

LES OUVRAGES D'ART ET LE RISQUE SISMIQUE

Par M. BOUCETTA

INTRODUCTION

La situation géographique du Maroc, aux frontières de la plaque africaine, fait que plusieurs régions de notre pays peuvent être qualifiées de zones sismiquement actives. Les dernières sollicitations telluriques, qu'a connues la région d'Al Hoceima, en ont apporté l'ultime preuve. Elles ont, également, déclenché le débat sur la prise en compte du risque sismique dans le dimensionnement des structures en général.

Dans le domaine des ouvrages d'art, l'intégration de cet aspect dans les études courantes au Maroc, est assez récente et encore timide. En effet, en l'absence d'une carte sismique fiable du royaume, et d'un règlement marocain en la matière, rares ont été les ouvrages à être calculés au séisme.

Pour combler ce vide réglementaire, et garantir la prise en compte systématique de l'aléa sismique dans les études des ouvrages d'art dans les régions à risque, la DRCR a lancé une consultation pour l'élaboration d'un guide marocain de conception parasismique des ponts.

L'étude prévue en trois missions a pour objectif de mettre à la disposition des concepteurs et des gestionnaires d'ouvrages d'art, une carte de zonage sismique du territoire marocain fiable et actualisée, un guide pratique rappelant les principes du calcul dynamique des structures et détaillant les règles de la conception et du calcul sismiques des ponts ainsi que les dispositions constructives appropriées en les illustrant par des exemples de calcul intégralement traités, et enfin un manuel pour l'identification des désordres liés au séisme, l'évaluation de la vulnérabilité des ouvrages au risque sismique et la définition des méthodes d'intervention.

Nous développerons dans ce qui suit, les objectifs, la consistance et la méthodologie relatifs à chaque mission avant de détailler le déroulement et les premiers résultats de la première mission, en cours de finalisation.

I- DEFINITION ET CONSISTANCE DE L'ETUDE

1- Généralités

La mise à la disposition des concepteurs et gestionnaires d'ouvrages d'art d'une carte de zonage sismique fiable et actualisée et d'un règlement de calcul sismique des ponts pratique et adapté au contexte marocain est l'un des axes majeures de la stratégie d'intervention à moyen et long termes mise au point par la DRCR au lendemain du séisme d'Al Hoceima.

Pour mener à bien un tel projet, il était important de s'associer à une équipe d'experts et de spécialistes dans le domaine. C'est ainsi que, la mise au point du CPS et du règlement de la consultation et l'aboutissement de la procédure a pris plus d'un an et demi.

Par ailleurs, un comité de pilotage regroupant des représentants des organismes gestionnaires de parcs d'ouvrages d'art (ADM et ONCF) en plus de la DRCR et de la DAT a été constitué pour suivre le déroulement de cette opération depuis l'élaboration du cahier de charges jusqu'à l'approbation des rapports finaux afin de garantir la prise en compte des spécificités des ouvrages autoroutiers et des ouvrages ferroviaires. Des réunions du comité

de pilotage sont organisées à la fin de chaque phase pour l'examen et la validation des rapports d'étapes.

L'étude se veut complète. Elle ambitionne de traiter tous les aspects de la prise en compte du risque sismique dans les ouvrages d'art depuis la donnée de base (l'accélération nominale), jusqu'à la gestion du parc des ouvrages existants non calculés au séisme en passant par la conception et le calcul sismique des ouvrages à construire. L'étude, prévue en huit mois, comprend, ainsi, trois missions :

Mission 1 : Elaboration d'un zonage sismique du Maroc

Mission 2 : Elaboration d'un guide de conception parasismique des ponts

Mission 3 : Elaboration d'un manuel pour l'identification des désordres liés au séisme, l'évaluation de la vulnérabilité des ouvrages existants et la définition des méthodes d'intervention

2- Mission 1 : Elaboration d'un zonage sismique du Maroc

2.1 Généralités

La première mission a pour objectif d'établir et de justifier des cartes d'aléa sismique pour différents paramètres représentatifs du mouvement sismique et différentes périodes de retour, sur l'ensemble du territoire marocain, à partir des données sismologiques et tectoniques disponibles afin d'aboutir à une carte de zonage sismique réglementaire.

L'équipe affectée à cette mission est composée d'un expert en sismologie, d'un expert en géologie, de deux sismologues et de trois géologues de la société GEOTER qui a été chargée, dernièrement, de l'actualisation du zonage sismique de la France.

La mission, prévue en 4 mois se déroule en trois phases.

2.2 Phase 1 : Collecte et analyse des données de bases, recherche bibliographique et choix méthodologiques

D'une durée d'un mois, cette phase a permis la collecte, la compilation et l'analyse des données géologiques, géotechniques, tectoniques et sismiques disponibles.

L'examen critique des méthodes pratiquées par d'autres pays dans ce domaine et l'analyse des choix méthodologiques présentés par le consultant a permis d'opter pour une approche probabiliste.

Le principe et les détails des choix méthodologiques et de la démarche adoptés seront développés plus loin.

2.3 Phase 2 : Evaluation de l'aléa sismique probabiliste

Durant un mois et demi et sur la base des résultats de la première étape, des données compilées et des choix méthodologiques adoptées, le consultant a procédé à l'établissement de cartes d'aléa sismique pour différents paramètres représentatifs du mouvement sismique et différentes périodes de retour suivant les étapes ci-après :

- Elaboration et affinage de modèles sismotectoniques en zones sources, permettant de caractériser la géométrie des zones et leur activité ;
- Elaboration de modèles probabilistes adaptés au contexte sismotectonique de la zone d'étude et à la spécificité des sources ;
- Elaboration ou choix de modèles de propagation et d'atténuation, en accélération ;
- Calculs probabilistes permettant de définir les paramètres de mouvement du sol recherchés, en chaque maille du territoire concerné, pour différentes périodes de retour spécifiées, et permettant d'apprécier également les incertitudes dont les résultats peuvent être entachés. Recours éventuels aux techniques de désagrégation

de l'aléa pour apprécier l'influence respective de chaque zone source et des techniques d'arbre logique et de Monte Carlo pour estimer les incertitudes ;

- Présentation des résultats sous forme de cartes d'aléa sismique.

2.4 Phase 3 : Définition du zonage sismique du Maroc

Les cartes d'aléas pour différentes périodes de retour permettent d'engager la réalisation du zonage réglementaire. Le territoire national est ainsi découpé en plusieurs zones de sismicité sur la base de critères prédéfinis et des valeurs d'accélération à prendre en compte dans le calcul sont attribuées à chaque zone. La superposition de la cartographie du zonage sismique et de celle du découpage administratif permettra, enfin, de situer les différentes communes du royaume par rapport au risque sismique.

Les résultats finaux seront présentés sous forme de :

- Cartes des paramètres du mouvement du sol à l'échelle du territoire étudié ;
- Tableau détaillé permettant de localiser les communes ou provinces vis-à-vis du classement adopté en différentes zones sismiques ;

La finalisation de cette phase d'une durée de (1.5 mois) est prévue pour la fin de l'année.

2.5 Rapports de mission

Le dossier final comprendra :

- une note de présentation et d'analyse des données de base de l'étude ;
- une note de présentation de la méthodologie, des hypothèses effectuées dans les modèles probabilistes ;
- des cartes représentatives des modèles probabilistes (paramètres a, b, Mmax, profondeur focale) et une représentation des distributions probabilistes modélisées ;
- une note technique de présentation des résultats obtenus ;
- les cartes d'aléa sismiques pour les différents paramètres spécifiés sous forme papier et sous forme numérique ;
- la carte de Zonage sismique du Maroc ;
- les fichiers des résultats obtenus pour les paramètres spécifiés aux différents points de la grille utilisée dans les modèles probabilistes, sous forme informatique compatible avec les outils usuels de type base de données (base de données au format ASCII accompagné d'un descriptif complet des champs de la base) ;
- Un fichier avec les résultats obtenus pour les paramètres spécifiés des différentes communes du territoire marocain.
- une note de synthèse de l'étude ;
- une nomenclature des documents constituant le dossier final.

3- Mission 2 : Elaboration d'un guide de conception parasismique des ponts

3.1 Généralités

Cette mission a pour objectif de développer les principes généraux de la conception parasismique des ouvrages courants (ponts routiers, autoroutiers, ferroviaires, etc...), de définir les règles permettant de justifier ces ouvrages et enfin d'établir des dispositions constructives appropriées.

L'équipe affectée à cette mission est composée de trois experts en ouvrages d'art, d'un expert en calcul dynamique, d'un expert en géotechnicien, de trois ingénieurs ouvrages d'art et d'un géotechnicien du Groupement SETEC TPI- MAROC SETEC. Elle sera assistée par

l'équipe de la mission 1 pour le traitement des aspects relevant de la sismologie et de la géologie.

La mission, prévue en 4 mois se déroulera en huit phases. Elle démarrera vers le début du mois de février 2007.

3.2 Recherche bibliographique et Analyse des guides et des règlements disponibles dans d'autres pays

Lors de cette étape, il sera procédé à une recherche bibliographique et à une analyse critique des différents guides et règlements disponibles ainsi que des pratiques des autres pays dans ce domaine. Il s'agit, notamment, de :

- Etats-Unis (Général AASHTO Standard Specification for Highways Bridges, ou spécifique à la Californie SDC Caltrans Seismic Design Criteria)
- Japan (JSCE Design Specification for Highway Bridges in Japan and Design Earthquake Motions)
- Nouvelle Zélande (NZ New Zeland Code)
- Europe (EC8 Eurocode 8 : Design of structures for earthquake resistance Part2 : Bridges)
- France (Guide AFPS92 pour la protection parasismique des ponts)
- Italie (Ordinanza 3274-Disposizioni relative ai ponti)
- Espagne (NCSE-02 Norma de Construcción Sismoresistente)

Le choix de ces règlements, en particulier, a été fait en considérant les régions du globe les plus frappées par des épisodes sismiques violents, mais aussi celles des pays les plus proches de la zone maghrébine.

Le recueil de ces données permettra de disposer d'une vue globale de l'état de la réglementation mondiale dans le domaine de la conception parasismique des ponts. Une synthèse des philosophies parasismiques internationales sera établie afin de déterminer les grandes options de dimensionnement qui se présentent aux concepteurs.

En parallèle avec ce travail bibliographique, une compilation du retour d'expérience des projets de conception, de calcul et de construction de ponts en zone sismique réalisés par les ingénieurs du groupement et ceux de la DRCR sera mise en place pour une meilleure analyse des règlements étudiés.

