquéfaction du sol survenu à Nigata (Japon) en 1964.

### 6.3.2. Les tsunamis :

Le raz de marée (qu'on appelle du nom japonais "**tsunami**" dans le Pacifique), constitue un phénomène particulièrement destructeur consécutif à un séisme. Il peut survenir plusieurs heures après le séisme, et à des milliers de kilomètres de l'épicentre. Les Tsunamis qui traversent le pacifique sont observés par satellite par les japonais qui lancent le cas échéant une alerte d'évacuation des rivages. Le schéma de la figure 24 illustre bien le mécanisme de ce phénomène.

Rappelons le séisme dévastateur, d'une magnitude de 9.3, survenu le 26 Décembre 2004 en Indonésie (au large de Sumatra), qui a provoqué un énorme tsunami dans l'océan Indien, faisant plus de 220 000 victimes en Indonésie, au Sri Lanka, en Thaïlande, en Birmanie, en Inde et dans

les Maldives. Et même la côte Est de l'Afrique a été touchée par ce tsunami six heures après le séisme.

En raison des importantes zones sismiques qui courent autour du Pacifique, les pays de la zone circumpacifique sont les plus menacés par les tsunamis.

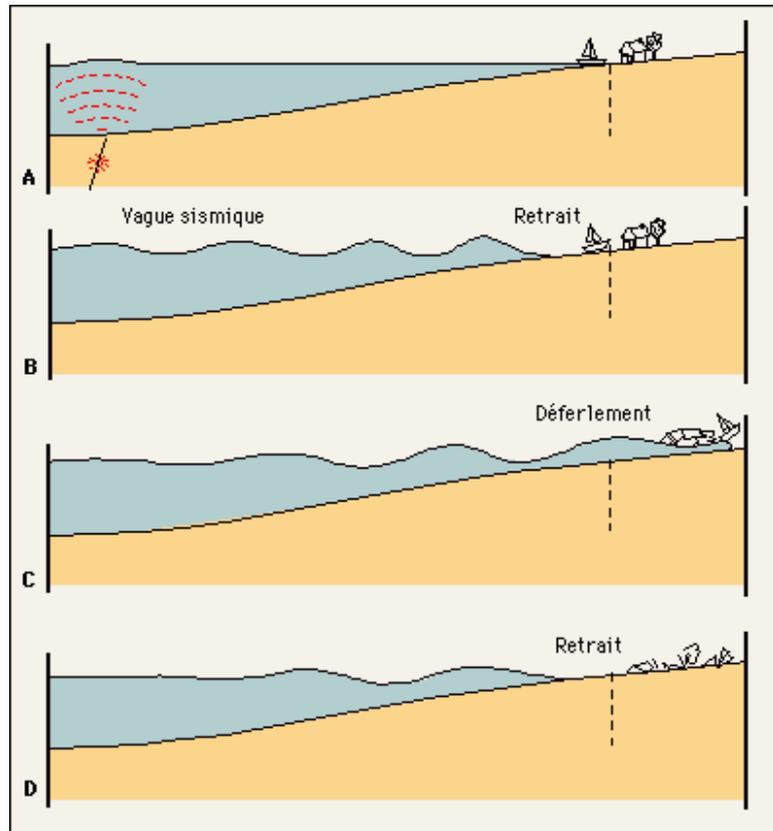


Figure 24 : schéma illustrant le mécanisme d'un tsunami (raz de marée) :

**(A)** Un séisme déclenché dans la croûte océanique engendre un mouvement oscillatoire de l'eau (vagues). Ces vagues sont à peine perceptibles en eau profonde (moins d'un mètre d'amplitude ou de hauteur), mais s'enflent en eau peu profonde pour atteindre des amplitudes (hauteurs) allant jusqu'à 30 m. La vitesse de propagation de ces vagues est de 500 à 800 km/heure 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 1000 km des côtes viendra frapper ces côtes deux heures plus tard. On peut aisément imaginer l'effet destructeur de telles vagues sur les côtes habitées. 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.

**(B)** A l'approche du raz de marée, il se produit d'abord un retrait de la mer (ce qui est de nature à attirer les curieux !).

**(C)** Vient ensuite la première vague.

## 7. Conclusion :

Les séismes sont des phénomènes naturels catastrophiques destructeurs et inévitables. Qui causent des pertes de vies humaines et des dégâts matériels considérables. Ils sont générés par l'activité des plaques tectoniques constituant la croûte de notre planète. Les déplacements relatifs et les chocs de ces plaques provoquent la rupture de la roche (faille) en libérant une énergie sous forme de chaleur et d'ondes élastiques (ondes sismiques). Ces ondes se propagent jusqu'à la surface de la terre et détruisent les constructions et peuvent même ravager partiellement ou complètement des villes. Les dégâts observés en surface (intensité du séisme) sont fonction de l'amplitude, la fréquence et la durée des vibrations sismiques. La mesure de l'énergie sismique libérée définit la violence ou la magnitude d'un séisme. Plus la magnitude est grande, plus le séisme est dévastateur.

Les séismes ou tremblements de terre sont des phénomènes naturels qui sont les plus incompris jusqu'à ce jour. L'objectif principal des études scientifiques concernant ces phénomènes, a été toujours axé sur la protection des personnes et des biens. En utilisant des méthodes de prévision et de prédiction visant à avertir les populations dans les zones à risques. Et des méthodes de prévention qui consistent à concevoir des constructions parasismiques.

