

CARTOGRAPHIE DU RISQUE SISMIQUE ET MÉTHODE DE PRÉVENTION

I. INTRODUCTION :

- ❖ Un séisme est une fracturation brutale des roches en profondeur créant des failles dans le sol ou en surface, et se traduisant par des vibrations du sol transmises aux bâtiments. Les dégâts observés sont fonction de l'amplitude, de la durée et de la fréquence des vibrations.
- ❖ Un séisme est un tremblement de terre ; il correspond à un ébranlement brutal du sol provoqué en profondeur par un mouvement brusque de 2 compartiments (fig.1). On appelle foyer ou hypocentre le lieu précis où se produit le mouvement initial. L'épicentre est le point situé en surface immédiatement au-dessus du foyer.

II. ORIGINES DES SÉISMES

- ❖ Un matériau rigide, soumis à des contraintes de cisaillement, va d'abord se déformer de manière élastique, puis, lorsqu'il aura atteint sa limite d'élasticité, va se rompre, en dégageant de façon instantanée toute l'énergie qu'il a accumulée durant la déformation élastique. C'est ce qui se passe lorsque la lithosphère est soumise à des contraintes.
- ❖ Sous l'effet des contraintes causées le plus souvent par le mouvement des plaques tectoniques, la lithosphère accumule l'énergie. Lorsqu'en certains endroits, la limite d'élasticité est atteinte, il se produit une ou des ruptures qui se traduisent par des failles.

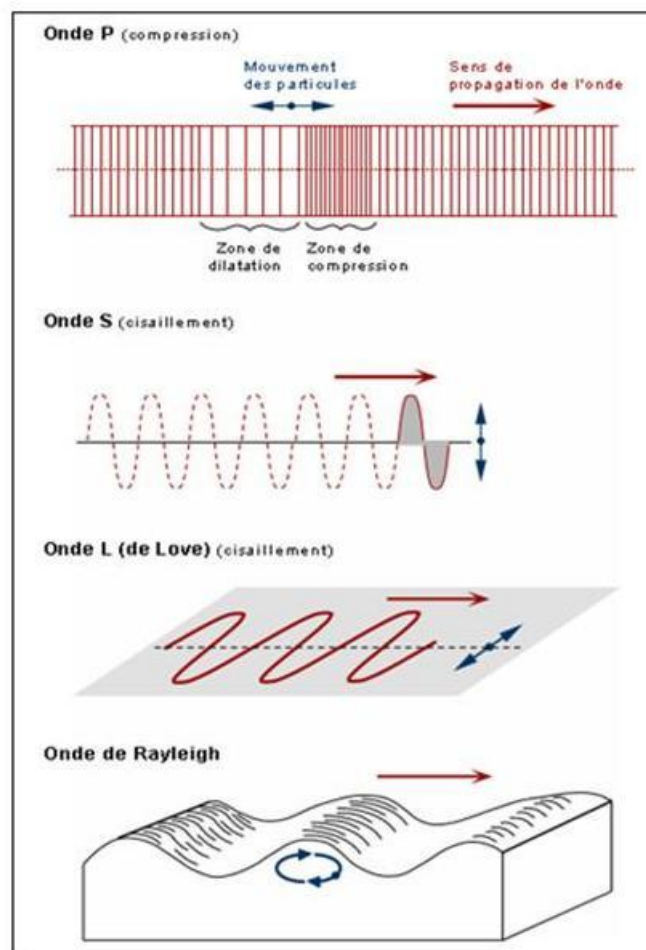


Fig.1. différents types des ondes sismiques

- Généralement La vitesse de propagation des ondes sismiques et leur gradient de vitesse sont fonction des caractéristiques physiques des milieux naturels (fig. .1).