3.3 Classification des ouvrages

Sur la base des conclusions de la première étape, il sera proposé à l'administration des critères pour la classification des ouvrages vis-à-vis du séisme.

Ces critères devront tenir compte, essentiellement, des facteurs socio-économiques, de la particularité des différents réseaux, de la destination des ouvrages, des notions de risque toléré et de niveau de sécurité souhaité.

Pour ce faire, il sera procédé à une enquête auprès des différents intervenants et des gestionnaires des différents réseaux (routes, autoroutes, chemins de fer) ainsi qu'à une étude socio-économique intégrant l'ensemble des facteurs pouvant être déterminants dans ce genre de cas.

3.4 Détermination des accélérations nominales

En fonction du zonage sismique et de la classification des ouvrages validés lors des étapes précédentes, il sera procédé à la détermination des accélérations nominales à adopter traduisant un compromis entre l'aléa sismique et le surcoût économique des mesures de protection. Ces valeurs seront le résultat d'une étude technique, probabiliste et économique.

Une évaluation économique de l'impact des valeurs proposées permettra d'atteindre le compromis souhaité entre le niveau de sécurité souhaité et le surcoût engendré.

3.5 Définition des règles de conception

On définira d'une façon exhaustive, sans s'y restreindre :

- l'ensemble des règles de conception générale des différents types d'ouvrages,
- les recommandations de conception des différents éléments des ouvrages (tablier, appareils d'appui, piles et culées, fondations)
- les règles de conception détaillée relatives aux équipements et aux dispositifs parasismiques

Ces règles de conception devront être justifiées par une analyse du comportement des différents ouvrages et parties d'ouvrages sous séismes.

3.6 Détermination des méthodes de calcul sismique des ouvrages

Il sera procédé, premièrement, à un rappel synthétique des principes de calculs dynamiques nécessaires à la bonne compréhension physique et structurelle du séisme. Il sera accompagné d'une synthèse des notions principales en matière de sismologie et de phénomènes sismiques, ainsi que d'un glossaire des principaux termes spécifiques que le concepteur peut être amené à rencontrer.

En se basant sur ces principes, on développera les méthodes de calcul sismique, des différents types de ponts et parties de ponts. Seront particulièrement traitées, les méthodes d'usage courant pour les ponts en béton armé, précontraint, ossature métallique ou mixte: méthode monomodale, méthode multimodale avec cumul quadratique, méthodes d'intégration temporelle linéaires...

Il s'agit de :

- Indiquer le domaine d'application de chaque méthode
- Préciser les hypothèses de calcul (comportement, amortissement, etc.)
- Détailler le principe des méthodes et le déroulement des calculs
- Déterminer les paramètres nécessaires pour les différentes étapes du calcul (spectres réglementaires, classification du sol, etc.) et définir les moyens nécessaires de les avoir.

3.7 Détermination des dispositions constructives

Lors de cette étape, il sera procédé à la définition de dispositions constructives spéciales à adopter en cas de séisme. Ces dispositions devront être justifiées et devront répondre à un double souci de sécurité et d'optimisation. Elles concernent, notamment, les notions de zone critique, de quantité minimale d'armatures, de longueur de recouvrement d'armature, de maintien transversal des aciers longitudinaux, etc...

3.8 Traitement des phénomènes annexes

Il sera procédé à l'analyse des phénomènes annexes pouvant survenir en cas de séisme tels que la liquéfaction du sol. On définira les essais nécessaires à leur identification ainsi que les dispositions spéciales à adopter pour chaque cas.

3.9 Développement d'exemples de calcul

Cette phase, bien que présentée en dernier lieu, sera traitée dès le début de la mission 2 et en parallèle avec ses différentes phases. En effet, les résultats des exemples de calcul permettront d'orienter les choix et décisions à prendre et d'optimiser au mieux les valeurs des paramètres à adopter par une évaluation de l'impact de chaque facteur.

Ces exemples seront traités en intégralité et avec le plus de détails possibles pour faciliter l'utilisation du guide et l'application des méthodes exposées dans ce dernier.

Le choix des exemples à traiter tiendra compte à la fois des ouvrages existants, des ouvrages en projet, ainsi que des types d'ouvrages à venir au Maroc. Une attention particulière sera accordée à ce choix de façon à ce que les exemples soient les plus complets possibles en intégrant l'ensemble des aspects et des phénomènes relevant du calcul sismique et en détaillant le calcul des différents éléments des ouvrages.

3.10 Rapports de mission

Le rapport final de la mission 2 sera sous forme d'un projet de guide de conception parasismique des ponts pratique, détaillé et illustré avec en annexe les différents exemples de calcul traités. Ce rapport comprendra l'ensemble des résultats de la Mission 2. Un accent particulier sera mis sur la présentation et l'aspect méthodologique de la démarche adoptée.

L'ensemble des données brutes, des études, enquêtes et résultats intermédiaires relatifs aux différentes étapes de la mission sera fourni en annexe. Une copie sera fournie sur support informatique.

Une copie de tous les documents, règlements ou normes techniques étrangères utilisées figurera également en annexe. Avec une traduction, en français, pour les documents qui sont écrits dans des langues autres que l'arabe ou le Français.

Il est prévu, également, d'élaborer une version résumée, en arabe, du guide.

4- Mission 3 : Elaboration d'un manuel pour l'identification des désordres liés au séisme, l'évaluation de la vulnérabilité des ouvrages existants et la définition des méthodes d'intervention

4.1 Généralités

La majorité des ouvrages d'art existants au Maroc n'ayant pas été calculés au séisme, il était important de consacrer une partie de cette étude au traitement de cette problématique.

La mission 3, a donc pour objectif de mettre à la disposition des gestionnaires de parc d'ouvrages d'art une plateforme de travail qui permettra d'élaborer une stratégie d'intervention relative aux ouvrages existants situés dans les zones à risque.

Le rapport final sera présenté sous forme d'un manuel précisant les désordres liés au séisme, les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité de ces ouvrages vis-à-vis du risque sismique et les procédés de réparation et de confortement.

L'équipe chargée de la mission 2 sera assistée dans la réalisation de cette mission par un Expert en pathologie d'ouvrages d'art.

La mission, prévue en 2 mois se déroulera en trois phases. Elle démarrera vers le début du mois de juillet 2007.

4.2 Définition des pathologies d'ouvrages d'art d'origine sismique

Il sera procédé à une analyse des pathologies des ponts dans le but de définir, d'une façon exhaustive, en les illustrant, les désordres ayant affecté ou pouvant affecté les ponts à la suite d'une sollicitation tellurique.

Les effets potentiels des séismes sur les ouvrages seront analysés en fonction de leur vulnérabilité. En particulier (mais la liste n'est pas exhaustive) les éléments suivants sont à considérer :

- Degré d'hyperstaticité de l'ouvrage
- Nombre de joints de dilatation
- Courbure ou biais de l'ouvrage

- Année de construction
- Régularité du système d'appui
- Hauteur des piles
- Vulnérabilité des appareils d'appui
- Sol de fondations
- Risques de liquéfaction
- Hauteur des culées
- ...

Cette démarche aboutira à une liste de désordres et à la formulation de critères pour l'évaluation du risque par ouvrage.

4.3 Elaboration d'une méthodologie de traitement et de protection des ouvrages existants vis-à-vis du séisme

Les désordres survenant sur les ouvrages peuvent être évalués par inspection visuelle, instrumentation fixe, relevés topologiques...

Les différentes méthodes seront envisagées dans une approche critique en vue de leur mise en œuvre pratique par l'Administration.

Des méthodologies de diagnostic d'ouvrages avant et après séisme seront proposées en vue de la définition de mesures de renforcement ou de réparation respectivement.

Il sera précisé :

- les essais nécessaires à la prospection des désordres
- les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des ouvrages existants au séisme
- l'instrumentalisation nécessaire au suivi d'évolution des désordres
- la méthodologie à suivre pour l'analyse des résultats des différentes prospections
- les différents résultats et conclusions pouvant être tirés de cette analyse

4.4 Définition des méthodes d'intervention en cas d'apparition de désordres liés au séisme

Sur la base des résultats des précédentes étapes, on développera une démarche qui permettra à l'Administration de déterminer la nature de l'intervention à envisager en fonction des désordres enregistrés et de leur importance.

Les mesures de renforcement ou de réparation permettant la correction des désordres seront précisées en fonction de la pathologie diagnostiquée et de son importance.

Les enjeux économiques seront pris en considération en concertation avec l'Administration.

4.5 Rapports de mission

Les documents réalisés aux différentes étapes précédentes seront rassemblés sous la forme d'un manuel unique permettant :

- Le diagnostic de risque par typologie d'ouvrage
- Les mesures, observations ou essais nécessaires à la confirmation du diagnostic, en vue d'un renforcement (avant séisme) ou d'une réparation (après séisme)
- Les solutions et interventions nécessaires à la mise en œuvre des renforcements ou des réparations.

Une attention particulière sera accordée à l'illustration du manuel et à sa présentation.

Une copie de tous les documents, règlements ou normes techniques étrangères utilisées figurera également en annexe. Avec une traduction, en français, pour les documents qui sont écrits dans des langues autres que l'arabe ou le Français. Il est prévu, également, d'élaborer une version résumée, en arabe, du guide.

