

Introduction

Les séismes, phénomène naturels particulièrement et meurtriers lorsqu'ils touchent des zones urbanisées sont source à la fois d'effets directs (effondrement de construction, destruction d'art, incendies...) et d'effets induits que l'on définit comme manifestations des réactions du milieu sur son environnement.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les concepts de base liés à la sismologie telle que les risques sismiques, les failles et les ondes sismique. Puis on a parlé sur l'intensité, magnitude et le mouvement de sol. Enfin on a cité l'accélérogramme du séisme, durée de séisme et le spectre de réponse.

I.1 sismologie

La sismologie est la science de tremblement de terre qui consiste à détecter et à analyser les vibrations naturelles du sol et par extension, les signaux sismiques générés artificiellement, elle a contribué de manière vitale à la prévision des tremblements de terre, et à la compréhension de la tectonique des plaques. Les tremblements de terre font partie des cataclysmes naturels qui ont toujours exercé une grande fascination sur l'humanité.

Notre connaissance actuelle des phénomènes est telle que s'il n'est pas possible de prédire l'instant où un séisme se produira en un lieu donné, il est possible d'identifier les zones à haut risque sismique, et d'y construire en conséquence. Pour cela il faut comprendre le mécanisme par un certain nombre de grandeur directement utilisable par l'ingénieur. [Belhadad,12]

I.2. Les risques sismiques

I.2.1. Effet et conséquences des séismes

Les tremblements de terre engendrent assez souvent destructions d'habitations, des édifices publics, des ponts, des battages ou déclenchent de glissement de terrains catastrophiques

- **Liquéfaction**

La déconsolidation brutale des matériaux se traduit par déstructuration du sol, rendant particulièrement instables les constructions.

- **Tassements des sols**

Tassement du sol est sa déformation verticale due à l'application de contraintes extérieures telles que les remblais, les fondations ou son poids propre

- **Les raz de marée :**

En cas de secousses sous-marines les rivages peuvent être affectés par un autre risque : la formation de raz-de-marée ; ceux-ci sont provoqués par l'onde de choc qui se propage à la surface des eaux marines. De véritable murs d'eau (appelés aussi Tsunami) sont projetés le long des côtes avec une telle violence que des villes entières peuvent être détruites. [Belhadad,12][Agri, 07]

I.2.2. L'aléa

L'aléa est le phénomène de destructeur observé, que l'on cherche à quantifier. Il est caractérisé par une probabilité d'occurrence, qui est l'inverse de sa période de retour (si elle existe), une extension spatiale et une intensité. Les conséquences de l'aléa sur les éléments exposés dépendant de ces deux derniers facteurs.

I.2.3. La vulnérabilité des éléments exposés

Les éléments exposés correspondent à la population, aux bâtiments et autres infrastructures humaines (réseaux de communication, réseaux de transports...) aux activités humaines (économiques, de loisirs, de service...) et au patrimoine culturel et environnemental (monuments, paysages, biodiversité...). Ils sont caractérisées par une vulnérabilité, différente selon la nature de l'élément exposé (la vulnérabilité d'un bâtiment n'est pas celle d'un axe de réseaux de communication). De plus, il n'y'a pas de vulnérabilité intrinsèque, mais bien une vulnérabilité par nature d'aléa. Par exemple, une maison construite aux normes parasismiques est prévue pour résister aux séismes. Cependant, si elle est localisée en zone inondable. Sa vulnérabilité face aux inondations est élevée, alors qu'elle est faible face aux séismes.

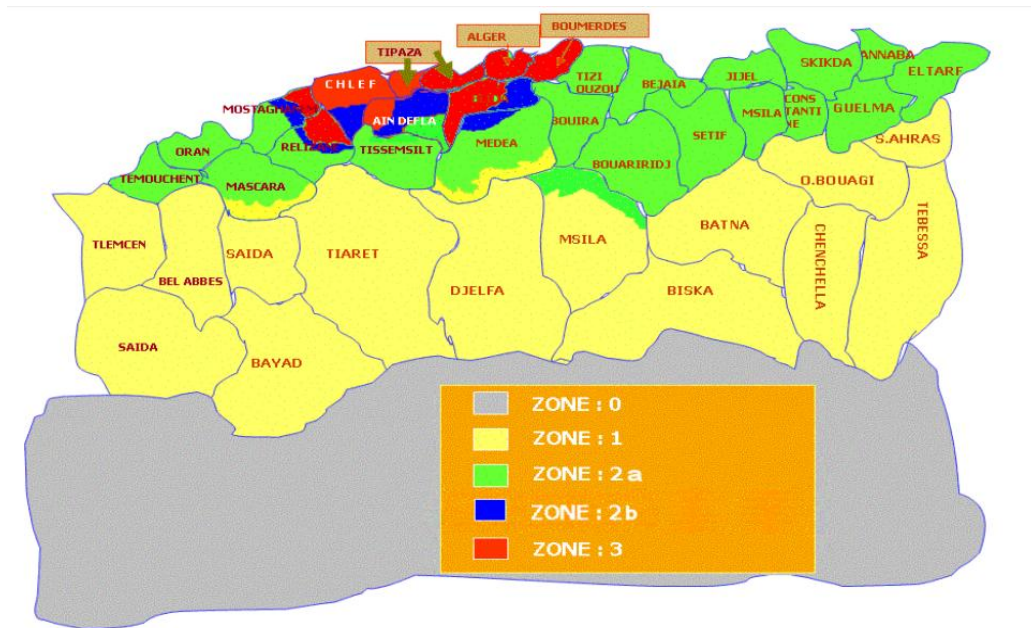
$$\text{Risque} = \text{aléa} * \text{vulnérabilité} * \text{valeur} \text{ [Hernandez.10]}$$

I.2.4. Zonage du risque sismique « zoning »

Le zonage du risque sismique, c'est -à- dire la division du territoire en « zones de sismicité » à l'intérieur desquelles l'aléa sismique peut être considérée comme uniforme, constitue une base essentielle pour la définition de règles régissant les constructions résistantes aux séismes. Le zonage sismique s'efforce de classer les régions, suivant le niveau de l'aléa. Un grand nombre de pays adoptent la représentation suivante :

- 1) Zone 0 : Sismicité négligeable.
- 2) Zone 1 : Sismicité faible.

