

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement supérieur et de La Recherche*  
*Scientifique*

Université : **MOHAMED BOUDIAF M'SILA**

Faculté : **de Technologie**

Département : **Génie Civil**

Option : **structure**

## **Cours de Génie parasismique**

Module : Génie parasismique

Option : Structure

Niveau : 2ème Année Master

Présenté par: Dr MENASRI YUCEF

### **Objectifs de l'enseignement :**

Fournir aux étudiants des connaissances en Génie parasismique afin que le futur cadre soit capable d'utiliser les méthodes usuelles de calculs parasismiques en prenant du recul sur le règlement en vigueur (RPA 2024 et Eurocode 8-1).

## **Chapitre 1. Eléments de sismologie**

## 1.1 Introduction

Le séisme ou tremblement de terre constitue un phénomène géologique qui de tout temps a terrorisé les populations qui vivent dans certaines zones du globe, c'est le risque naturel majeur le plus meurtrier qui cause le plus de dégâts. De 1994 à 2004, les séismes ont fait plus de 80 000 victimes dans le monde.

La résolution des problèmes de la construction des ouvrages qui pourraient résister, dans une certaine marge admissible de sécurité à des secousses sismiques probables, ne peut se faire sans une bonne connaissance des caractéristiques du mouvement sismique.

## Causes des tremblements de terre

Un séisme ou tremblement de terre correspond à des vibration de la terre provenant de la fracturation ou rupture soudaine des roches de l'écorce terrestre (partie la plus superficielle du globe) , 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 .

### 1.3 Classification du séisme selon l'origine

On distingue trois catégories de séismes en fonction de leur origine : Tectonique, volcanique et artificielle.

#### 1.3.1 Origine Tectonique

Les séismes tectoniques sont les plus fréquents et les plus dangereux, ils posent des problèmes difficiles aux scientifiques chargés de découvrir les moyens pour les prévoir.

- **Séismes inter - plaques**

Dans la majorité des cas, les séismes se déclenchent en limite de plaques. C'est en effet au niveau de ces contacts que les contraintes occasionnées par la dérive des continents sont les plus fortes. Dans le monde, les zones les plus actives sont situées en Asie (Japon, Chine, Indonésie, Himalaya), au Proche-Orient (Turquie, Afghanistan), en Afrique du Nord (Algérie, Maroc) et en Amérique (Chili, Mexique, États-Unis).

**Séismes Intra - Plaque** Même à l'intérieur des plaques tectoniques, des failles peuvent jouer et occasionner des séismes, généralement moins violents que les précédents, ils correspondent à des réajustements des pressions dans la croûte terrestre.

### 1.3.2 Origine volcanique

Les éruptions volcaniques, autre phénomène associé à la tectonique des plaques, occasionnent une multitude de séismes et de microséismes. Ces derniers peuvent permettre de prédire l'imminence d'une éruption. Dans le cas d'une activité explosive, la magnitude du séisme peut être significative.

### 1.3.3 Origine artificielle

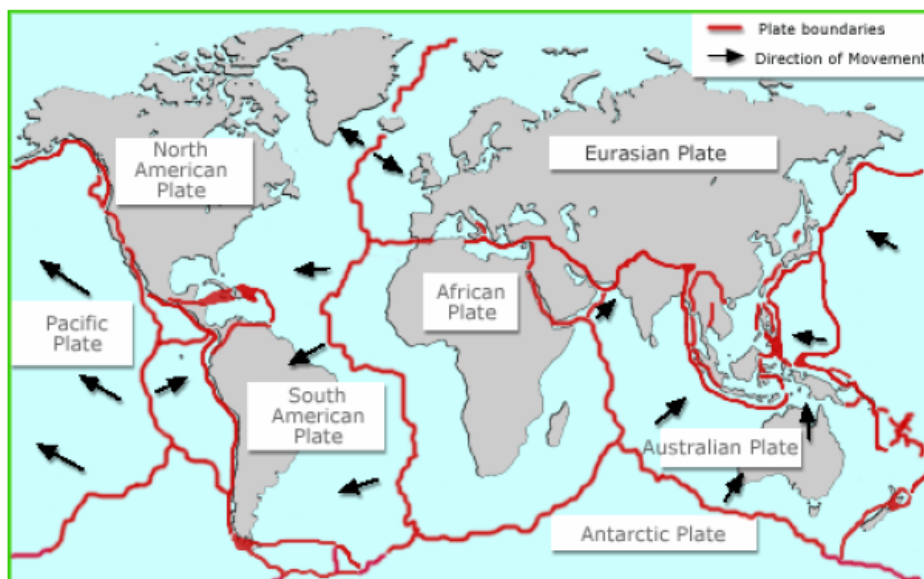
Certaines activités humaines peuvent occasionner des séismes, généralement modérés. Il s'agit notamment de la mise en eau des barrages ou de l'exploitation des gisements souterrains (gaz, minerais, etc.) .