III. LE RÉSEAU ALGÉRIEN DE SURVEILLANCE ET D'ALERTE SISMIQUE

- En Algérie, les cartes de zonage sismique sont établies sur la base de données historiques et macrosismiques (Archives CRAAG : benhallou, 1985).
- Il existe, cependant, une carte de microzonage de la région de Chlef (WCC, 1984), réalisée à partir de différentes études (sismologie, tectonique, géologie de l'ingénieur...)

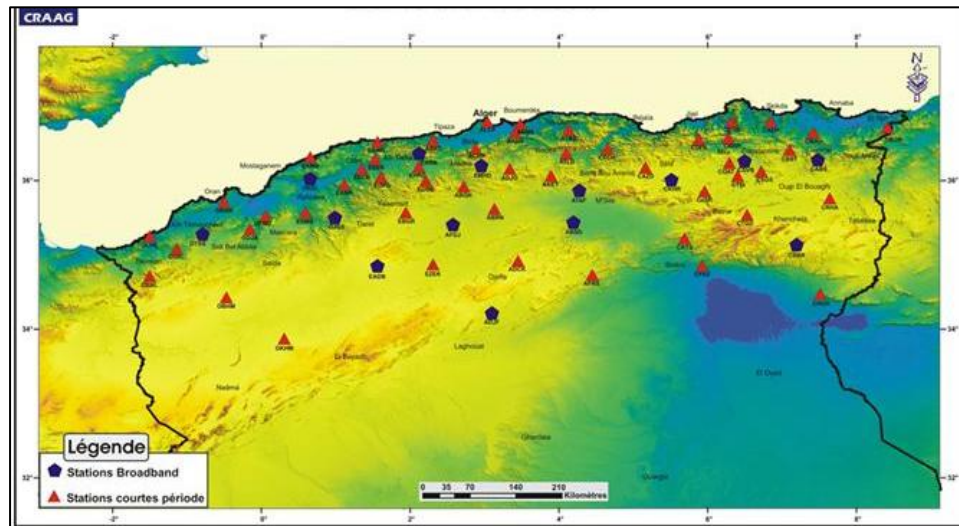


Fig.2.Le réseau algérien de surveillance et d'alerte sismique

- La surveillance sismique du territoire a débuté en Algérie en 1910 lorsque fût installée la première station sismologique à Bouzaréah.
 - D'autres stations furent installées telle que celle au sein de l'Université d'Alger et qui fonctionna jusqu'en 1982.
 - En 1998, le CRAAG procéda à la réinstallation de près de 35 stations du réseau téléométré ce qui lui permit ainsi de surveiller correctement l'activité sismique du pays et de faire face à la crise sismique de Boumerdes où près de 5000 secousses ont été enregistrées.
 - Le développement de la technologie imposa au CRAAG de se doter d'un nouvel équipement de surveillance dans le but de renforcer la surveillance du territoire.
 - C'est ainsi que le CRAAG acquis en 2006 un réseau de surveillance de près de 45 stations dont 10 stations BB.
- Le réseau de surveillance sismique algérien est composé des 35 stations du réseau téléométré et des 45 stations digitales acquises récemment. Ce réseau couvre aujourd'hui la plus grande partie de région nord du pays, là où se produit la plus grande activité du pays mais aussi dans la région de Tamanrasset où une station est localisée.

IV. ZONAGE ET MICROZONAGE SISMIQUE

A. LES CARTES DE ZONAGE SISMIQUE

- Les cartes de zonages existantes s'expriment sous forme de :

- Cartes d'intensité maximum ; elles sont établies à une échelle régionale : Ouest, Chlef, Alger et Est (Archives CRAAG, Benhallou, 1985). Cartes d'iso-accélération du sol pour différentes périodes de retour (50, 100, et 500 ans);)

➤ *Elles sont établies à des échelles régionale et locale .*

B. LES CARTES DE MICROZONAGE :

➤ *Les études de microzonage de la région de Chlef (WCC, 1984) sont une synthèse de plusieurs études.*

Celles-ci s'expriment sous forme de cartes :

- ❖ **Photogéologiques:** pour la nature des terrains liés aux séismes.
- ❖ **géotechniques :** pour identifier les sols et leurs caractéristiques.
- ❖ **Hydrogéologiques:** pour identifier les potentiels de liquéfaction des sols.
- ❖ **d'intensité maximale.**
- ❖ **d'isoaccélération.**
- ❖ **du potentiel de ruptures du sol liées aux séismes :**
 - liquéfaction des sols,
 - glissement de terrain,
 - rupture de faille en surface,
 - inondation,...).