- 3) Zone 2 « a » et « b » : Sismicité moyenne.
- 4) Zone 3 : Sismicité élevée.



Fig(I.1) : Zonage du territoire national

Groupe	Zone I	Zone IIa	Zone IIb	Zone III	Classification des ouvrages selon leur importance
1 A	0.15	0.25	0.30	0.40	Ouvrages d'importance vitale : Sécurité Hôpitaux
1 B	0.12	0.20	0.25	0.30	Ouvrages de grande importance : Scolaire et culte
2	0.10	0.15	0.20	0.25	Ouvrages courants : Habitation-Bureaux
2	0.07	0.10	0.14	0.18	Ouvrages de faible importance : Hangars

Tableau(I.1) : Coefficient d'accélération

I.3. Failles

En géologies, c'est un linge de cassure le long de laquelle un compartiment de roche, ou une section de la croûte terrestre, a été déplacé par rapport au compartiment voisin. Le mouvement responsable de cette dislocation peut être vertical ou horizontale, ou les deux à la fois.

Lorsque le mouvement d'une faille est soudain et abrupt, il peut générer un grave séisme et même fissure de la surface de la terre créant une forme de relief nommé escarpement de faille.

La faille de San-Andréas **Fig(I.2)**, grande cassure de l'écorce terrestre située dans l'ouest des Etats-Unis. La faille traverse la Californie sur environ 970 km, du golfe de Californie au sud-est jusqu'à point Aréna au nord-ouest, sur la cote septentrionale californienne. Cette zone marque la séparation entre les plaques tectoniques de l'Amérique du nord et du pacifique. Des séismes se produisent le long de cette faille lorsque les contraintes accumulées dans les profondeurs de la terre se relâchent brusquement en faisant coulisser les compartiments situés de part et d'autre de la cassure.

I.3.1. Faille normale

Produit par des forces de distension, elle se forme lorsque deux blocs de l'écorce terrestre s'écartent l'un de l'autre **Fig(I.3)**.

I.3.2. Faille transcurrente (ou de décrochement)

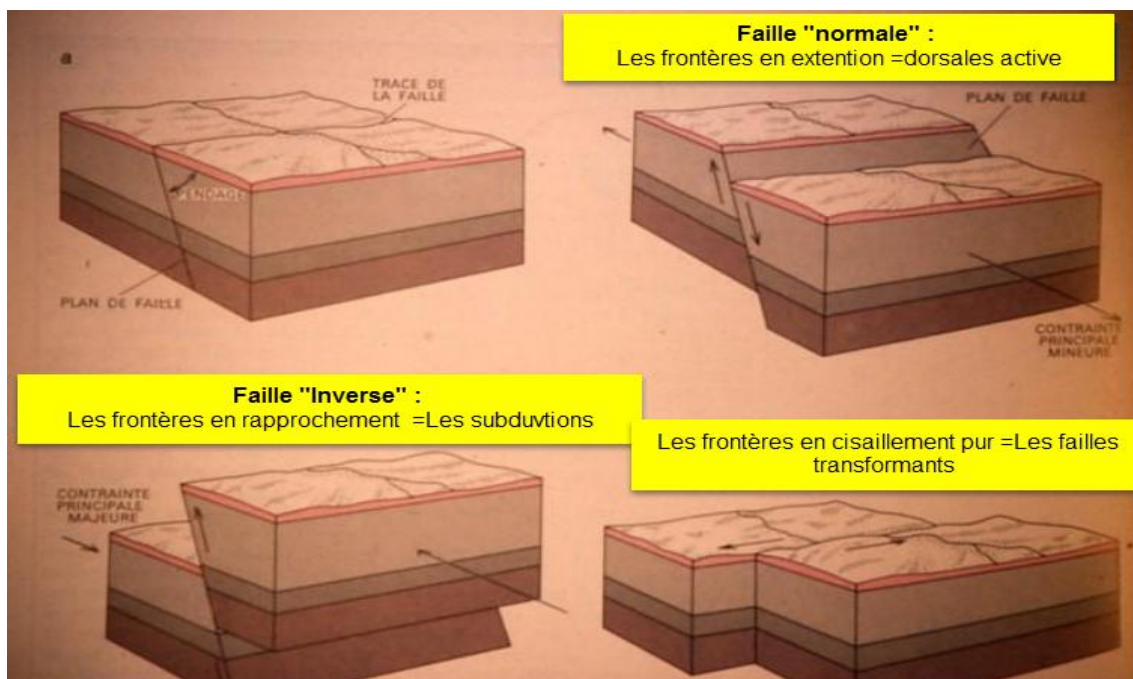
Se forme lorsque deux blocs de l'écorce terrestre l'un contre l'autre selon un mouvement principalement horizontale **Fig(I.2)**



Fig(I.2) : Faille de San Andréas (Etats-Unis), faille de décrochement

I.3.3. Faille inverse

Elle est produite par des forces qui compriment la croûte terrestre, se forme lorsque deux blocs de l'écorce terrestre subissent tous deux une compression et que l'un des blocs chevauche l'autre [Agri,07] [Belhadad,12]