II - ELABORATION DU ZONAGE SISMIQUE DU MAROC : DONNES DE BASE, CHOIX METHODOLOGIQUES ET PREMEIRS RESULTATATS

1- Aperçu sur le contexte sismotectonique du Maroc :

Le Maroc est situé sur une limite majeure entre deux plaques tectoniques : la plaque Eurasienne et la plaque Africaine. Il est, également, au carrefour de différents domaines sismotectoniques appartenant à différents pays : transformante Est Atlantique, Sud de l'Espagne, Sud du Portugal et Ouest de l'Algérie. D'après l'analyse des données géophysiques et géologiques, la limite de plaques, entre Afrique et Ibérie depuis l'Atlantique jusqu'en méditerranée, passe d'ouest en est d'une limite claire et précise à une zone diffuse. (Figures 1, 2 et 3)

Figure 1 : Contexte géodynamique et sismotectonique de l'Europe et du Nord de l'Afrique

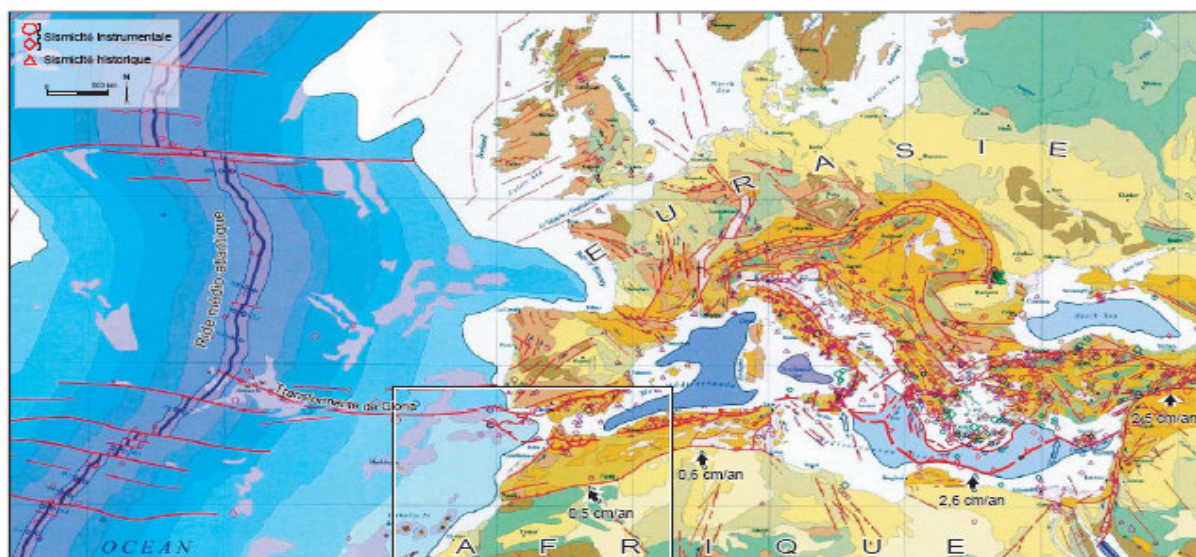


Figure 2 : Contexte sismotectonique des régions nord du Maroc et Sud de la péninsule Ibérique

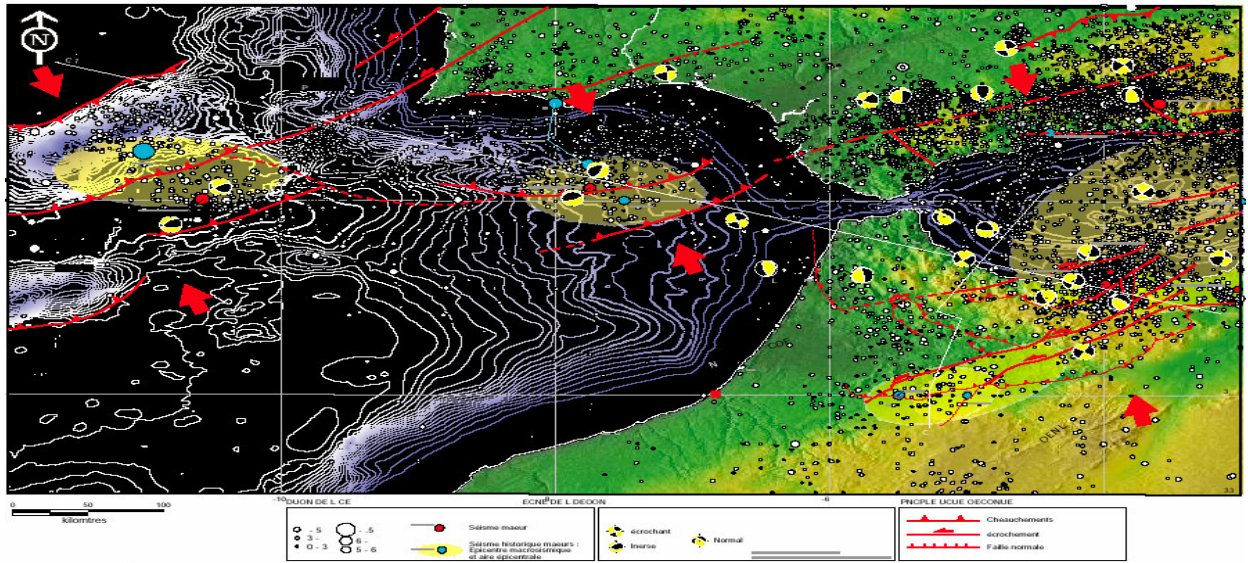
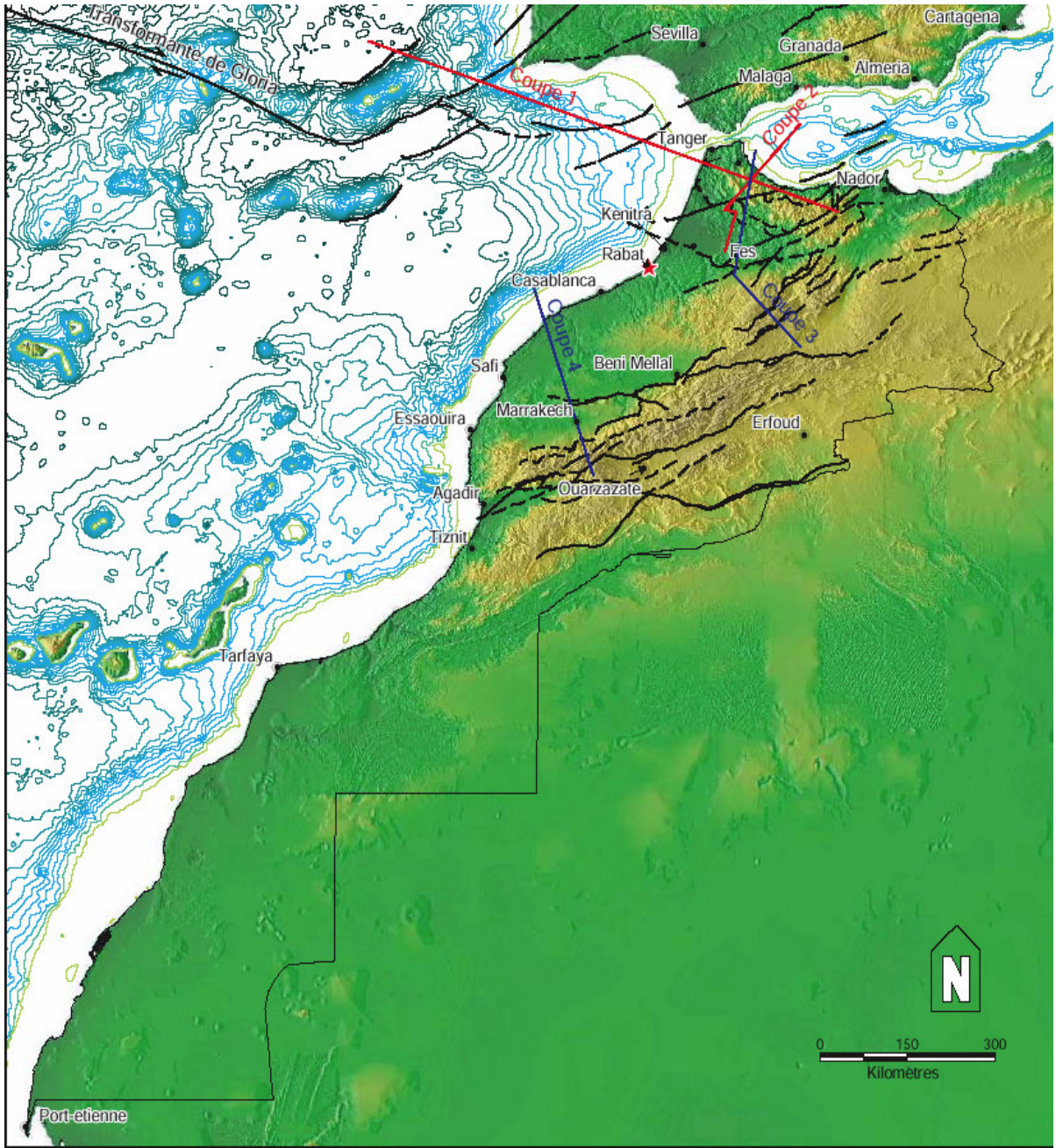


Figure 3 : Cartes des principales failles du Nord du Maroc et du Sud de la plaque ibérique et localisations des coupes d'échelle crustale



2- Données d'entrée : Présentation, contraintes et critères de sélection

Les données d'entrée prises en compte dans l'étude obéissent aux deux critères de sélection suivants :

- Les données d'entrée et bases de données doivent avoir été validées par un comité technique et scientifique, une publication internationale ou par une autorité de sûreté compétente ;
- Il est tenu compte des travaux les plus récents, dont certains pourraient être de nature à remettre en cause des hypothèses communément admises.

2.1 Données de base géologiques et néotectoniques

L'étude s'est basée sur des travaux récents réalisés par différents organismes. Ils concernent aussi bien le territoire continental marocain et les domaines frontaliers que le domaine marin méditerranéen ou atlantique. Il s'agit de :

- Cartes géologiques et structurales disponibles au 1/500 000^{ième} et 1/1 000 000^{ième}
- Cartes et études néotectoniques
- Cartes sismotectoniques de la péninsule ibérique, des Baléares et des Canaries au 1/1 000 000^{ième} et des études sismotectoniques de la partie sud de l'Espagne et du Portugal.
- Evaluation déterministe de l'aléa sismique pour le Port de Tanger-Méditerranée
- Résultats de l'évaluation des mouvements sismiques réalisés pour le site du Centre d'Etudes nucléaires de la Maamora
- Travaux récents concernant l'aléa sismique dans les pays du Maghreb et d'Ibérie
- Etudes géologiques, géophysiques et hydrodynamiques récentes sur les sources à l'origine des séismes historiques majeurs de Lisbonne et de Meknès.

2.2 Données de sismicité et compilation d'un catalogue homogène

Pour une bonne mise en œuvre d'une approche probabiliste pour le calcul de l'aléa sismique, il est nécessaire de disposer de données homogènes et exhaustives.

Une zone d'étude a été définie de telle sorte que toutes les sources sismiques capables de produire sur le territoire marocain des niveaux d'accélération maximale du sol de quelques centièmes de g, soient considérées. Elle est ainsi comprise dans un champ d'environ 100 à 200 km autour des côtes ou des frontières terrestres du Royaume du Maroc. Vers le Nord-Ouest, la zone d'étude s'étend à plus de 500 km de manière à prendre en compte la source lointaine du séisme historique majeur et catastrophique de 1755. Le cadre de la zone géographique est compris entre les longitudes 17.5°W à 0.5°E et les latitudes 20.6°N à 38°N.