## 1.4 Théorie de la tectonique des plaques terrestres

Le cadre scientifique qui a réellement permis de comprendre les phénomènes sismiques naturels est la théorie de la tectonique des plaques, apparue au début des années 1960 :

La croûte est divisée en « plaques tectoniques », les continents et les fonds marins qui se déplacent très lentement les uns par rapport aux autres sous l'effet des mouvements du magma. Quelques centimètres par an qui sont accumulés pendant des années, (voir figure 1.1).

Si l'on observe une carte de distribution géographique des séismes (voir figure 1.2), on remarque que cette distribution des séismes n'est pas hasardeuse mais elle suit une certaine logique. La majorité des séismes se produisent dans deux régions particulières du globe .



*Figure 1.1 Carte du monde montrant les principales plaques tectoniques*

## 1.5 Caractéristiques d'un séisme

Lorsqu'un séisme est déclenché, un front d'ondes sismiques se propage dans la croûte terrestre, il est Caractérisé (voir figure 1.2) par :

**1.5.1 Foyer (hypocentre)** Région de la faille où se produit la rupture et d'où partent les ondes sismiques.

On distingue trois classes de séismes selon la profondeur de leur foyer :

- les séismes superficiels : moins de 60 km de profondeur
- les séismes intermédiaires : entre 60 et 300 km de profondeur
- les séismes profonds : supérieur à 300 km de profondeur
- au delà de 700 km de profondeur, on considère qu'il n'y a plus de foyer sismique.

**1.5.2 Epicentre** : Point de la surface terrestre, à la verticale du foyer, et où l'intensité du séisme est la plus importante.

**1.5.3 Failles** : Sont des cassures de la lithosphère qui décalent deux compartiments situés initialement face à face, la figure 1.4 illustre les différents types de failles.

- **Faille normale**

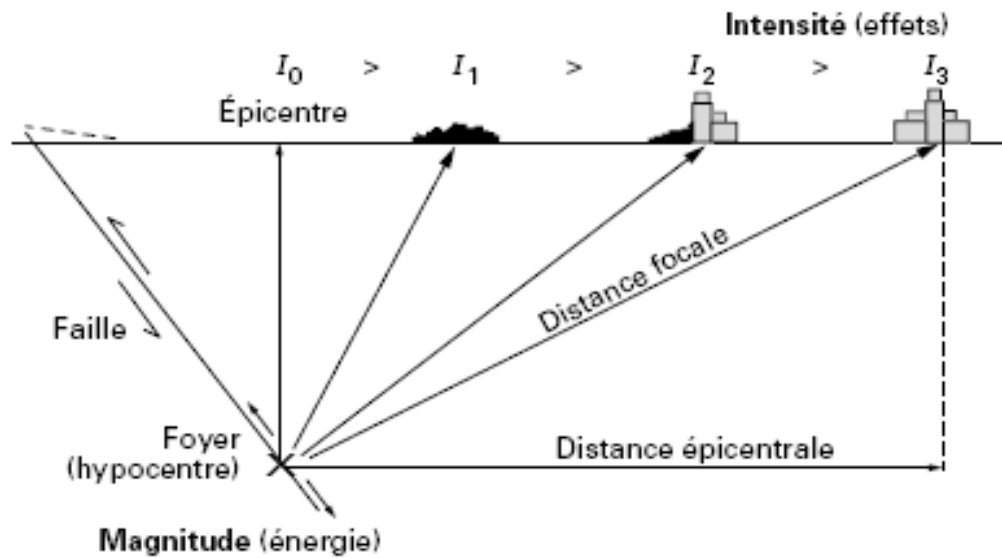
La surface des deux compartiments va devenir supérieure à ce qu'elle était avant le faillage. Le compartiment rocheux a été soumis à un effort d'étirement (extension)