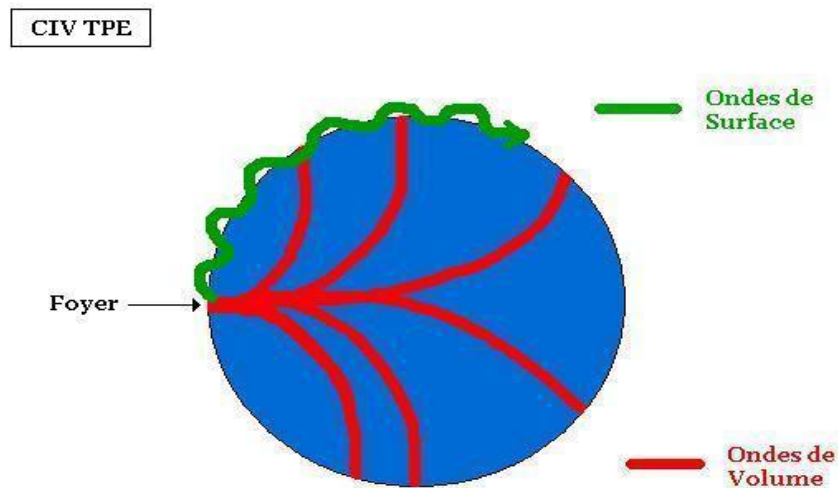
Fig(I.3) : Les principaux types des failles qui intéressent le génie sismique

I.4. Nature et mode de propagation des ondes sismiques

Les ondes sismiques sont des ondes élastiques qui traversent un milieu sans pour autant modifier durablement ce milieu.

Les vibrations engendrées par un séisme se propagent dans toutes les directions. Selon leur nature, on distingue deux grands types d'ondes émises par un tremblement de terre :

- les ondes de volume appelées également ondes de fond qui traversent la Terre ;
- les ondes de surface qui se propagent parallèlement à sa surface.



Fig(I.4) : représente les ondes de volume et les ondes de surface

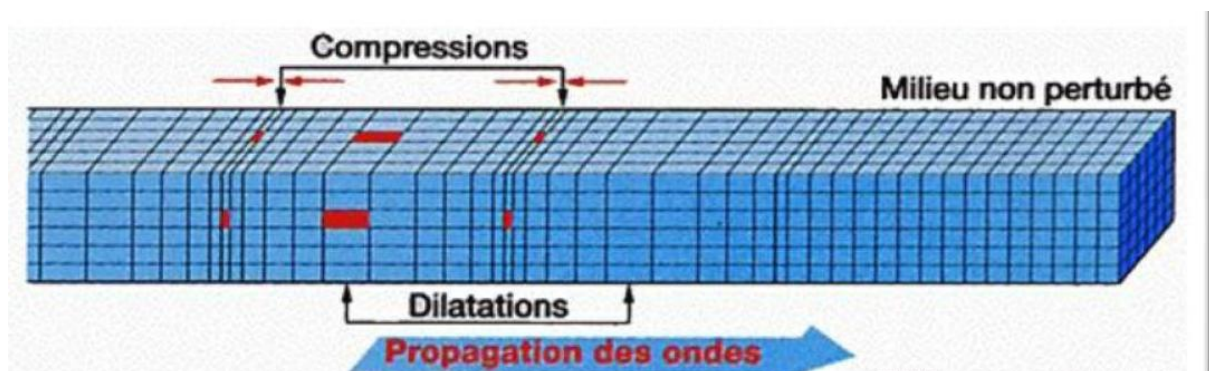
I.4.1. Les ondes de volume

Ces ondes se propagent généralement à l'intérieur du globe à partir du foyer du séisme. Leur vitesse de propagation dépend du matériau traversé, celle-ci augmente avec la densité. Ainsi, les ondes sismiques vont en général plus rapidement en profondeur car la densité des matériaux augmente lorsqu'on descend vers le centre de la Terre (la gravité devenant plus forte).

Il existe deux types d'ondes de volume :

I.4.1.1. Les ondes P (primaires)

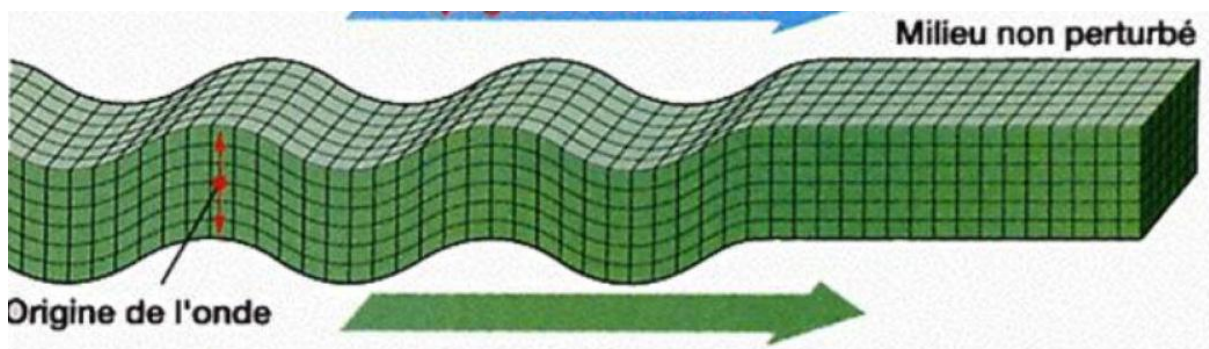
Ce sont les ondes les plus rapides (elles se propagent à plus de 6 km/s dans la Terre) et sont donc celles que l'on peut ressentir ou mesurer les premières. Ainsi, le grondement sourd que l'on entend avant un tremblement de Terre vient de celles-ci. Elles se déplacent en créant successivement des zones de dilatation (où la matière s'étire) et des zones de compression (où la matière se comprime). Elles se déplacent "longitudinalement", c'est-à-dire qu'elles ont une trajectoire rectiligne (comme une droite), ces ondes ne sont pas dangereuses, elles peuvent juste alerter d'un séisme.