Un catalogue de sismicité compilé, couvrant toute la zone de l'étude, a dû être constitué pour les besoins de l'étude en se basant sur différentes sources d'informations pour être le plus exhaustif possible (**Figure 4**):

- Catalogue national marocain de sismicité historique, période 1079-1899, compilé par Tadili et Ait Brahim, utilisé dans le cadre du RPS2000.
- Catalogue de sismicité instrumentale (1900-1999) compilé par Cherkaoui T.E. (1999)
- Catalogue national du service sismologique de l'Institut Géographique National espagnol, période 944-2005. Ce catalogue a été utilisé pour compléter au Nord (Espagne et Portugal) le catalogue national marocain.

- Catalogue international de l'ISC (International Seismological Center). Ce catalogue est utilisé pour compléter les données les plus récentes sur la période 2005-début 2006).
- fichier des séismes historiques majeurs du Maroc (Ramdani et al., 1988 ; El Mrabet et al., 1991 ; El Mrabet, 1991 ; Levret, 1991, El Mrabet, 2005) pour la période antérieure à 1900 qui permet un niveau de connaissance suffisant sur la macrosismicité du nord du Maroc sur une durée de 1000 ans.

Il a été procédé, ensuite, à l'homogénéisation de toutes les données. En effet, les catalogues de sismicité font généralement référence à différents types de magnitudes (magnitude de durée, magnitude locale, magnitude de moment, magnitude de surface). Par ailleurs, certains séismes ne sont renseignés qu'en intensité, comme c'est le cas des principaux événements du catalogue historique marocain et du catalogue IGN.

La conversion des intensités en magnitudes a été réalisée par applications des lois de Cherkaoui 1991(loi1 et loi2) et Karnick1968 (loi3) :

Loi 1 : $M = 0.430 I_0 + 1.706 \pm 0.652$ (187 données ; domaine de validité $IV < I_0 < X$)

Loi 2 : $M = 0.578 I_0 + 0.849 \pm 0.646$ (100 données ; domaine de validité $V < I_0 < X$)

Loi 3 : $M = 0.67 I_0 + 0.15$ (domaine de validité $IV < I_0 < X$)

Pour éviter l'incertitude liée aux relations de conversion, il a été décidé de conserver les magnitudes fournies par les catalogues d'origine.

Il a été procédé enfin, au nettoyage du catalogue des doublons et des répliques par une méthode qui utilise un logiciel de GEOTER et qui considère une fenêtre spatiale et temporelle dont la largeur est fonction de la magnitude du choc principal.

La **figure 5** présente des histogrammes du nombre de séismes par classe de magnitude sur l'ensemble du catalogue.

Figure 4 : Sismicité historique et instrumentale du Royaume du Maroc et des régions voisines

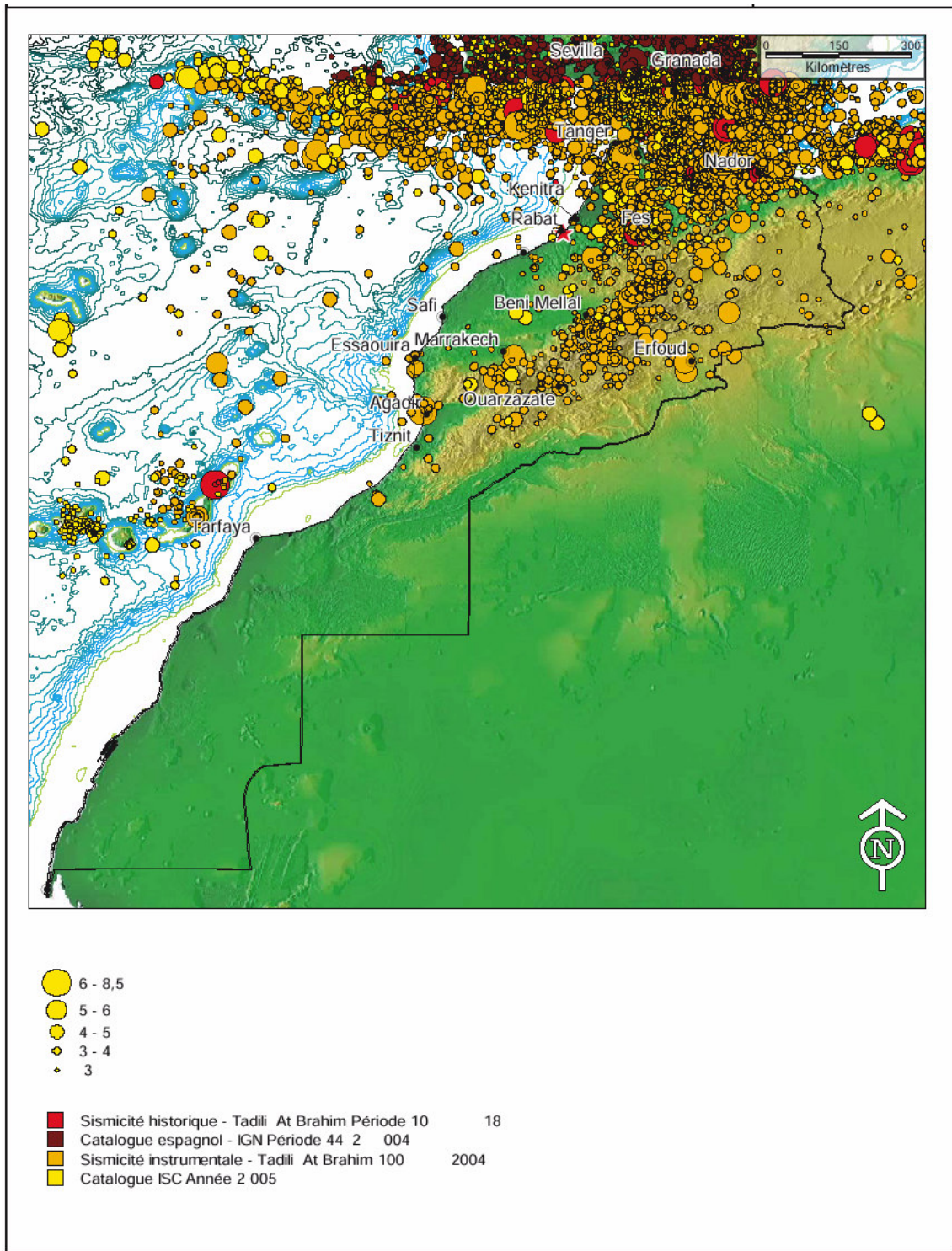
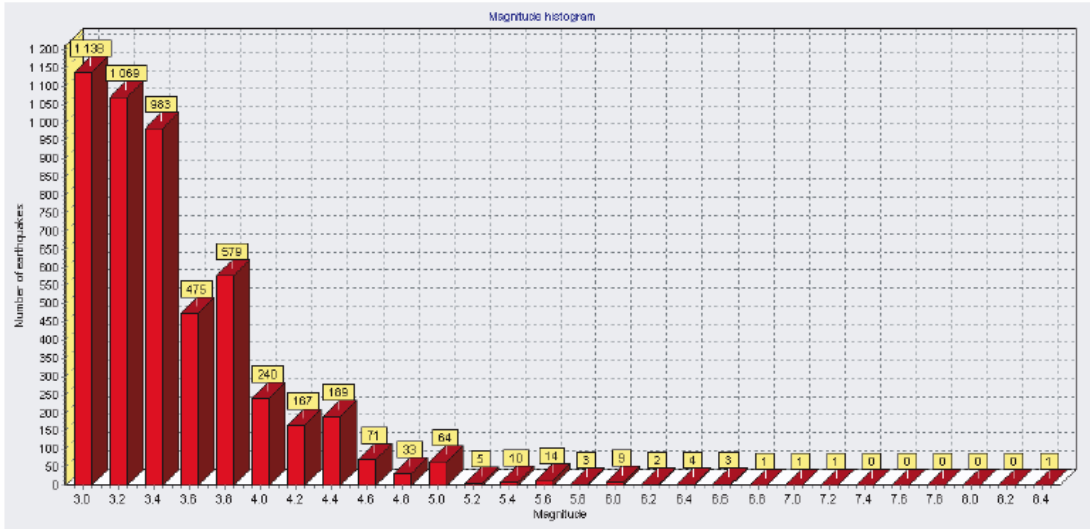
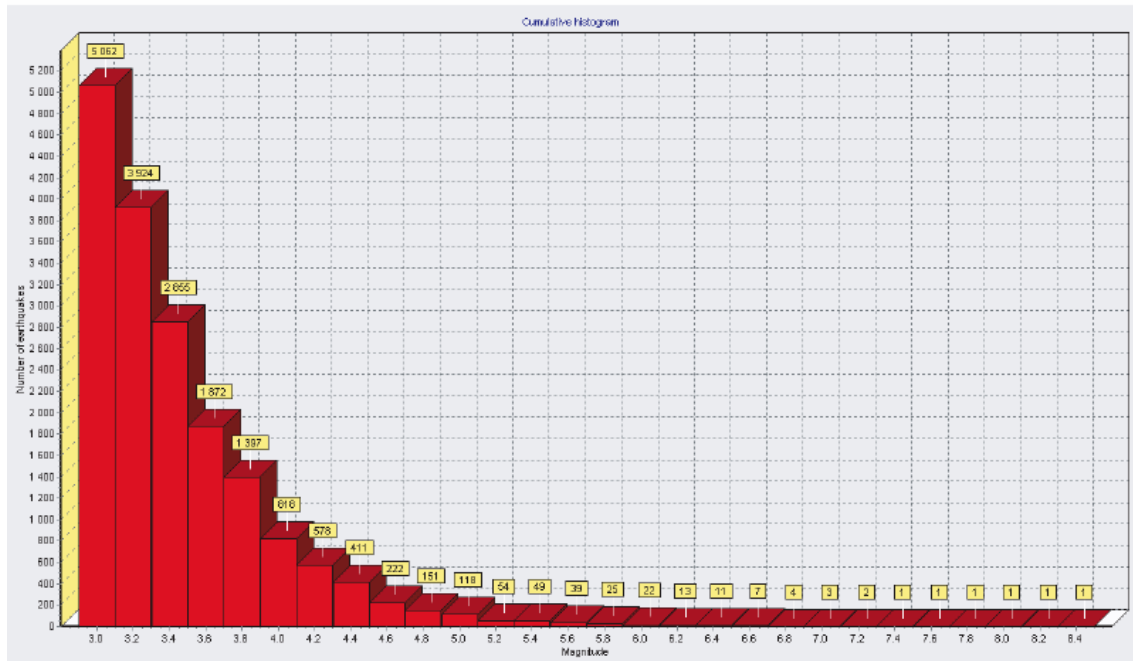


Figure 5 : Catalogue de sismicité compilé pour la zone d'étude Maroc - nombre de séismes par classes de magnitude

Nombre de séismes par classes de magnitude



Nombre cumulé de séismes par classes de magnitude



3- Choix méthodologiques

3.1 Philosophie de l'approche probabiliste et de la prise en compte des incertitudes

L'évaluation probabiliste conduit à l'estimation des probabilités que des mouvements sismiques soient atteints ou dépassés en des points donnés, au cours d'une période de temps future donnée.