- **Faille inverse**

Dans une faille inverse, un des deux blocs se déplace sur l'autre suite à un mouvement général de compression. Le résultat est un raccourcissement du bloc-diagramme.

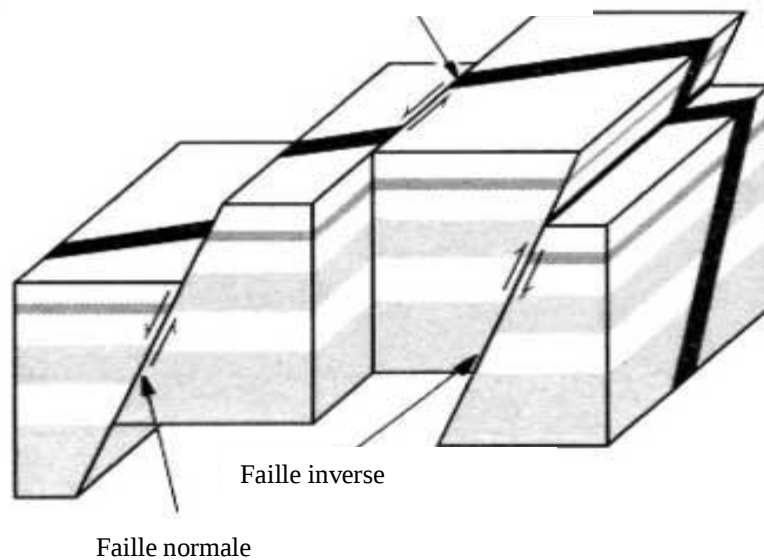
- **Faille à coulissage horizontal**

La cassure ici décale les deux compartiments dans le plan horizontal. Le compartiment rocheux est ici soumis à des efforts horizontaux différentiels.



*Figure 1.2 Principales caractéristiques d'un séisme.*

Faillle à coulissage horizontal



*Figure 1.3 Différents types des failles*

## Ondes Sismiques

Le séisme génère différents types d'ondes, aux effets différents sur les sols et les constructions générées par la rupture sur la faille, des ondes sismiques se propagent dans toutes les directions.