C. CARTE SISMOTECTONIQUE

Cartes sismotectoniques existantes :

Elles ne couvrent à l'heure actuelle qu'une faible partie de l'Algérie.

On peut citer :

- les cartes sismotectoniques de la région de Chlef (WCC/CTC, 1984) et (Meghraoui, Cisternas et Philip, 1986).
- les cartes sismotectoniques établies par SOCOTEC(1986) pour l'Ouest Méditerranéen et la Calé (Oran).

D. LES DONNEES DE PALEOSISMICITE :

- Bien qu'ayant été utilisées au cours de l'étude de microzonage de Chlef pour caractériser certaines des failles actives dans la région, les données de paléosismicité n'ont pas, d'une manière générale, été introduites pour l'élaboration des cartes sismotectoniques. Ce type d'étude a été effectué par WCC/CTC(1984) et Meghraoui et al.(1988).

E. LIMITE DES ZONES ACTIVES :

- Jusqu'à ce jour, les cartes de sismicité historique et instrumentale (régionales et nationale) ont servi à délimiter les zones actives. Une exception concerne la région de Chlef où la délimitation est aussi sur études néotectoniques, y compris la paléosismicité.

V. ETUDE DE MICROZONAGE DE (ETUDE DE CAS

a. Analyse de l'aléa sismique régional

La première étape de l'étude de microzonage sismique a été l'évaluation de l'aléa sismique régional.

L'aléa sismique régional est déterminé en termes de probabilité d'occurrence de différents niveaux d'accélération maximale du sol.

a₁ : L'approche

- La détermination de l'aléa sismique régional est basée sur des études de : géologie, de sismologie et mouvements du sol ont été conduites dans le cadre de cette analyse.
- Les recherches géologiques fournissent l'information sur la configuration régionale des contraintes qui produisent les failles, sur les localisations probables de futurs séismes importants (identification des failles actives), et sur le taux, à long terme, de libération de l'énergie sismique.
- Les résultats des études géologiques et sismologiques sont analysés et combinés pour obtenir un modèle des sources sismiques pour la région.

a₂ : Investigation géologiques

- *Les recherches géologiques conduites au cours de cette étude ont permis de :*
- Identifier les failles de la région d'étude d'Ech Cheliff qui peuvent être des sources sismiques potentielles ;
 - Faciliter la délimitation des zones de sources sismique là où des séismes de magnitude plus faible, ne pouvant être associés à des failles, pourraient se produire ;
 - Evaluer l'ampleur potentielle des séismes (magnitude maximale) qui peuvent se produire dans chaque zone-source ;
 - évaluer la fréquence des séismes (intervalles de récurrence).

a₃ : Investigations sismogéologiques

Les études sismogéologiques ont été visées sur l'évaluation des données historiques et instrumentales pour identifier les sources potentielles de futurs séismes destructeurs et pour faciliter l'évaluation du taux d'activité sismique de ces sources.

b. Cartographie et microzonation des zones urbaines.