Du fait des grandes incertitudes sur les données géologiques et sismologiques, de la part importante d'interprétation, de formulation d'hypothèses, et de jugement d'expert dans l'analyse des données et de la possibilité de choix multiples dans les modèles mathématiques auxquels fait appel l'approche probabiliste, il convient généralement de considérer plusieurs modèles d'identification des zones source ainsi que les deux types d'incertitudes suivants : les incertitudes dites épistémiques, et les incertitudes aléatoires.

- **Incertitudes « épistémiques »**

Ce sont les incertitudes traduisant une lacune dans les connaissances, lorsque la compréhension scientifique est imparfaite. Ces incertitudes peuvent être réduites à l'avenir à la faveur de résultats de recherches ou d'acquisition de données nouvelles.

- **Incertitudes « aléatoires »**

Ce sont des incertitudes qui ne peuvent pas être connues précisément, ni donc réduites significativement du fait de leur caractère aléatoire. Entrent par exemple dans cette catégorie, la délimitation des zones source d'un modèle sismotectonique, la définition de lois d'atténuation des mouvements sismiques, la définition de la magnitude maximale. Ces incertitudes sont variables d'un contexte sismotectonique à l'autre. Dans un contexte intracontinental assez stable, il s'agit par exemple des fourchettes de valeurs de grandeurs caractéristiques, comme la magnitude ou la profondeur des séismes de référence.

Dans le cadre de l'évaluation de l'aléa sismique à l'échelle du Royaume du Maroc, nous avons de ce fait tenu à ce que l'approche probabiliste, qui doit conduire à un zonage probabiliste supportant un zonage sismique réglementaire, considère bien, dans la mesure du possible, les différentes hypothèses fondamentales sur les données d'entrée, pour aboutir à des valeurs moyennes des paramètres calculés, qui reflètent bien les incertitudes.

De ce fait, deux modèles sismotectoniques très différents ont été considérés. Il s'agit d'un modèle développé par GEOTER et intégrant les résultats de différentes études réalisées sur le territoire du Royaume du Maroc, et d'un modèle alternatif développé par des experts marocains, reposant en grande partie sur le zonage établi pour les Règles Parasismiques du bâtiment (RPS 2000).

Sur cette base, l'objectif est d'exprimer, au travers de l'approche méthodologique proposée et des modèles en découlant, la diversité des avis ayant conduit aux travaux précédemment cités, ainsi que les incertitudes associées aux données d'entrée par :

- **La considération de deux modèles sismotectoniques** différents
- L'application d'une **technique de lissage** qui ne nécessite aucun zonage ;
- L'utilisation d'une **technique par arbre logique** permettant la prise en compte pondérée des alternatives sur ces modèles, sur les lois d'atténuation ;
- L'application l'une **technique dite de Monte-Carlo** pour effectuer des tirages aléatoires sur les paramètres influents (paramètres des lois de distribution, magnitude maximale, profondeur).

Ces techniques permettent de propager les incertitudes propres aux modèles d'entrée et d'exprimer des résultats traduisant leur prise en compte, sous différentes formes (valeurs moyennes, valeurs extrêmes minimales et maximales, valeurs médianes, ou valeurs pour un intervalle de confiance donné). La considération et l'évaluation de l'impact des incertitudes sur les mouvements dimensionnant, constituent notamment l'une des recommandations de l'Eurocode 8.

La **Figure 6** présente de manière schématique la méthodologie générale de l'approche probabiliste avec intégration du traitement des incertitudes dans les différentes étapes de l'analyse et du calcul.

Les accélérations maximales du sol à période nulle sont calculées pour **trois périodes de retour : 100, 475, et 975 ans**, pour une condition standard de sol rocheux. La période de retour de 100 ans permet un calage grâce à la récurrence de séismes qui ont eu lieu sur un siècle et pour lesquels le catalogue de sismicité est généralement complet. Celle de 475 ans correspond à la période adoptée dans tous les codes et guides internationaux. Enfin, celle de 975 ans est mieux adaptée pour définir les mouvements sur les sites d'ouvrage d'art d'importance.

A chacune d'elles correspondent différentes probabilités de dépassement des pics d'accélération, au cours de périodes de temps données. Ces probabilités sont indiquées à titre d'exemple dans le tableau suivant, en fonction de la période de retour, et de deux périodes de temps de référence (50 ans et 100 ans).

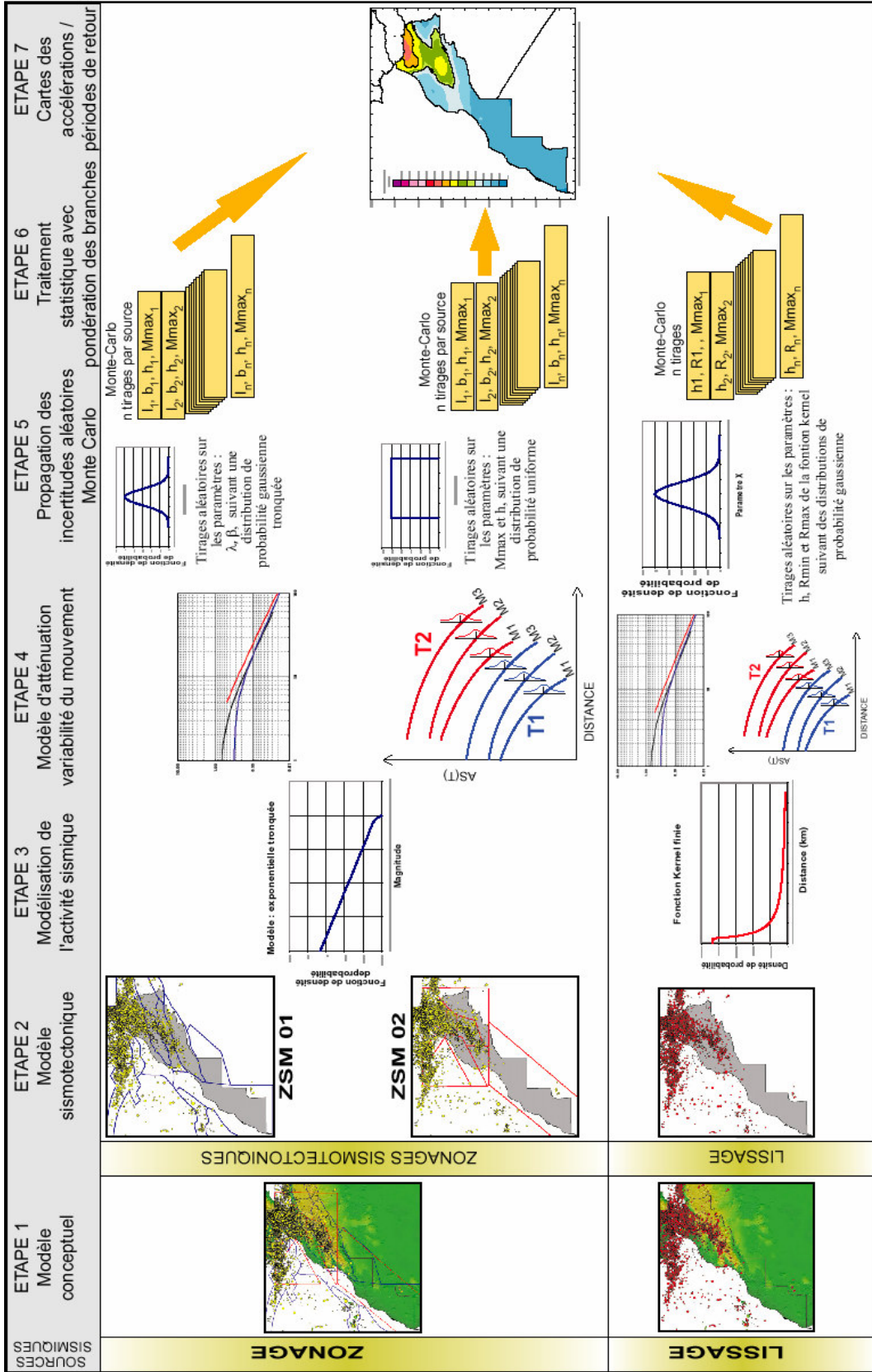
Probabilités de dépassement		Période de temps (ans)	
		50	100
Période de retour de calcul (ans)	100	39%	63%
	475	10%	20%
	975	5%	10%

Tableau 1 : Probabilité de dépassement (%) correspondant aux périodes de retour auxquelles le pic d'accélération sera calculé

Un calcul à la période de retour de 475 ans signifie, par exemple, que l'on détermine le niveau d'accélération correspondant à une probabilité d'atteinte ou de dépassement de 10% en 50 ans ou de 20 % en 100 ans.

En calculant les valeurs d'accélération à plusieurs périodes de retour, nous disposerons ainsi d'un argumentaire pour apprécier à quelle probabilité correspond l'accélération de dimensionnement que nous voulons adopter.

Figure 6 : Méthodologie générale de l'approche probabiliste



3.2 Application de l'approche et démarche séquentielle

La méthode probabiliste proposée par le consultant est conforme aux règles de l'art préconisées par plusieurs guides et réglementations (nouveau zonage sismique probabiliste de la France réalisé par GEOTER, Eurocode 8 pour les ouvrages conventionnels, Bulletins de l'ICOLD pour les grands barrages, etc.).