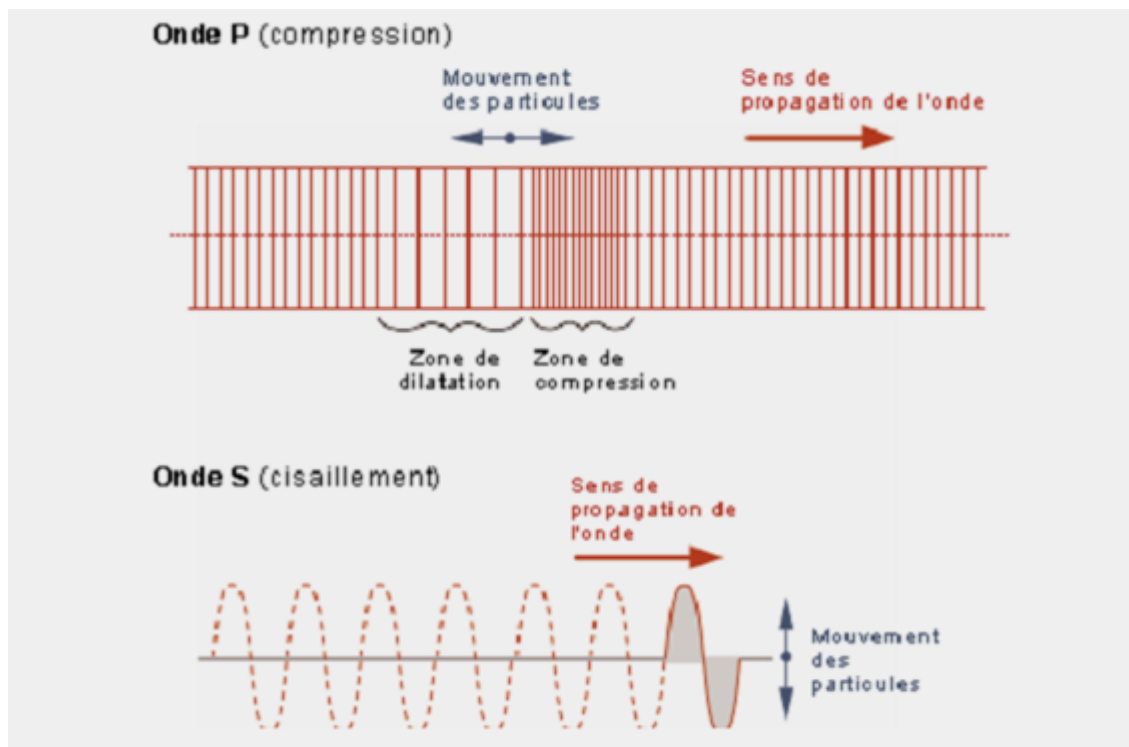
## Ondes de volume

Elles se propagent dans la masse terrestre depuis la source, elles sont réfléchies et/ou réfractées par les limites de couches de sol de densités différentes et par la surface.

Ce sont les ondes de volume qui provoquent les déformations des constructions courantes sous l'effet des forces d'inertie (leurs fréquences d'oscillation sont proches de celles des constructions qu'elles peuvent mettre en résonance) (voir figure 1.5).

- **Les ondes (P) (prémaires)** ou ondes longitudinales sont des ondes de compression assimilables aux ondes sonores et qui 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. Ces ondes se propagent avec une vitesse de 7 à 8 km/s et s'accompagnent d'un changement de volume (compression et dilatation alternées).

- **Les ondes (S) (secondaires)** ou ondes transversales sont des ondes de cisaillement qui 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. Ces ondes se déplacent avec une vitesse de 4 à 5 km/s provoquant un cisaillement sans changement de volume.



*Figure 1.4 Représentation du mouvement des ondes P et S.*

#### 1.5.4.2 Ondes de surface :

Les ondes de volume qui arrivent à la surface de la terre produisent des ondes de surface n'intéressant le sol que sur une profondeur extrêmement faible, Plus le séisme est profond, moins elles sont puissantes . Elles concernent les couches superficielles des sols. Les ondes

de Love et de Rayleigh ont un contenu fréquentiel qui concerne certaines structures, mais leur influence sur les constructions courantes est négligeable [2]. 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 (voir figure 1.6).

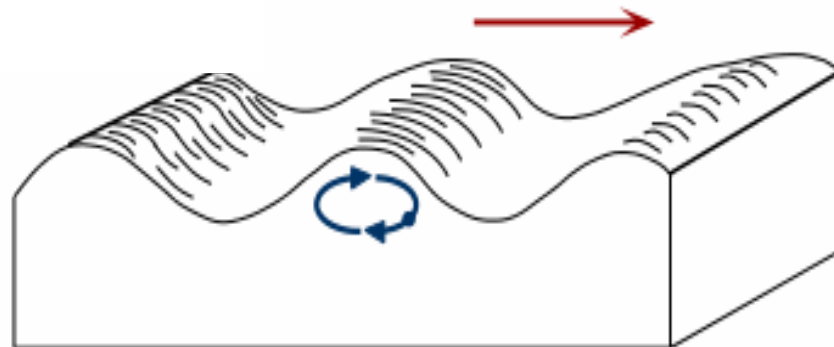
- **Les ondes de Love** sont des ondes de cisaillement, comme les ondes S, mais qui oscillent dans un plan horizontal. Elles impriment au sol un mouvement de vibration latéral

- **Les ondes de Rayleigh** sont assimilables à une vague; les particules du sol se déplacent selon une ellipse, créant une véritable vague qui affecte le sol lors des grands tremblements de terre.