- L'objectif principal du microzonage sismique de ces sites urbains est de définir les aléas sismiques qui peuvent affecter ces zones et de synthétiser et présenter les données en un format qui puissent être utile :
- *aux agences gouvernementales,*
 - *aux urbanistes*
 - *et à l'industrie de la construction.*

b.1.l'approche

Les trois sources principales de données utilisées pour établir les cartes d'aléas sismiques sont :

- les cartes photogéologiques à grande échelle des zones urbaines ;
 - les résultats des investigations géotechniques et hydrogéologiques ;
 - et les résultats de l'étude de l'aléa sismique régional.
- *La cartographie photogéologique des zones urbaines a servi à délimiter l'étendue des différents dépôts superficiels et à identifier les zones de glissements de terrain potentiels et de rupture de faille en surface potentielle.*
- *Les études géotechniques ont fourni des renseignements sur la stratigraphie de sites choisis et sur les propriétés géotechniques générales des différentes unités lithologiques.*

- Les données hydrogéologiques donnent des renseignements sur la profondeur de la nappe aquifère.
- L'étude de l'aléa sismique régional a fourni la base pour évaluer le potentiel d'occurrence de mouvements forts du sol dans la région d'étude
- Les cartes d'effondrements potentiels de terrain aux séismes délimitent les zones sujettes, lors de séismes à la liquéfaction, aux glissements de terrain et à la rupture de failles en surface
- Les zones sujettes aux glissements de terrain et à la rupture de failles en surface ont été délimitées à partir de la cartographie photogéologique.
- Les données sur les propriétés des sols et la profondeur de la nappe aquifère, qui sont présentées sur les cartes géotechniques et hydrogéologiques, ont fourni la base pour l'évaluation de la susceptibilité des sols à la liquéfaction.
- Cette information, combinée aux cartes d'isoaccélération, a permis de déterminer le potentiel de liquéfaction des différentes unités des sols.
- La cartographie photogéologique jointe à l'évaluation, sur le plan régional, de la localisation des failles actives a fourni le moyen pour déterminer le potentiel d'inondations induites par séismes.

b.2. Cartographie photogéologique

- Plusieurs critères ont été utilisés pour différencier les diverses unités cartographiées sur les cartes photogéologique des dépôts de surface.

Ces critères comprennent :

- l'expression géomorphologique des unités, c'est-à-dire terrasses alluviales,
- cônes de déjections,
- pentes raides des collines) ;

- **la lithologie des dépôts ; leur séquence stratigraphique,**
- **et les caractéristiques des paléosols résiduels, enfouis ou en surface et de leur profil d'altération.**
- **Les glissements de terrain en particulier dans les zones reposant sur les argiles et des schistes marneux.**

b.3. Cartographies géotechniques et hydrogéologiques

- ***L'objectif principal des cartographies géotechniques et hydrogéologiques est de fournir une base à l'évaluation du potentiel de liquéfaction dans les sites urbains étudiés et à la délimitation des zones possédant des caractéristiques différentes de mouvements vibratoires du sol.***

➤ **Cartographie géotechnique**

- En plus du levé géologique, les résultats disponibles de recherches du sous-sol ont été utilisés pour la préparation des cartes géotechniques des zones urbaines.
- Un système de classification des sols en deux parties a été développé pour tenir compte à la fois de l'origine et l'âge géologique des sols (remblais, alluvion holocène ou pléistocène, colluvion holocène) et de leur type (argile, sable, rocher, etc).
- ✓ ***Par exemple, hA est le symbole de classification pour un dépôt de sol constitué d'alluvions holocènes argileuses.***
- Dans la plupart des zones définies sur les cartes géotechniques et hydrogéologique, des estimations sont données sur l'ordre de grandeur de l'épaisseur de sols au-dessus du rocher.

- De même, là où la profondeur du rocher est connue ou estimée à partir d'un forage particulier, cette profondeur est indiquée sur la carte près de la localisation de ce forage.