Fig(I.5) : Ondes primaires (onde p)

I.4.1.2. Les ondes S (secondaires)

Ces ondes sont plus lentes que les ondes primaires (elles se propagent à plus de 4 km/s dans la Terre). Elles se propagent dans les roches et les autres milieux solides mais pas dans les milieux fluides, comme le noyau liquide de la Terre. Elles cisailent les roches perpendiculairement à leur direction de propagation, comme une vague ou une sinusoïde



Fig(I.6) : Onde S secondaires (onde S)

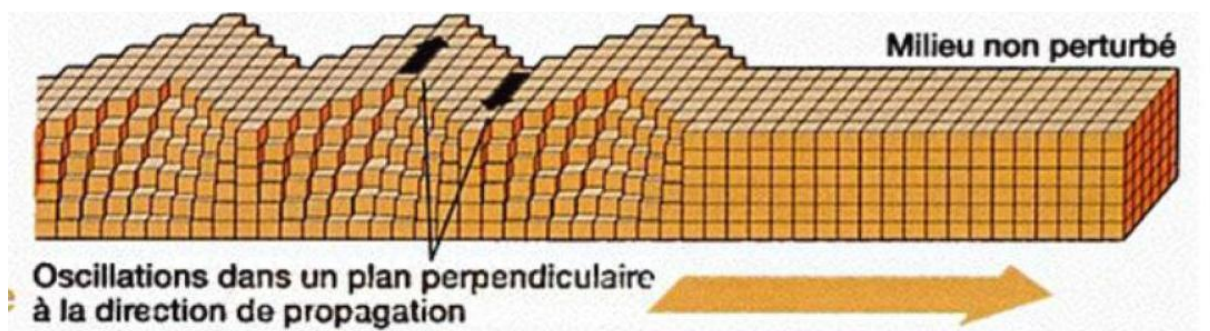
I.4.2. Les ondes de surface

Les ondes de surface ne se propagent que dans la partie superficielle de l'écorce terrestre, à la surface de la Terre (comme leur nom l'indique) et sont donc à l'origine de la plupart des destructions constatées à la surface du sol. Les ondes de surface sont moins rapides que les ondes de volume et leur amplitude est plus grande, ce qui les rend plus destructrices. Ce sont principalement ces ondes qui sont la cause de la destruction des bâtiments.

On distingue deux principaux types d'ondes de surface:

I.4.2.1. Les ondes de Love L:

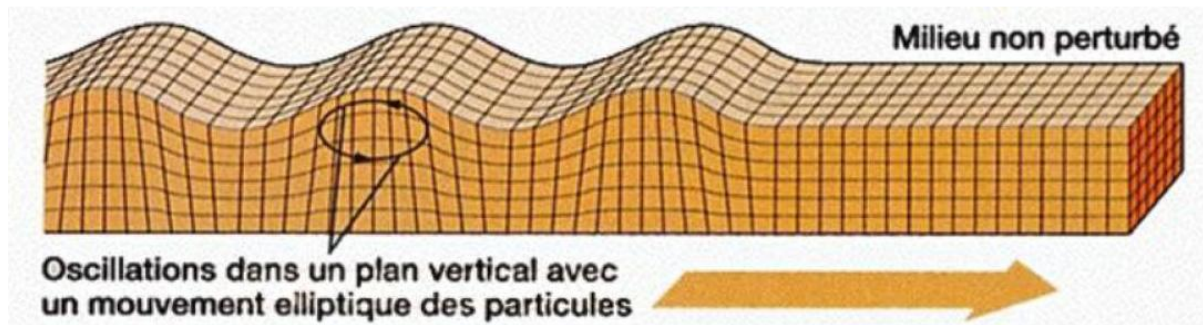
Découvertes par Augustus Edward Hough Love, celles-ci déplacent le sol d'un côté à l'autre dans un plan horizontal, perpendiculaire à leur direction de propagation. Elles sont la cause de nombreux dégâts aux fondations des édifices non parasismiques.



Fig(I.7) : Ondes de Love L

I.4.2.2. Les ondes de Rayleigh R

Découvertes par John William Rayleigh, elles ont une propagation très complexe à la fois avec des mouvements verticaux et horizontaux. En effet, elles ont une allure générale de vague, avec en plus un mouvement elliptique à l'intérieur, comme une poussière portée par la vague. Les vibrations engendrées par ces ondes peuvent durer plusieurs minutes.



Fig(I.8) : Ondes de Rayleigh R

❖ mode de propagation des ondes sismiques

La théorie de propagation des ondes élastiques permet de démontrer que vitesses propagation des ondes sismiques primaires et secondaire sont données respectivement par deux expressions suivant :

$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \dots\dots\dots (I.1)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \dots\dots\dots (I.2)$$

$$\text{Où } \lambda = \frac{V_E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \dots\dots\dots (I.3)$$

Et

ρ : Densité du milieu.

E : Module d'élasticité dynamique.