**Onde L**



**Ondes de Rayleigh**



**Figure 1.5**

*eigh.*

#### 1.5.4.3 Modèle de propagation des ondes élastique

Si on assimile le sol à un milieu élastique et homogène caractérisé par le module d'élasticité longitudinal  $E$ , le coefficient de poisson  $\nu$  et la masse volumique  $\rho$ . La vitesse  $V_p$  des ondes P est donnée par [4]:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (1.1)$$

Et la vitesse  $V_s$  des ondes S par :

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.2)$$

$$\text{Avec } \left. \begin{aligned} \lambda &= \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \\ G &= \frac{E}{2(1+\nu)} \end{aligned} \right\} \text{ Constantes de Lamé} \quad (1.3)$$

Le rapport des vitesses de propagation des ondes P et S peut se mettre sous la forme :

$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (1.4)$$

Ce rapport ne dépend que du coefficient du poisson :

$$\text{Pour } \nu = 0 \quad \frac{V_P}{V_S} = 1.41 \quad (1.5)$$

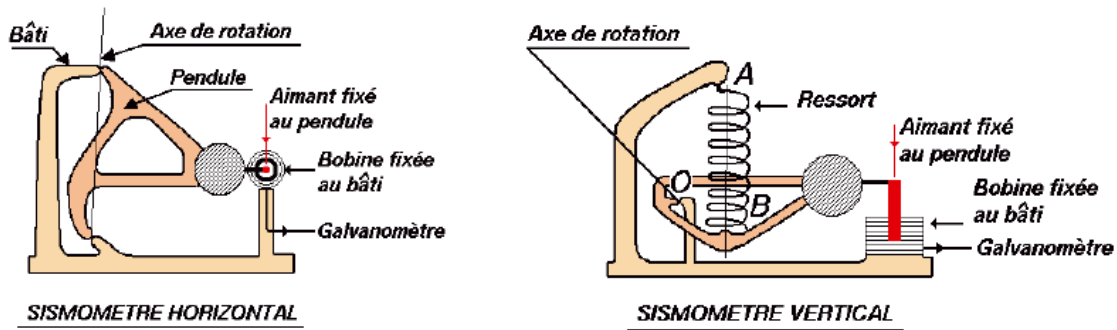
$$\text{Pour } \nu = 0.15 \quad \frac{V_P}{V_S} = 1.56 \quad (1.6)$$

$$\text{Pour } \nu = 0.25 \quad \frac{V_P}{V_S} = 1.71 \quad (1.7)$$

L'onde longitudinale **P** se propage donc, environ une fois et demie plus vite que l'onde transversale **S**. C'est le train d'ondes P qui est tout d'abord enregistré par les sismographes. Si l'on connaît les vitesses  $V_P$  et  $V_S$  ainsi que les écarts qui existent entre le temps d'arrivée des ondes **P** et **S**, on peut calculer la distance entre le foyer et le point d'enregistrement.

### 1.5.5 Localisation d'un séisme

Le séisme se manifeste à la surface du sol par une série de vibrations. Elles peuvent être enregistrées au moyen d'un appareil appelé sismomètre (figure 1.7). Celui-ci restitue une « image » du séisme en terme d'amplitude de la vibration, appelé le sismogramme (figure 1.8). Les ondes P se propagent plus rapidement que les ondes S, c'est cette propriété qui permet de localiser un séisme. Pour un même séisme, les différents sismogrammes obtenus, au niveau de toutes les stations sismologiques, permettent de localiser l'épicentre du séisme, par lecture des délais d'arrivée des ondes et la méthode des cercles (figure 1.9)