➤ **Cartographie hydrogéologique**

- La connaissance des conditions hydrogéologiques a pour objectif essentiel d'évaluer la profondeur de la nappe aquifère dans les neuf sites urbains et plus particulièrement, dans les zones situées sur des sables lâches qui sont susceptibles de se liquéfier s'ils sont saturés.

b.4. Cartographie du potentiel du mouvement vibratoire du sol

➤ *L'évaluation du potentiel du mouvement vibratoire du sol, pour chaque site urbain, est menée en trois étapes :*

1. D'abord, la détermination des intensités historiques maximales des séismes pour estimer le niveau potentiel général des mouvements du sol saturés.
2. Ensuite l'analyse de l'aléa sismique afin d'indiquer la probabilité d'occurrence des différents niveaux d'accélération maximale.
3. Enfin, les résultats de ces évaluations vont fournir une base pour estimer les coefficients de calcul des forces sismiques qui figurent dans le code de construction, ainsi que des données qui pourront être utilisées pour l'analyse dynamique des structures qui seront construites dans les zones urbaines étudiées.

b.5. Potentiel d'effondrement de terrain lié aux séismes

- Après les mouvements vibratoires du sol. L'effondrement de terrain lié aux séismes est la cause principale de dégâts lors d'un séisme.
- L'effondrement peut être, soit induit par la secousse, soit être le résultat du déplacement de la surface du sol produit par le glissement d'une faille.
- Ces effondrements comprennent aussi la liquéfaction et les glissements de terrain.

❖ **Potentiel de liquéfaction**

- *Le potentiel de liquéfaction est fonction à la fois de la prédisposition à la liquéfaction et de la possibilité de liquéfaction.*
- La prédisposition à la liquéfaction est la probabilité qu'un dépôt de sol se liquéfie et s'effondre au cours d'une forte secousse sismique.
- La possibilité à la liquéfaction est la probabilité que le dépôt de sol soit soumis à une forte secousse sismique.
- *Les critères principaux pour estimer la prédisposition d'un sol à la liquéfaction sont :*
 - sa granulométrie,
 - sa densité,
 - sa structure,
 - son âge
 - et la profondeur de la nappe phréatique.
- *Trois niveaux de potentiel de liquéfaction ont été utilisés :*
 - faible,
 - modéré
 - et élevé.



Effets de la liquéfaction dans des terrains gagnés sur la mer dans la baie de Tokyo (Chiba) lors du séisme de Tohoku (2011, Japon). En haut, exemple d'éjectas de sable. En bas, le sol s'est affaissé et déformé autour de nombreux bâtiments, nécessitant des réparations sur de grandes surfaces (photos S. Hok).

❖ Potentiel de glissement de terrain

➤ **Deux types de glissements de terrain liés aux séismes ont été considérés :**

- les écoulements superficiels de terrain et de bloc de rocher (coulées de boue),
- et les effondrements locaux.
 - La plupart des villes sont construites sur des terrasses relativement plates pour lesquelles le seul potentiel existant est représenté par des glissements de terrain le long des berges très abruptes des cours d'eau encaissés .



Mouvements gravitaires provoqués par le séisme de Niigata au Japon, en 2004. A gauche, un pan entier s'est décroché de la montagne et, glissant sur la surface des couches sédimentaires, a maintenu les arbres debout. À droite, un cas plus classique d'éroulement et d'éboulement de blocs. (photo IRSN/AFPS)

❖ Potentiel de rupture de faille en surface

- Le potentiel de rupture de faille en surface est fonction de la proximité d'un site rapport à une faille active, du type et de l'importance du déplacement associés aux événements avec rupture de faille en surface de cette faille ainsi que de la fréquence des événements.



Déplacement vertical associé à l'émergence de la faille, lors du séisme de Chichi à Taiwan (magnitude 7,6), en 1999 (photo IRSN/AFPS)



Exemple de rupture de surface induite par le séisme de Norcia, Italie, le 26 octobre 2016 (Magnitude 6,5). Le bloc de roches présent sous les pieds des géologues s'est enfoncé de 2m lors du séisme, révélant la partie ocre de la faille (Photo S. Baize).

b.6.Potentiel d'inondations liées aux séismes

- Les facteurs pouvant provoqués des inondations dans les localités étudiées sont les suivants :
 - Déformation tectonique entraînant le soulèvement du lit d'un cours d'eau en aval d'une localité.
 - Glissement de terrain colmatant un cours d'eau ou en changeant le cours
 - Rupture, induite par un séisme, de la retenue d'un lac artificiel en amont d'une localité.