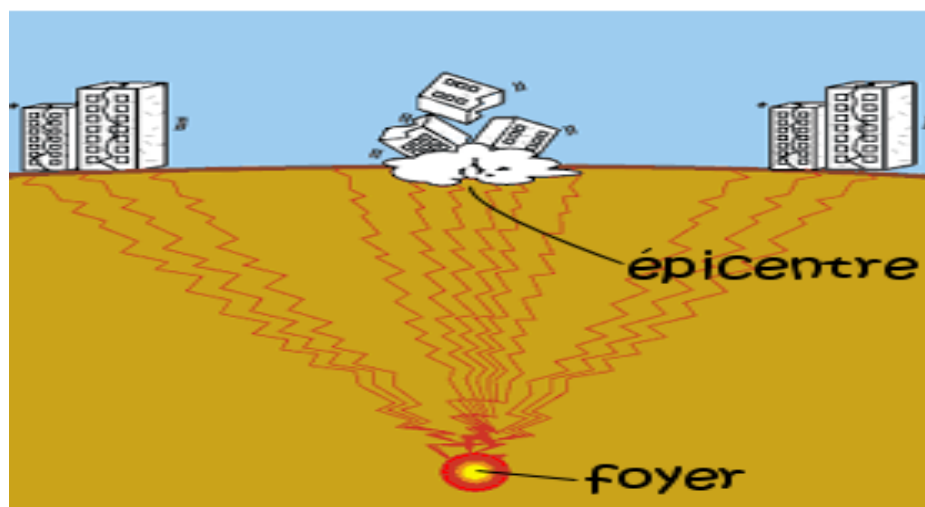
G : Module de cisaillement dynamique.

ν : Coefficient de Poisson

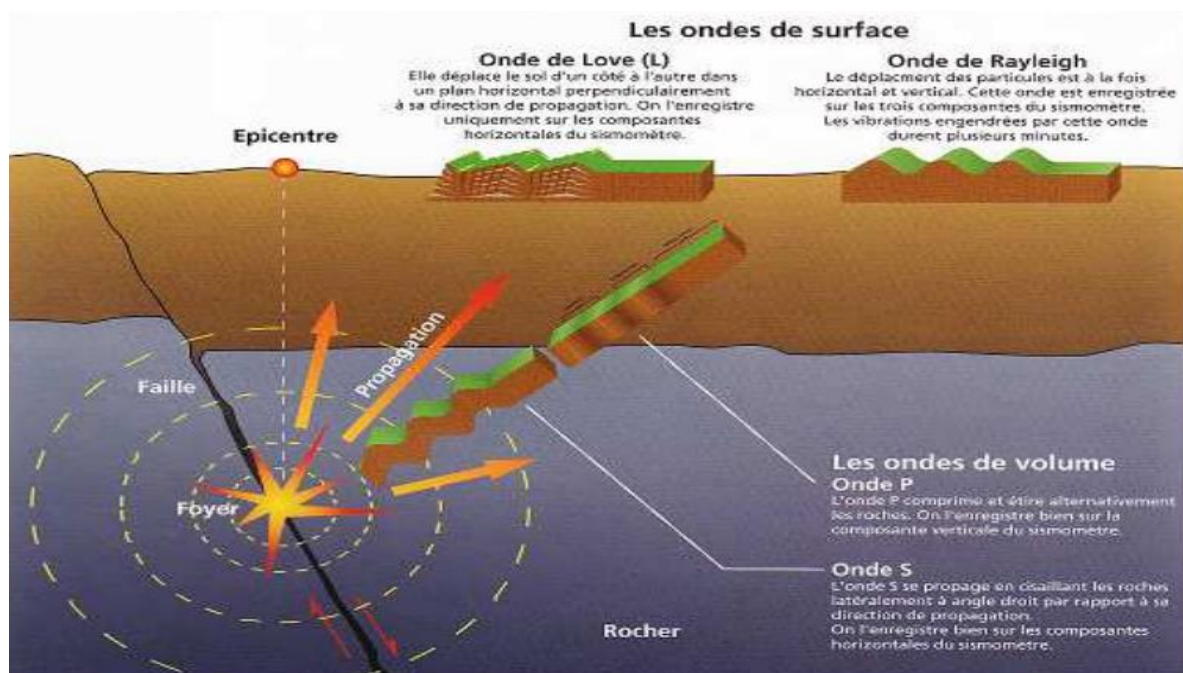
I.5.Foyer et épicentre

L'épicentre est le lieu de la surface terrestre situé exactement à la verticale du foyer d'un séisme ou Hypocentre.

Il correspond donc au point en surface où l'intensité perçue d'un tremblement de terre est la plus importante (magnitude maximale). En effet, puisque l'épicentre est le point en surface situé à la plus courte distance du foyer, les ondes sismiques générées en profondeur sont moins atténuées qu'ailleurs lorsqu'elles y arrivent.



Fig(I.9) : Représente le phénomène de foyer épicentre



Fig(I.10) : Représente les différent caractéristique du mouvement sismique

I.6. Paramètres caractéristique du mouvement sismique

La plupart des Paramètres caractéristiques du mouvement sismiques sont la longueur , la profondeur et l'orientation de la faille sur laquelle se localise le foyer ,la directions ,la vitesse et la longueur du déplacement lors de la rupture ,les contraintes et leur orientation , l'atténuation de ces contraintes lors du séisme ,le spectre d'énergie dispersée sous forme d'ondes sismiques et enfin l'histoire du mouvement cassant les autre Paramètres utilisés pour classer un séisme sont la magnitude et l'intensité d'un séisme qui constituent deux principales échelles actuellement utilisées pour mesurer les séismes.

I.6.1. Intensité

Déterminée suivant les réactions humaines et les conséquences dommageables ou non sur les constructions et sur l'environnement en un endroit donné. Elle est donc variable d'un lieu à l'autre, maximale dans les régions de l'épicentre, elle décroît régulièrement sauf singularité, au fur et à mesure que l'on s'éloigne de ce point. Une décroissance rapide sera l'indice d'un foyer proche de la surface. Elle est évaluée en comparant les effets constatés avec ceux décrits dans les échelles macrosismiques.