Notons que dans l'état actuel des choses, il n'y a aucune technologie capable de prédire avec précision un séisme. Donc, il est question de prévoir et non de prédire la survenue d'un séisme. C'est à dire qu'on peut assez bien caractériser ce qui peut arriver dans une zone sismique, et lui associer une probabilité de survenance, mais pas encore dire quand.

En observant les dégâts et désastres causés par les séismes survenus, on ne peut pas considérer le séisme comme une curiosité scientifique mais plutôt comme un véritable ennemi redoutable et imprévisible. Toutefois, les lieux où nous construisons, les leçons que nous en tirons et notre façon d'agir font toute la différence.

Donc, les études et la compréhension des séismes et leurs divers effets sont indispensables pour le développement des systèmes fiables d'avertissement des populations dans les zones à risques et pour la mise en place d'une stratégie efficace de construction parasismique des villes situées dans les régions sismiques. Aussi, d'une politique et d'un plan d'urgence efficaces de gestion de crises dans les zones sinistrées.

**Références bibliographiques :**

- Baddari, K. (1994). Eléments de sismologie. OPU Alger 1994, 466 P.
- Bath, M. Introduction to Seismology. Wissenschaft und Kultur, Band 27. Birkäuser
- Benouar, D. (1994). The seismicity of Algeria and the Maghreb during the twentieth century (Doctoral dissertation, Ph. D. dissertation, Imperial College London, UK).
- Bernard, P. (2012). Qu'est-ce qui fait trembler la Terre?-À l'origine des catastrophes sismiques: À l'origine des catastrophes sismiques. EDP sciences.
- Filiatrault, A. (1996). Éléments de génie parasismique et de calcul dynamique des structures. Presses inter Polytechnique.
- Filiatrault, A., & Prat, M. (1997). Éléments de génie parasismique et de calcul dynamique des structures. Revue Française de Génie Civil, 1(2), 372-373.
- Harbi, A. (2006). Evaluation de l'Aléa Sismique en Algérie du Nord par la Modélisation de l'Input Sismique dans les Zones Urbaines et l'Etablissement d'un Catalogue (Doctoral dissertation, Alger).
- Pecker, A. (2011). Dynamique des structures et des ouvrages. Ecole des Ponts-ParisTech, Edition.
- Pecker, A. (Ed.). (2008). Advanced earthquake engineering analysis (Vol. 494). Springer Science & Business Media.
- Règlement parasismique Algérien 99 modifié et complété en 2003 [C.G.S 2003 (Centre National de Recherche appliquée en Génie Parasismique)].
- Shearer, P. Introduction to Seismology. Cambridge University Press. 2006  
Verlag. 1973.
- Walker, B. Les Tremblements de Terre. La planète Terre. Editions Time-Life. 1983
- Zeghichi, L., Merzougui, A., & Mezghiche, B. (2005). Lecture Dans Le Règlement Parasismique Algérien. *Courrier du Savoir*, (06), 67-69.

**Sites internet :**

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Listes\\_de\\_s%C3%A9ismes](https://fr.wikipedia.org/wiki/Listes_de_s%C3%A9ismes)

<https://www.volcanodiscovery.com/fr/earthquake-monitor.html>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9isme>

<https://www.catnat.net/veille-catastrophes/veille-des-catastrophes-naturelles/veille-catastrophes-monde/220-seismes-monde>

<https://www.craag.dz/>

[https://www.craag.dz/evenement\\_sismologique.php](https://www.craag.dz/evenement_sismologique.php)

[https://www.google.com/search?q=sismologie&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwi1mO-Ww\\_zuAhVFKBoKHbN2DH8Q\\_AUoAXoEAcQAaw&biw=1366&bih=625#imgrc=9irhawGUI6KAdM](https://www.google.com/search?q=sismologie&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwi1mO-Ww_zuAhVFKBoKHbN2DH8Q_AUoAXoEAcQAaw&biw=1366&bih=625#imgrc=9irhawGUI6KAdM)

<http://bhernand.chez.com/jeunes.html>

[https://www.google.com/search?q=Harbi,+2006+historique+de+la+sismicite%C3%A9&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwj-IIDyzvzuAhVW3IUKHW1aDkkQ\\_AUoAXoECAQQAw&biw=1366&bih=625#imgrc=gsDJ2TreHSlt7M](https://www.google.com/search?q=Harbi,+2006+historique+de+la+sismicite%C3%A9&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwj-IIDyzvzuAhVW3IUKHW1aDkkQ_AUoAXoECAQQAw&biw=1366&bih=625#imgrc=gsDJ2TreHSlt7M)

[https://www.google.com/search?q=D%E2%80%99apr%C3%A8s+Benouar+\(1995\)+et+ISC+\(International+Seismological+Center\)%5D.&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjK68W2z\\_zuAhWGzIUKHcAEAY8Q\\_AUoAnoECAQQBA&biw=1366&bih=625#imgrc=gsDJ2TreHSlt7M](https://www.google.com/search?q=D%E2%80%99apr%C3%A8s+Benouar+(1995)+et+ISC+(International+Seismological+Center)%5D.&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjK68W2z_zuAhWGzIUKHcAEAY8Q_AUoAnoECAQQBA&biw=1366&bih=625#imgrc=gsDJ2TreHSlt7M)