VI. EVALUATION DE L'ALÉA SISMIQUE :

- ❖ *L'évaluation de l'aléa est la première étape de la prévention du risque sismique.*
Il s'agit de déterminer :

- **la probabilité qu'au cours d'une période** (la référence est souvent 50 ans qui est considérée comme la durée de vie moyenne d'un bâtiment) le mouvement du sol atteigne ou dépasse une certaine accélération sur un site. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire :
 - ✓ **de caractériser les sources sismiques** (géométrie et cinématique des failles actives, localisation, magnitude et récurrence des séismes passés, scénarii pour les séismes à venir) afin de définir des « séismes de référence », *Evaluation de l'aléa sismique*
 - ✓ **de déterminer l'influence du milieu** traversé par les trains d'onde depuis la source jusqu'au site considéré (« lois d'atténuation »),
 - ✓ **et enfin de définir les mouvements du sol** (accélération, fréquence, déplacement, durée) qui résulteraient des éléments précédents (séismes de référence et lois d'atténuation) mais aussi de la configuration géologique et topographique des sites étudiés (« effets de site »).

Etape 1 : La caractérisation des failles actives.

- Le préalable à l'évaluation de l'aléa sismique est la caractérisation des failles actives et de leur potentiel sismogène.
- La définition d'une faille active n'est pas simple et seules les failles actives fonctionnant par glissement sismique sont importantes pour l'aléa :
- De façon générale un séisme est défini comme un événement résultant d'une dislocation (distraction) des roches le long d'un ou de plusieurs segments de failles.
- Le glissement des deux compartiments rocheux produit des ondes qui peuvent être enregistrées par les sismomètres et la succession des glissements dans le temps produit une déformation cumulée.
- Les observations sismologiques et géodésiques ont montré que plusieurs processus produisent des glissements le long des plans de faille :
 - les glissements sismiques (*e.g.* Montessus de Ballore, 1906 ; Reid, 1910),
 - les glissements sismiques lents (*e.g.* Heki et al., 1997 ; Dragert et al., 2001)
 - et les glissements asismiques (*e.g.* Steinbrugge et Zacher, 1960 ; King et al., 1975 ; Lee et al., 2003).
- ***C'est la vitesse de glissement qui caractérise le mieux le type de glissement*** (Tableau ci-dessous). Sur le terrain, sauf dans le cas particulier des ruptures sismiques atteignant la surface, le géologue observe les caractéristiques structurales et le déplacement cumulé sur un plan de faille mais ces paramètres ne permettent pas de répondre simplement à la question du comportement (glissement sismique ou asismique ?) de la faille analysée (*e.g.* Sibson, 1986a ; Sleep et Blanpied, 1992 ; Pavlis et al., 1993) :

GLISSEMENT SISMIQUE	GLISSEMENT SISMIQUE LENT	GLISSEMENT ASISMIQUE
m / s	m / semaine – m / mois	cm / an – < mm / an

- ***Une faille active est une faille susceptible de produire un séisme dans le futur.***
- ✓ De façon pratique, on considère qu'une faille est active si elle est actuellement sismogène ou si elle a produit un séisme dans une période de temps proche.
- ✓ La période servant à la définition varie suivant le contexte (en particulier suivant le taux de déformation régionale) :
 - la période de référence est, par exemple, 10 000 ans pour la faille de San Andreas pour laquelle la vitesse de glissement long terme, donc le chargement en contrainte, est rapide (20

à 35 mm/an), alors qu'elle est de 2 Ma voire plus pour les failles à faible taux de glissement long terme (~0,1 mm/an) comme dans le domaine ouest-européen.