Dans les régions plus actives, comme le Nord du Maroc, l'évaluation des mouvements sismiques à quelques milliers d'années de période de retour reste en particulier entachée d'incertitudes, du fait d'un échantillon de sismicité historique au mieux représentatif d'une période de quelques siècles, et du fait que les forts séismes associés aux failles actives « lentes » ont des périodes de retour importantes. Ainsi, les périodes de retour associées aux séismes de référence d'une approche déterministe, souvent utilisés pour le dimensionnement des ouvrages, sont extrêmement variables.

Dans le cas de l'approche probabiliste proposée, les incertitudes sont quantifiées et propagées dans le calcul de l'aléa sismique, suivant les méthodes éprouvées et mises en oeuvre par GEOTER pour le nouveau zonage sismique de la France et sur différents sites, dans de nombreux pays, dont le Maroc (projets CEN Maamora, UAT Taghazout, Port de Tanger-Méditerranée).

La démarche séquentielle proposée pour évaluer l'aléa sismique à l'échelle du Royaume du Maroc est la suivante :

- Définition de la zone géographique de l'étude, en considérant l'ensemble des sources pouvant produire des mouvements sismiques significatifs sur le Royaume du Maroc ;
- Constitution d'un catalogue de sismicité homogène et exhaustif permettant notamment de procéder à une évaluation probabiliste de l'aléa sismique, en ne considérant que des événements indépendants entre eux. A cet effet, les catalogues déjà utilisés à l'occasion des études sur différentes régions du Maroc ont été complétés;
- Etablissement de 2 modèles distincts de façon à tenir compte d'hypothèses différentes sur les zones sources à considérer, à partir d'une compilation de toutes les données permettant d'identifier, à l'échelle du Maroc, des zones (failles ou zones sismotectoniques) présentant le même potentiel sismogène ;
- Caractérisation de l'activité des zones sources par le calcul des lois de distribution fréquence-magnitude, avec dans chaque cas quantification des paramètres en valeurs moyennes et écarts-types;
- Sélection des lois d'atténuation applicables aux contextes géodynamiques du territoire marocain et de son environnement sismotectonique (déformation interplaque avec les transformantes océaniques, l'écaillage de la croûte océanique du Banc de Gorringe ; déformation intraplaque du Rif, de l'Atlas et du Moyen Atlas, etc.) ;
- Calcul des mouvements sismiques médians et des fractiles 15% et 85%, en utilisant un arbre logique pour la propagation des incertitudes épistémiques, et des tirages de Monte Carlo pour la propagation des incertitudes aléatoires. Le calcul est réalisé aux périodes de retour de 100, 475 et 975 ans.

3.3 Modèles sismotectoniques

Les modèles sismotectoniques ont pour objet de proposer les différentes hypothèses sur l'origine et la localisation de l'activité sismique.

Une zone sismotectonique est définie comme un volume ou un ensemble de volumes de la croûte terrestre homogènes du point de vue de leur potentiel sismogénique, lui-même défini par des caractéristiques structurales et sismotectoniques. Pour établir ces caractéristiques,

les données permettant de déterminer les états statiques et dynamiques du volume crustal sont analysées et interprétées. Chaque zone sismotectonique présente une homogénéité de son régime de déformation (type et intensité de déformation sismique et asismique). Celui-ci est étudié en utilisant les données sur la sismicité, la déformation et les contraintes. Par ailleurs, une zone sismotectonique peut être constituée par plusieurs volumes distincts ayant les mêmes caractéristiques structurales et sismotectoniques. Une faille ou un ensemble de failles peut, à ce titre, définir une zone. Pour les zones constituées de failles, il convient, en outre, de préciser les caractéristiques géométriques, la chronologie des différents mouvements correspondant aux épisodes tectoniques qui se sont succédés et la sismicité associée.

Pour tenir compte des incertitudes sur la définition des zones actives, deux modèles en zones source sont proposés pour mener l'approche probabiliste :

- **Zonage ZMS 01** : ce premier zonage intègre la géométrie et les caractéristiques principales des failles majeures qui absorbent l'essentiel de la déformation et qui rendent compte de la plus forte activité sismique entre les deux plaques Afrique et Ibérie. Ce zonage comprend 24 zones sismotectoniques (**Figure 7**). Il est basé sur les grandes unités géologiques et les structures sismogènes du Maroc et des régions voisines.
- **Zonage ZMS 02** : Il a été développé par l'Université Mohammed V (Lahcen Ait Brahim et ben Aissa Tadili 2006), testé et validé dans le cadre de l'élaboration des RPS 2000. Il comprend 10 zones (**Figure 8**).

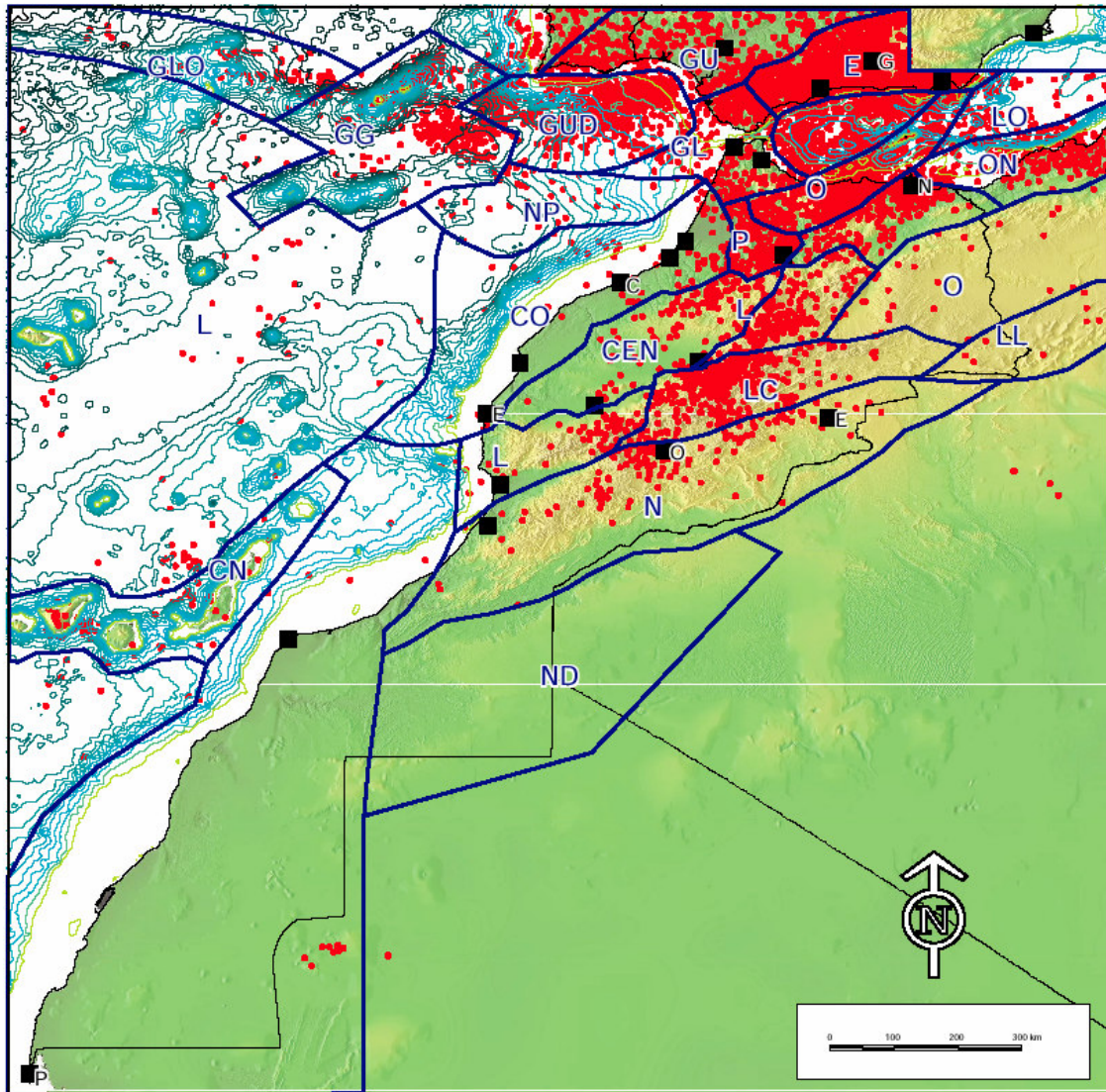
ID_ZONE	N° GTR	NOM DE LA ZONE	Date séismes historiques les plus forts	Magnitude (catalogues GTR et Tadili/Ait Brahim)	Intensité (Io=Intensité épiscopentrale)
BGAG	1	BANCS GORRINGE AMPERE MARQUES	01-11-1755 En mer	8.3 à 8.5 (Ms)	X (Tadili)
TGLO	25	TRANSFORMANTE DE GLORIA	10-01-2006	5.8 (ISC)	
GUAD	2	BANC DE GUADALQUIVIR - RIDES	27-12-1722 31-03-1761 En mer	6.5 (Tadili) 6.7 (Tadili)	VIII (Tadili, IGN) VI (Tadili) VI-VII (IGN)
BGUA	3	BASSIN DE GUADALQUIVIR	05-04-1504	6.1 (GTR) 6.2 (Reicherter)	VIII-IX (IGN) IX (Reicherter)
BETI	4	CHAINE DES BETIQUES	22-09-1522 09-10-1680 25-12-1884	6.5 (Tadili) 6.8 (Tadili) 6.2 (Reicherter) 6.5 (Tadili)	VIII (Tadili) VIII (Tadili) IX (Reicherter) IX (Tadili) X (Reicherter)
ALBO	5	BASSIN D'ALBORAN EST	29-06-1957 En mer	4.6 (Tadili)	IV (Tadili)
ATL	6	ATLANTIC	07-03-1930 19-01-1972 En mer	5.1 Ms (Cherkaoui Zalazil) 5.0 (Tadili)	IV (Cherkaoui Zalazil)
NPSM	7	NAPPES PRERIFAINES SOUS-MARINE	31-03-1963 En mer	5.4 Md (Tadili)	III (Tadili)
GILB	8	GIBRALTAR ET RIF NORD	12-05-1952 En mer	5.2 Md (Cherkaoui) 5.3 (Tadili)	V (Tadili)
BJBA	9	BANCS D'ALBORAN ET DE DJIBOUTI	13-01-1804 En mer 10-01-2006 (ISC)	6.7 (Tadili) 5.6	VII (Tadili) VII-VIII (IGN)
ROFK	10	RIF ORIENTAL ET FAILLE DE NEKOR	24-02-2004	6.4 Ms, 6.4 Mw, 6.1 (Tadili)	Io=IX (Tadili)
ORAN	11	CHAINE ORANAISE	09-10-1790 01-03-1819 29-11-1887	6.1 6.1 6.1	IX (Tadili) IX (Tadili) IX (Tadili)
BCOT	12	BASSINS COTIERS	09-04-1988	4.7 (Tadili)	VI (Tadili)
PRIF	13	RIDES PRERIFAINES	27-11-1755 11-05-1624 23-05-1623	6.1 (GTR) 6.1 (Tadili)	IX (Levret) VIII (Levret) IX (Tadili)
FSAI	14	FAILLE DE MELILA-SAISS ET PRERIF ORIENTAL	21-10-1578	5.6	VIII (Tadili)
MCEN	15	MESETA CENTRALE	17-01-1979 04-08-1997	4.5 (Tadili, Cherkaoui) 4.6 Md (Cherkaoui)	Io=VI (Cherkaoui)
MATLA	16	MOYEN ATLAS	10-05-1950	5.3 Md (Cherkaoui)	VII (Tadili)
MO	17	BASSIN MOULOUYA ET HAUTS PLATEAUX AINT BENI MATHAR	11-12-1978	4.9 (Tadili)	
ATLAT	18	HAUT ATLAS ATLANTIQUE	29-02-1960	5.9 (Cherkaoui) 6.0 (Tadili)	Io=IX-X (Cherkaoui) X (Tadili)
ATLAC	19	HAUT ATLAS CALCAIRE	22-06-1941	5.6	VIII (Tadili)
ATLAL	20	HAUT ATLAS ALGERIEN	13-03-1948	4.9 (Tadili)	IX ? (Tadili)
CANY	21	VOLCANISME CANARIES	01-09-1730	6.7	X (Tadili)
TARF	22	BASSIN DE TARFAYA-AAIUN et ESSAOUNI	20-10-1966	3.9	V (Tadili)
ANTA	23	ANTI-ATLAS	23-10-1992	5.2 Md (Cherkaoui) 5.3 (Tadili)	Io=VI-VII (Cherkaoui) VI (Tadili)
TIND	24	BASSIN DU TINDOUF	21-12-1990	4.1 Md (ISC)	