Une échelle d'intensité (I à XII) de *Mercalli* a été adaptée internationalement sous le nom d'échelle macrosismique internationale d'intensité, en 1964 une échelle a été proposé : l'échelle *MSK*, elle tient mieux compte des indicateurs qui peuvent être rassemblés lors des enquêtes sismiques. Une autre échelle, a été adoptée en 1992, c'est l'échelle *EMS* (échelle macrosismique européenne, **Tableau (I.2)** se fonde sur les effets du séisme ressenties à la surface.

I.6.2. La magnitude

Cette notion a été introduite en 1935 par le sismologue Américain Richter. Elle caractérise l'énergie libérée par la rupture de la faille au point de déclenchement du tremblement de terre ou foyer (dans la zone épiscopentrale). Contrairement à l'intensité qui apparaît comme limitée supérieurement par définition au degré XII , **Tableau (I.2)** ,la magnitude peut atteindre théoriquement n'importe quelle valeur. La magnitude locale d'un séisme est définie par :

$$M = \log_{10} \frac{A}{A_0}$$

A : amplitude maximale mesurée en mm sur l'enregistrement d'un sismographe horizontal Wood – Anderson à une distance donnée ;

A₀ : amplitude de référence qui correspond à la magnitude 0 ;

Il existe une corrélation entre la magnitude et l'énergie libérée au foyer :

$$\log_{10} E = 1.5M - 1.6$$

Echelle d'interaction de MERCALLI		Magnitude a l'échelle RICHTER
I	Séisme perçu uniquement par quelque personnes dans circonstances particulière; détecté seulement par des instruments très sensible.	2
II	Perçu par quelque personnes au repos et se trouvant aux étage supérieurs; balancement d'objets suspendus	3
III	Perçu principalement par des personnes à l'intérieur d'édifices. Les automobiles stationnées peuvent bouger.	4
IV	Perçu par la plupart des gens à l'intérieur des édifices et par certains à l'extérieur; suffisant pour réveiller certains personnes. Bruits de vaisselle de fenêtre et ports.	4
V	Perçu par presque tout le monde; plusieurs personnes sont réveillées. Bris de vaisselle et de fenêtre; les objets instables sont renversés.	5
VI	Perçu par tout le monde; plusieurs personnes effrayées et courent à l'extérieur; quelque meuble sont déplacées quelque morceaux de plâtre tombent et quelque dommages aux cheminées. Dommage légers	5
VII	La plupart des gens paniquent et courent à l'extérieur; dommage minime aux constructions conçues pour les zones sismiques, de	6

	minimes à moyens chez les bonnes constructions ordinaires, importants chez les mauvaises constructions. Meubles renversés.	
VIII	Domage légers aux constructions conçus pour les zones sismiques, importants chez les bonnes constructions ordinaires avec des effondrements possibles, catastrophiques chez les mauvaises constructions.	7
IX	Dommmages considérables aux constructions conçues pour les zones sismiques. Edifices déplacés sur leurs fondations. Fissuration du sol. Bris des canalisations souterraines.	8
X	Quelques bonnes constructions en bois et la plupart des constructions en maçonnerie sont détruites. Sol frottement fissuré. Plusieurs glissements de terrain se produisent.	8
XI	Très peu de constructions en maçonnerie restent debout, rails tordus; ponts détruits. Grandes fissures dans le sol	9
XII	Destruction quasi-totale. Ondulations visibles à la surface du sol. Objets projetés dans les airs.	9

Tableau (I.2) : Echelle d'intensité et de magnitude [Belhadad,12] [Agri,07]

I.7. Mouvement du sol

Les mouvements de terrain regroupent un ensemble de déplacements, plus ou Moins brutaux, du sol ou du sous-sol, d'origine naturelle (pluies...) ou anthropique (terrassement, vibrations, exploitation de matériaux ou de nappes Aquifères...). Les volumes en jeu sont compris entre quelques mètres cubes et quelques millions de mètres cubes. Les déplacements peuvent être lents (quelques millimètres par an) ou très rapides (quelques centaines de mètres Par jour).

I.8. L'accélérogramme du séisme

L'accélérogramme représente l'évolution en fonction du temps de L'accélérogramme du sol. Ce type d'information, donné par les sismographes selon les 3 directions de l'espace,

convient pour estimer le risque sismique encouru par un ouvrage hydraulique ou de génie civil, lorsqu'il s'agit d'en prouver la tenue par essais ou par calcul.

L'accélérogramme est la seule information utilisable dans, le cas où l'on s'intéresse à la chronologie de la réponse d'une structure à l'excitation sismique. Ceci est le cas lorsque l'on doit connaître l'évolution du déplacement relatif de différents constituants d'un équipement au cours du temps. [Belhadad,12]

$$g = f(t)$$

I.9. L'accélération maximale du sol

L'accélération a_{max} (généralement exprimée en fonction g), la vitesse v et la déplacement maximal $d(\text{cm})$, déduits d'un accélérogramme, sont pris en compte pour caractériser la violence d'un séisme.

Dans un accélérogramme **Fig. (I.12)** on peut distinguer quatre phases différentes :

- (1) Une phase initiale pendant laquelle les accélérations sont faibles de 0 à 4 secondes.
- (2) une phase à fort niveau d'accélération entre 4 et 12 s.
- (3) une phase modérée entre 12 et 38 s.
- (4) une phase très faible de retour progressif au repos après 38 secondes.

Pour les études, les phases (1) et (4) sont à éliminer.