- ✓ La détermination de l'activité actuelle et/ou de la déformation cumulée et du comportement dans le temps ainsi que l'âge des derniers séismes produits par une faille sont donc des éléments fondamentaux pour décider de son activité sismogène potentielle et de son importance au regard de l'aléa.
- ✓ A l'échelle régionale, les caractéristiques géologiques du milieu et la détermination des différentes sources sismiques permettent de proposer un zonage sismotectonique :
 - c'est à dire la définition de zones géographiques dans lesquelles la probabilité d'occurrence d'un séisme de caractéristiques données peut être considérée comme égale en tout point.
 - Les caractéristiques des sources sismiques en particulier :
 - la localisation,
 - la géométrie,
 - la cinématique
 - et la magnitude potentielle) permettent alors d'accéder à l'énergie qui serait rayonnée dans le milieu lors d'un événement de référence.

Etape 2 : La modélisation du mouvement sismique régional (aléa sismique régional).

Les mouvements du sol résultant des séismes de référence dépendent (fig.5) :

- de l'énergie des séismes,
- de leur éloignement,
- de la nature des terrains traversés par les champs d'ondes
- et de la nature des terrains situés juste sous les sites considérés.

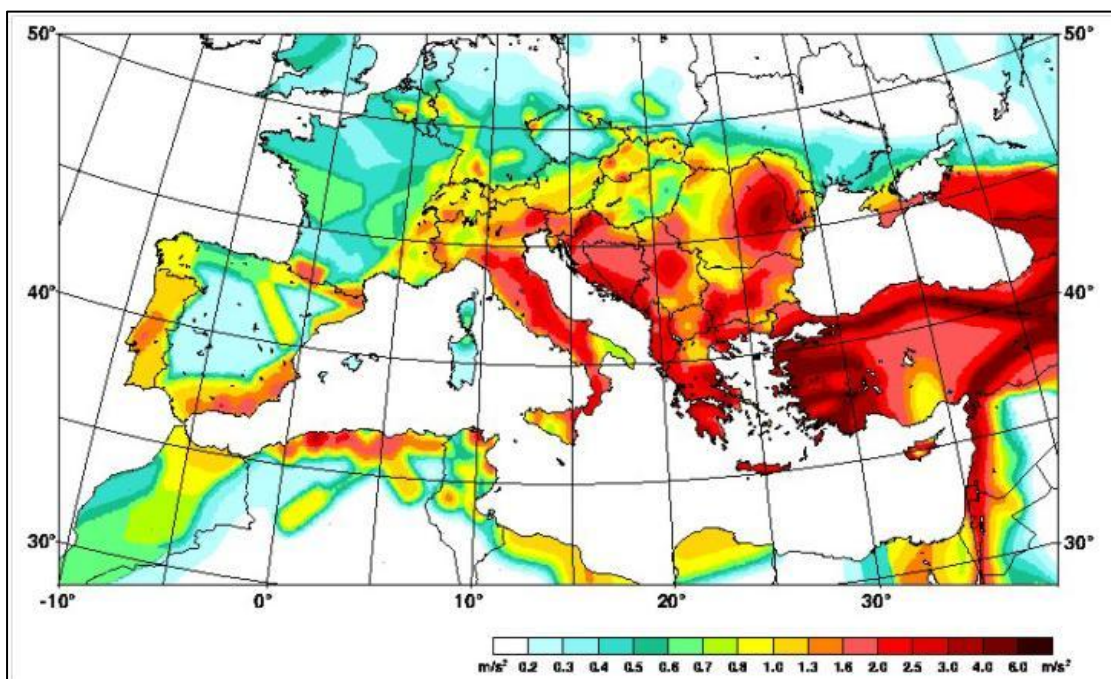


Figure 5 : Carte de l'aléa sismique régional autour de la Méditerranée : pic d'accélération maximale horizontale (m/s²). La probabilité de dépassement du pic maximum est de 10% sur une période de 50 ans (Grünthal et al., 1999).

Etape 3 : La prise en compte des effets de site (aléa sismique local).