Tableau 2 : Identification des 25 zones du zonage ZSM01 et synthèse des séismes les plus forts connus. (les zones en vert correspondes à des régions considérées comme stables à faiblement actives)

ZONAGE		Séismes majeurs (Catalogue final GTR, 2006)		Séismes majeurs (Catalogue Tadili/Ait Brahim)	
ID ZONE	NOM DE LA ZONE	Date	Mag. / Intensité	Date (tableau 8/08/06)	Magnitude (tableau 8/08/06) / Intensité
S1	Zone atlantique	01-11-1755	8.3 à 8.5 / I=X	01-11-1755	8.5 / I=X
S2	Rif occidental-Atlantique	27-12-1722 31-03-1761	6.5 / I=VIII 6.7 / I=VI	27-12-1722 31-03-1761 12-04-1773	6.5 / I=VIII 6.7 / I=VI 6.2 / I=VII
S3	Détroit de Gibraltar	20-10-1883 21-01-1909	6.0 / I=V (Cherkaoui) 5.0 / I=VII (Cherkaoui)	21-01-1909	5.3 I=IX
S4	Rif central et oriental	09-10-1680 13-01-1804 24-02-2004	6.8 / I=VIII 6.7 / I=VII 6.1 (Inst Tadili), 6.4 Ms	22-09-1522 09-10-1680 09-07-1923 26-05-1994	6.5 / I=VIII 6.8 / I=VIII 5.7 / I=VI 5.7 / I=V
S5	Meseta occidentale	09-04-1988	4.7 / I=VI (Tadili)	30-03-1938	5.1
S6	Jonction Rif_Moyen Atlas	23-05-1623	6.1 / I=IX (Tadili)	23-05-1623	6.1 / I=IX
S7	Hamada_Haut Atlas Oriental	22-12-1999 22-06-1941	5.7 / I=VII (Tadili) 5.6 / I=VIII (Tadili)	22-12-1999	5.7 / I=VII
S8	Atlas occidental	22-02-1960	6.0 / I=X (Tadili)	22-02-1960	6.0 / I=X
S9	Jonction Moyen Atlas_Haut Atlas central	10-05-1950	5.3 / I=VII (Cherkaoui)	10-05-1950 28-01-1986	I=VII 4.9 / I=V
S10	Sud Maroc	02-01-1966 05-03-1968 14-11-1991	4.0 / I=V (Tadili) 4.0 / I=V (Tadili) 4.3 (Tadili)	14-11-1991	4.3

Tableau 3 : Identification des 10 zones du zonage ZSM02 et synthèse des séismes les plus forts connus dans ces zones selon les données compilées par GEOTER (colonnes bleues) et par les experts marocains (colonnes jaunes).

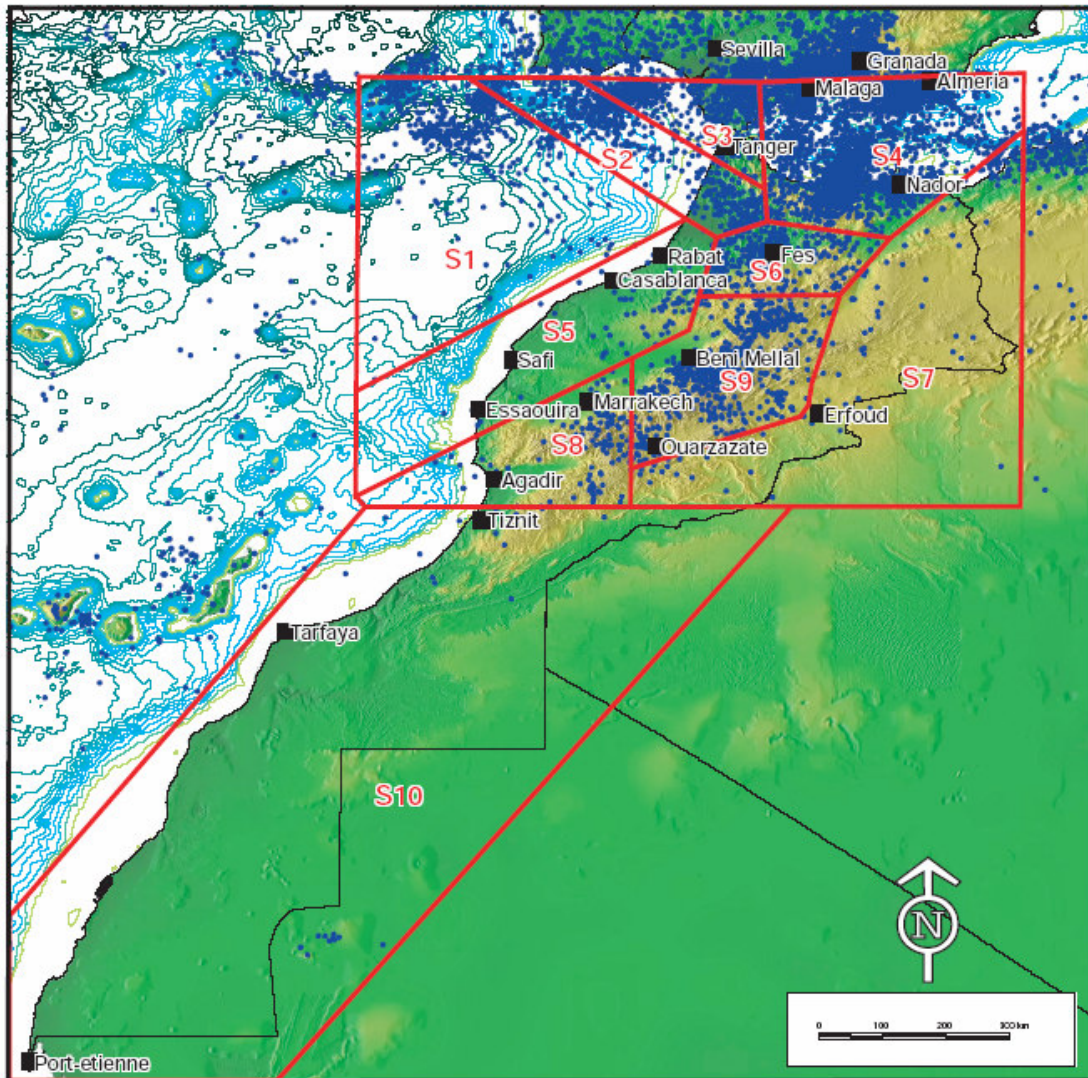
Figure 7 : modèle sismotectonique du Royaume du Maroc ZSM01 (GEOTER, 2006)



Modèle en 25 zones sismotectoniques

GAG	ANCS GORRINGE AMERE MARQUES	COT	ASSINS COTIERS
TGO	TRANSFORMANTE E GORIA	RIF	RIES RERIFAINES
GUA	ANC E GUAQAQVIR - RIES	FSAI	FAIE E MEIA-SAISS ET RERIF ORIENTA
GUA	ASSIN E GUAQAQVIR	MOEN	MESETA CENTRAE
ETI	CAINE ES ETIQUES	MATA	MOEN ATAS
AO	ASSIN 'AORAN EST	MO	assin Moulou ya et auts plateaux Aint eni Mathar
AT	ATANTIC	ATAT	AUT ATAS ATANTIQUE
NSM	NAES RERIFAINES SOUS-MARINE	ATAC	AUT ATAS CACAIRE
GI	GIRATAR ET RIF NOR	ATA	AUT ATAS AGERIEN
A	ANCS 'AORAN ET E IOUTI	CAN	VOCANISME CANARIES
ROF	RIF ORIENTA ET FAIE E N	EOR	TARF
ORAN	CAINE ORANAISE	ANTA	ASSIN E TARFAA-AAIUN et ESSAOUNI
		TIN	ANTI-ATAS
			ASSIN U TINOUF

**Figure 8 : modèle sismotectonique du Royaume du Maroc ZSM02
(Tadili&At Brahim 2006)**



Modèle sismique en 10 zones

S1	Zone atlantique
S2	Rif occidental-Atlantique
S3	Détroit de Gibraltar
S4	Rif central et oriental
S5	Meseta occidentale
S6	Jonction Rif_Moyen Atlas
S7	Hamada_Haut Atlas Oriental
S8	Atlas occidental
S9	Jonction Moyen Atlas_Haut Atlas central
S10	Sud Maroc

3.4 Paramètres d'activité sismique des zones source

Les paramètres d'entrée décrivant l'activité sismique de chaque zone source et requis pour les calculs probabilistes de l'aléa sismique sont les suivants :

- λ , le taux annuel cumulé de sismicité associé à la distribution magnitude-fréquence suivant une relation de type Gutenberg Richter
- β , la pente de la distribution de Gutenberg Richter
- M_0 , la magnitude minimale utilisée dans l'analyse de régression des paramètres λ et β
- M_{max} , la magnitude maximale attendue dans chaque zone et qui est utilisée comme limite pour tronquer la relation de Gutenberg Richter
- H , la profondeur sismogénique des zones sources

Les incertitudes associées à la détermination des différents paramètres, notamment, la magnitude maximale et la profondeur sismogénique sont prises en compte et intégrées au modèle par la méthode de Monte Carlo.