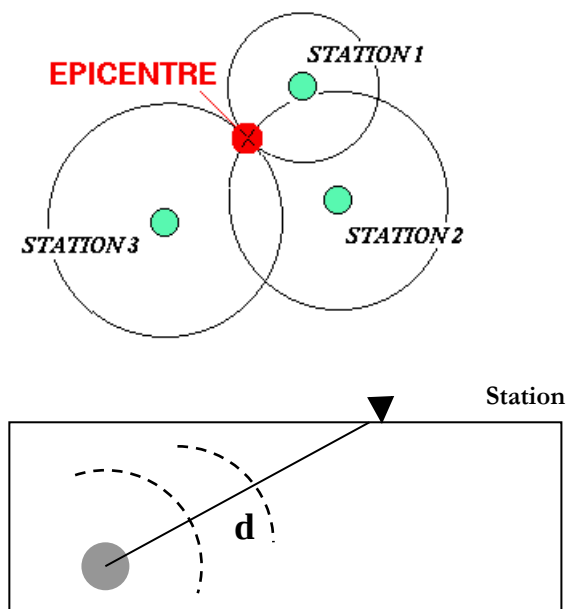


*Figure*

### *1.6 Sismomètres d'enregistrements dans les plans, horizontal et vertical.*



*Figure 1.7 Exemple de sismogramme enregistré.*



*Figure 1.8 Localisation de l'épicentre du séisme par la méthode des cercles.*

### **Mesure de l'importance d'un séisme**

Les paramètres utilisés pour classer un séisme concernent l'énergie émise comportent la magnitude et l'intensité d'un séisme qui constituent deux principales échelles actuellement existantes pour les séismes.

## Magnitude

La Magnitude d'un séisme ( $M$ ) est une fonction logarithmique (donc pas une échelle à degrés) représentative de la quantité d'énergie rayonnée par la source sous forme d'ondes élastiques. Le tableau 1.1 montre une corrélation entre la magnitude du séisme, l'énergie libérée et leur équivalence en bombe d'Hiroshima.

Tableau 1.1 Corrélation entre la magnitude, l'énergie libérée et équivalence en bombe d'Hiroshima

| Magnitude | Energie dégagée en joule (J) | Equivalent en bombes d'Hiroshima |
|-----------|------------------------------|----------------------------------|
| 5         | $E_1 = 2.10^{12}$            | 1/33                             |
| 6         | $E = 33. E_1$                | 1                                |
| 7         | $E = 1000. E_1$              | 33                               |
| 8         | $E = 33000. E_1$             | 1000                             |
| 9         | $E = 1000\ 000. E_1$         | 33000                            |

### 1.6.2 Intensité (I)

C'est la mesure des effets et dommages du séisme en un lieu donné. Pour un séisme de magnitude donnée, elle est maximale à l'aplomb de la faille (intensité épiscopale) et décroît avec la distance (sauf effets de site, sur terrain sédimentaire par exemple). Elle est d'autant plus importante que le foyer est plus superficiel.

Il existe plusieurs échelles d'intensité qui classent les effets des tremblements de Terre en plusieurs degrés, généralement de I à XII, en chiffre romain. On a utilisé successivement les échelles d'intensité de Rossi-Forel, Mercalli (1902) tableau (1.2), de Mercalli-Cancian-Sieberg (1917), de Mercalli modifiée (1931). Les échelles MKS (1964) et EMS 1992, précisent les dégâts pour chaque type de construction.

#### 1.6.2.1 Intensité macrosismique EMS 98

L'intensité macrosismique EMS 98 est estimée par observation des désordres sur les bâtiments et les infrastructures, ainsi que par la perception du séisme par la population. Elle comporte douze niveaux (de I à XII). Pour un même séisme, l'intensité macrosismique varie dans l'espace en fonction de la distance à l'épicentre et des phénomènes annexes, tels que l'amortissement ou l'amplification des ondes sismiques (effets de site). La zone d'intensité maximale est appelée épicentre macrosismique et peut être différente de l'épicentre réel.