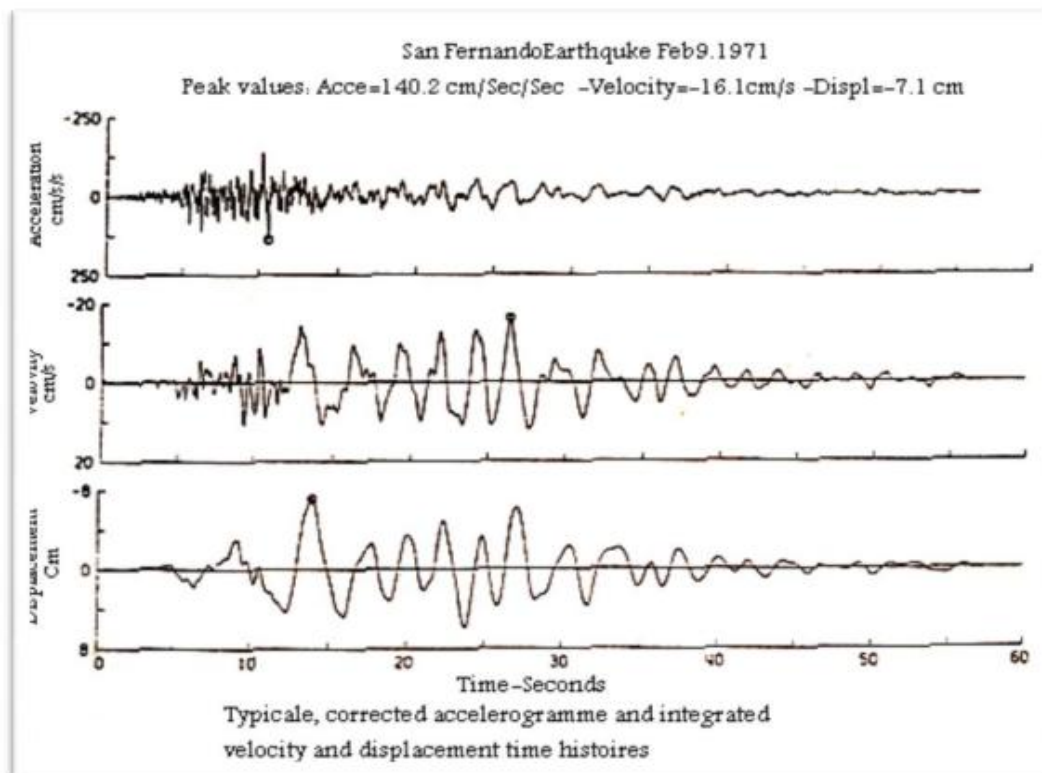
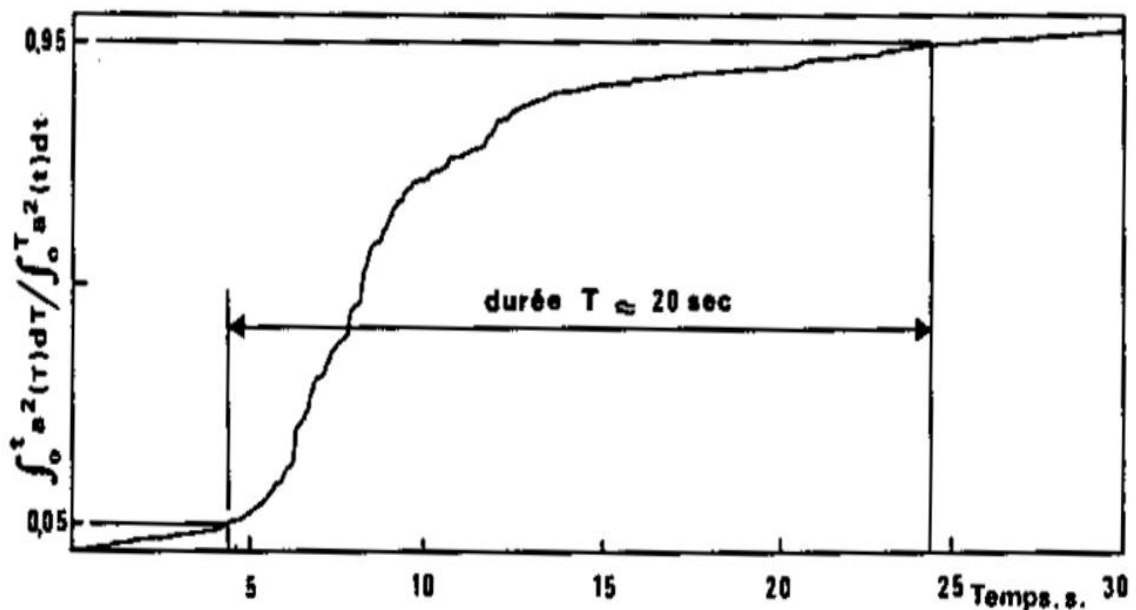


Fig. (I.11) : Les différentes phases d'un accélérogramme**I.10. Durée du séisme**

La durée d'un séisme est définir est délicate à définir directement à partir de l'accélérogramme. Certains sismologues ont proposé de la définir du partir du diagramme d'Husid qui est un moyen commode de quantifier la variation du niveau d'excitation dans la tempe.

En généralement durée un séisme comprise entre 15 et 30 s. (pour un séisme intense elle peut être de 60 à 120 s).