- ❖ L'objectif final pour l'évaluation de l'aléa sismique est donc de fournir des valeurs de mouvement du sol qui soient utilisables pour l'aménagement des territoires et la prévention du risque : après les étapes 1 et 2, il est par conséquent nécessaire de prendre en compte les effets de site pour passer à l'échelle de l'aléa local (*e.g.* Lachet et al., 1996).
- ❖ ***Il faut alors effectuer un microzonage sismique de façon /***
 - à quantifier les effets de la topographie
 - la géologie du sol
 - et du sous-sol sur le site étudié (*e.g.* Duval, 2007).
- ❖ Le microzonage consiste à étudier une zone réduite (100 km² ou moins) correspondant à un site d'intérêt particulier : une ville par exemple. Il faut d'abord établir des cartes précises :
 - de la topographie (Modèle Numérique de Terrain à 2 m)
 - et de la géométrie en 3D
 - des formations superficielles (alluvions, colluvions, sédiments littoraux, remblais...).
 - Ensuite il faut modéliser et/ou mesurer sur le terrain le comportement des ondes sismiques sur ce site et déterminer les facteurs d'amplification du mouvement.
- ***La production de cartes d'aléa sismique*** se fait donc :
 - pour différentes échelles,
 - pour différentes probabilités
 - et différentes périodes de temps en fonction des besoins.
- Dans tous les cas l'estimation de l'aléa implique de définir le plus précisément possible :
 - l'ensemble des facteurs qui produisent et modifient les vibrations du sol et les éventuels effets induits. On ne peut réduire cette opération à la caractérisation des sources sismiques (localisation, cinématique et détermination d'une magnitude et d'un temps de récurrence possibles).
- ***C'est aussi lors de cette troisième étape que l'on intègre, dans des cartes d'aléa spécifique, les conséquences des effets éventuellement induits par les séismes tels que :***
 - les glissements de terrain,
 - la liquéfaction
 - et les tsunamis.

Bibliographie :

- Benhallou H. 1985. *Les catastrophes sismiques de la région de Chlef dans le contexte la sismicité historique de l'Algérie. thèse en science, université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, Alger, P.294.*
- WCC(Woodward and Clyde Consultants), 1984, *Microzonation sismique de la region d'Echlef ? Etude faite pour le CTC, Alger.*
- Archives GRAAG
- *Le risque sismique en PACA », coédition Région PACA, BRGM, DREAL PACA avec la collaboration du CETE Méditerranée décembre 2006*.*
- <http://www.planseisme.fr/L-alea-sismique,1408.html>
- Grünthal G., Bosse C., Sellami S., Mayer-Rosa D. and D. Giardini (1999). *Compilation of the GSHAP regional seismic hazard for Europe, Africa and the Middle East. Annali Geofisica, 42, 1215-1223.*
- C. Larroque. *Aléa sismique dans une région intraplaque à sismicité modérée : la jonction Alpes - Bassin Ligure.. Sciences de la Terre. Université Nice Sophia Antipolis, 2009. tel-00453377*
- Duval A.M. (2007). *Des effets de site aux scénarios de crise sismique : méthodes et applications. Rapport d'Habilitations à Diriger les Recherches, Université des Sciences et Technologies de Lille, 176 pp.*
- Dragert H., Wang K. and T.S. James (2001). *A silent slip event on the deeper Cascadia subduction interface. Science, 292, 1525-1528.*
- Lee J.C., Angelier J., Chu H.T., Hu J.C., Jeng F-S and R.J. Rau (2003). *Active fault creep variations at Chinhshang, Taiwan, revealed by creepmeter monitoring, 1998-2001. Journal of Geophysical Research, 108, B11, doi : 10.1029/2003JB002394*
- *Guide de gestion des risques géologiques (sismiques, mouvement de terrain, volcaniques, BRGM, n R38197, nov-1995*

Enseignant : (Dr) Hamadou.N