**Tableau 1.2 Echelles d'intensité de Mercalli**

| Echelle | 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 n'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 leurs voitures secouées. Quelques meubles peuvent se briser. Des briques peuvent tomber des immeubles. Les dommages sont modérés dans les bâtiments bien construits, mais peuvent être considérables 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.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

### 3.4 Notion de base DE RISQUE

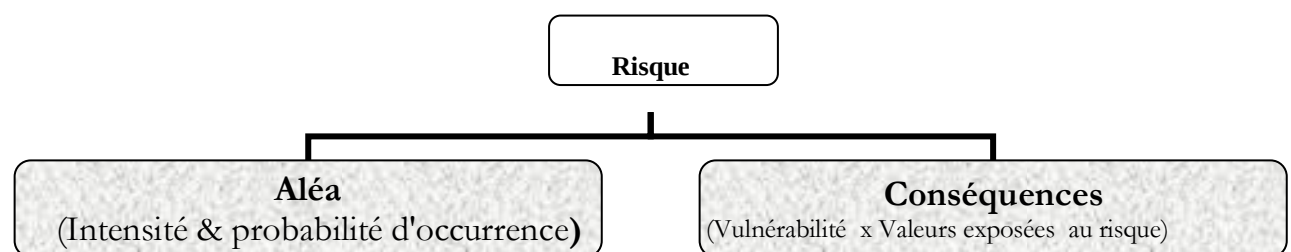
Les différents paramètres constitutifs du risque sont l'aléa, la vulnérabilité et les valeurs exposées au risque considéré. Le risque sismique est exprimé sur la base des termes des équations (3.1) et (3.2), définies par l'Organisation des Nations Unies. Les éléments constitutifs du risque sont présentés schématiquement sur la figure 3.3.

- **Risque** est défini par la probabilité de pertes en biens, en activités productives et en vies humaines, pendant une période de temps donnée [1]. Il est le produit de trois facteurs :

$$\text{Risque} = \text{Danger} \times \text{Conséquences} \quad (3.1)$$

$$\text{Risque} = \text{Aléa} \times \overbrace{\text{Vulnérabilité} \times \text{Valeur}} \quad (3.2)$$

- **Aléa** (Hazard): Probabilité d'occurrence, dans une région et au cours d'une période donnée, d'un phénomène naturel susceptible de causer des dommages [2].
- **Vulnérabilité** (Vulnerability): Degré de perte ou d'endommagement d'un élément donné exposé au risque (ou d'un ensemble d'éléments), résultant de l'occurrence d'un phénomène naturel de magnitude donnée et s'exprimant sur une échelle de 0 (absence de dommages) à 1 (perte totale) .
- **Valeur exposée aux risque** (Elements at Risk): Populations, constructions, activités civiles, services publics, installations et infrastructures, etc., exposés au risque dans une région donnée .



**Figure 3.3 Eléments constitutifs du risque**

**3.5. Risque sismique** (Seismic risk) est la probabilité de pertes au cours d'une période de référence dans la région considérée.

- Proportionnelle au nombre de vies humaines et à la valeur des biens exposés.
- Dépend de l'occupation humaine de la région considérée [1].

**3.5.1 Aléa sismique** est la probabilité d'occurrence du phénomène sismique, c'est à dire du mouvement sismique du sol pour un site ou une région donnée une même période de temps donnée .

#### **3.5.1.1 Aléa sismique régional**

Il se définit à l'échelle de 1/200000 ou de 1/100000 : il caractérise un mouvement sismique au (rocher horizontal), pour une région idéalisée, topographiquement et géologiquement homogène.

En Algérie la carte d'aléa sismique régional, donnant l'accélération maximum sur le rocher, a été établie pour une période de retour de 475 ans, cela a conduit à la définition de zones sismiques associées à une valeur d'accélération maximale. Cette dernière a été modifiée RPA 2024 .Le territoire national est divisé en sept (07) zones de sismicité croissante présentées dans et le Table (3.1 ) la figure :

| Sismicité        | Zone   |
|------------------|--------|
| Très faible      | 0      |
| Faible           | I      |
| Faible à moyenne | II     |
| Moyenne          | III    |
| Moyenne à élevée | IV     |
| Elevée           | V & VI |

Table 3.1: Zones sismiques