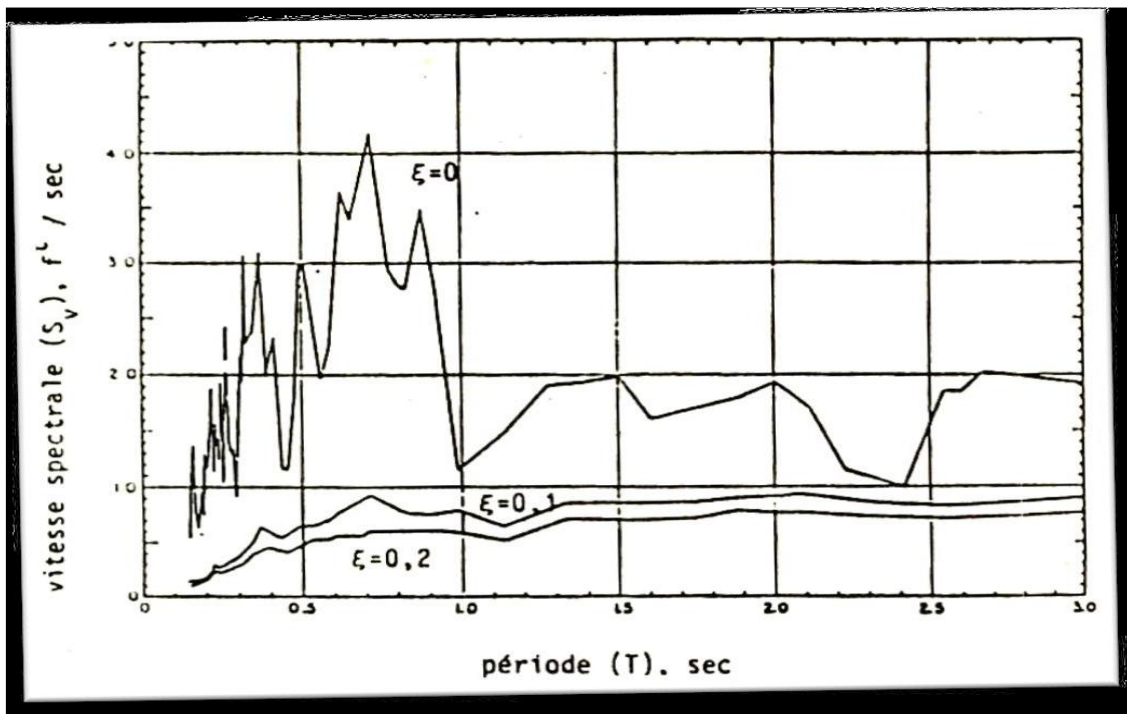
**Fig(I.12) :** diagramme d'Husid-séisme d'Olympia. [Pecker.84]**I.11. Le spectre de réponse**

La pratique actuelle la plus répandue consiste à définir le chargement sismique par un spectre de réponse. Les spectres caractérisent les séismes beaucoup plus clairement que les accélérogramme.

L'utilisation d'un spectre de réponse s'effectue différemment selon qu'il s'agit d'un spectre de déplacement ou d'un spectre d'accélération. La définition de l'action sismique par un spectre de réponse est une méthode particulièrement adapté pour : couvant-synthétiser par une enveloppe couvrante tout le domaine des fréquences les efforts de plusieurs

accélérogramma aux contenus très différents ; - Prendre en compte la nature du terrain situé sous la construction ;

- Tenir compte de l'intensité probable du séisme, du niveau de protection recherché et ceci en fonction de l'importance du bâtiment étudié, ce qui revient à caler le spectre au niveau de l'action sismique.



Fig(I.13) : Spectre de réponse en pseudo vitesse (Elventro, Californie mai 1944, composante NS)

I.12. Les facteurs affectant les caractéristiques du mouvement sismique

Le mouvement sismique en un point est affecté par des facteurs liés la source, au trajet parcouru entre le foyer et le site et par des facteurs liés à des condition locales propres au site (Idriss,1978).pour être en mesure d'évaluer la nature du mouvement sismique sur un site, il est nécessaire de l'influence de ces facteurs et de les quantifier. Ceci est réalisé à l'aide de relation dites lois d'atténuation, exprimant un des paramètres caractéristiques du mouvement sismique (accélération maximale, accélération spectrale) en fonction de l'ensemble des paramètres caractéristiques :

a) Facteurs liés à la source (mécanismes de génération du séisme), le trajet parcouru entre le foyer et le site et les facteurs liés à des conditions locales propres au site [3, 4].

b) Les facteurs de la source englobent le genre de la faille génératrice, les dimensions de la zone de rupture, la profondeur de la source, les valeurs des contraintes le long de la surface de rupture, les mécanismes de rupture et les caractéristiques de propagation le long de la faille.

c) Une partie de l'énergie libérée à la source se propage par. Radiation d'ondes sismiques lors de leur trajet entre le foyer et le site à la surface de la terre. [Pecker.84] [Samri,15]

I.13. Mouvements sismiques du champ libre et interaction sol-structure

Le mouvement sismique est défini par un accélérogramme ou par un spectre de réponse. Ce mouvement est très influencé par les conditions géotechniques locales. L'étude d'un site doit suivre les principes suivants:

- Définition du mouvement à la surface du sol;
- Niveau d'accélération réaliste pouvant être transmis par le sol;
- Caractéristique fréquentielle du mouvement compatible avec les caractéristiques physiques du site ;
- Variation de l'accélération avec la profondeur dans des limites raisonnables.

Conclusion :

Ce chapitre a pour but de clarifier au lecteur comment se produire un séisme, et quels sont les risques de celui-ci sur un ouvrage, Ainsi que l'importance de la micro-zonation des zones sujettes à des séismes d'importance moyenne à grande afin de parvenir à démarche cohérente pour la conception, le calcul et la réalisation de construction parasismique.