ID_ZONE	Numéro GTR	Mmax observée dans le catalogue +/- incertitude	Failles sismogènes majeures (indices de rupture quaternaire) considérés pour la définition de Mmax	Bornes des Mmax retenues	Bornes des profondeurs retenues (en km)
BGAG	1	8.5±0.2	Chvt du Banc de Gorringe	8.5 – 8.7	5 – 20
TGLO	25	5.8±0.5	Faïlle transformante de Gloria	6.3 – 6.8	3 – 15
GUAD	2	6.7±0.5	Chvt. du Banc de Guadalquivir	7.2 - 7.5	5 – 20
BGUA	3	6.1±0.5	Faïlle bordière du bassin de Guadalquivir	6.6 - 6.9	5 – 20
BETI	4	6.5 ±0.5	Faïlle d'Alicante Cadix	7.0 - 7.5	3 – 15
ALBO	5	4.6± 0.5		5.5 – 6.0	5 – 15
ATL	6	5.1±0.5		5.6 – 5.9	5 – 20
NPSM	7	5.4± 0.5		5.9 – 6.2	2 – 10
GILB	8	5.3± 0.5	Prolongement Est faille de Gloria	5.8 – 6.5	3 – 20
BJBA	9	6.7 ±0.5	Prolongement faille de Carboneras	7.2 – 7.6	3 – 15
ROFK	10	6.1±0.5	Systèmes de failles inverses décrochantes Jebha, Al Hoceima, Nekor	6.6 - 7.0	3 – 20
ORAN	11	6.1±0.5	Chvts chaîne Oranaise	6.6 – 7.0	3 – 15
BCOT	12	4.7±0.3	(Oued Yquem) Oued Tidsi	6.0 – 6.5	5 – 20
PRIF	13	6.1±0.5	Jbel Zerhoun Jbel Zajagh	6.6 – 7.0	5 – 15
FSAI	14	5.6± 0.5	Faïlle de Melilla-Saiss	6.1 - 6.5	5 – 20
MCEN	15	4.6± 0.3		5.5 – 6.0	5 – 15
MATLA	16	5.3± 0.5	Chvt Est et Ouest Moyen Atlas	5.8 – 6.5	3 – 20
MO	17	4.9±0.3		5.5 – 6.0	5 – 25
ATLAT	18	6.0±0.3	(Ait M'Hand) (Oued Taizelt)	6.3 – 7.0	3 – 20
ATLAC	19	5.6±0.5	Chvt Sud Haut Atlas Toufite (Midelt)	6.1 – 7.0	3 – 25
			Rich 13 (Midelt) NW Tamleit		
ATLAL	20	4.9± 0.5		5.5 – 6.0	5 – 30
CANY	21	6.7±0.5		7.0 - 7.5	5 – 15
TARF	22	3.9±0.3		5.5 – 6.0	10 – 30
ANTA	23	5.2±0.3		5.5 – 6.0	5 – 30
TIND	24	4.1±0.3		5.5 – 6.0	10 – 30

Tableau 4 : Paramètres sismiques retenus dans les zones du zonage ZSM01. Les bornes minimales et maximales des magnitudes maximales et des profondeurs sont définies telles qu'elles sont adoptées pour les calculs finaux

ID_ZONE	Mmax observée	Bornes min et max de la Mmax	Bornes min et max de la profondeur
S1	8.5	8.5-9.0	5-30 km
S2	6.7	6.7-7.2	5-35 km
S3	6.0	6.0-6.5	5-35 km
S4	6.8	6.8-7.0	5-25 km
S5	5.1	5.5-6.0	5-20 km
S6	6.1	6.1-6.5	5-25 km
S7	5.7	5.7-6.0	5-20 km
S8	6.0	6.0-6.7	5-30 km
S9	5.3	5.5-6.5	5-35 km
S10	4.3	5.5-6.0	5-30 km

Tableau 5 : Paramètres sismiques retenus dans les zones du zonage ZSM01. Les bornes minimales et maximales des magnitudes maximales et des profondeurs sont définies telles qu'elles sont adoptées pour les calculs finaux.

3.5 Sélection des lois d'atténuation

Plusieurs modèles sont sélectionnés pour propager l'incertitude relative aux propriétés d'atténuation des mouvements forts avec la distance.

Une bibliographie a été faite sur les lois d'atténuation, en adoptant les critères de sélection suivants :

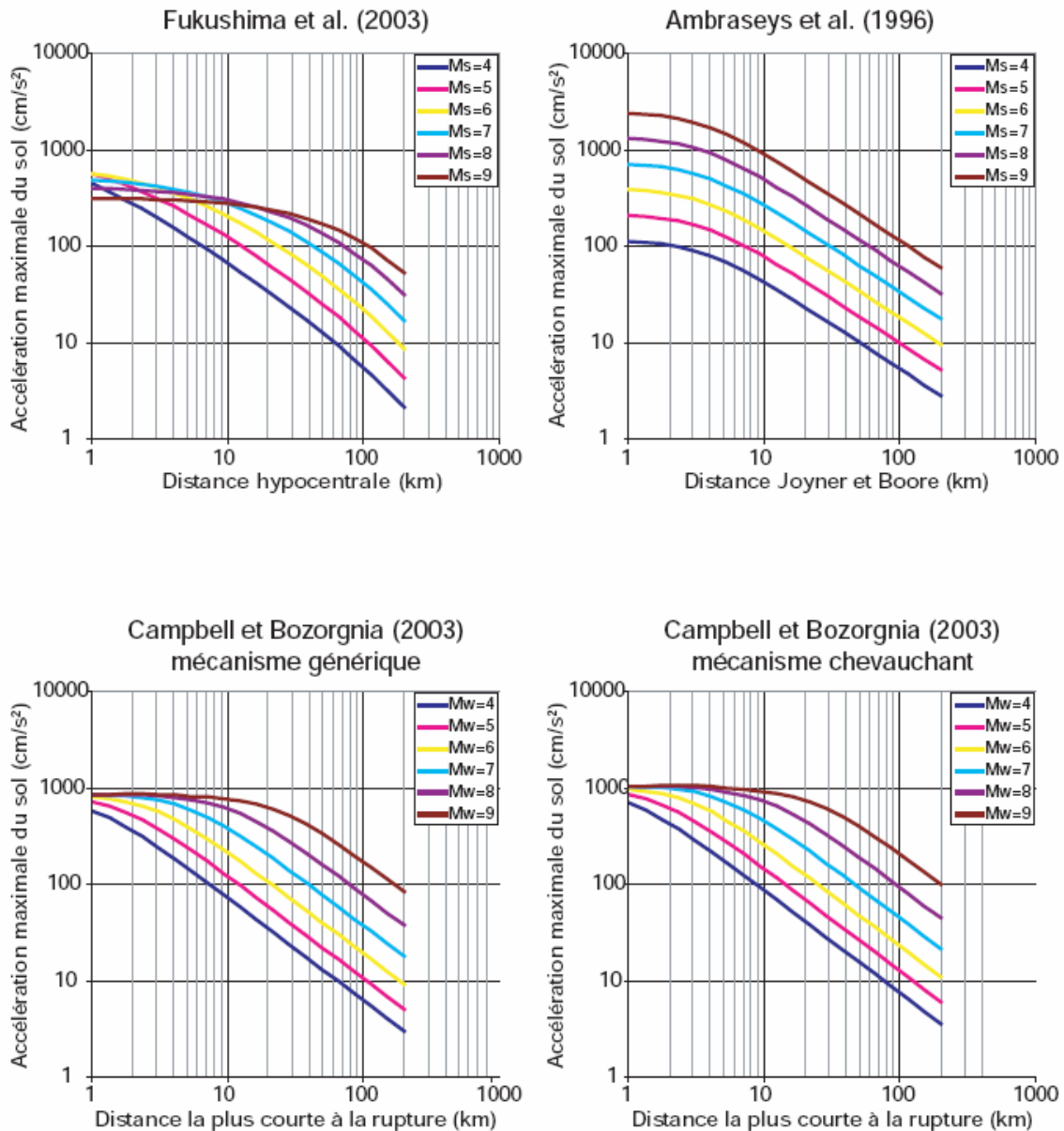
- Critère de compatibilité des lois différentes représentatives du contexte géodynamique
- Critère sur la date de parution des lois : compte tenu de l'évolution du matériel accélérométrique et du développement des réseaux accélérométriques au cours des dix dernières années, qui ont permis notamment d'acquérir des enregistrements pour des configurations variées du couple source sismique/site, nous ne retiendrons que des lois publiées durant la dernière décennie ;
- Critère d'accès aux sources d'information : la connaissance du domaine d'application et de validité des lois étant indispensable, nous ne retiendrons que les lois pour lesquelles la source bibliographique d'origine est accessible ;
- Critère sur les domaines de validité des lois, les valeurs des couples magnitude-distance des sources considérées devant être comprises dans ces domaines.

À défaut de modèle d'atténuation publié spécifique au Maroc, trois lois ont été retenues : Loi de Fukushima et al (2003), loi d'Ambraseys et al (1996) et loi de Campbell et Bozorgnia (2003).

Une comparaison des accélérations maximales du sol pour différentes gammes de magnitudes en fonction des distances épacentrales de chacune des lois d'atténuation sélectionnées est présentée **Figure 9**.

On observe notamment un effet de saturation en champ proche sur les lois de Campbell et Bozorgnia (2003) et sur celle de Fukushima et al. (2003). Les effets liés au type de mécanisme au foyer sont aussi particulièrement visibles avec la loi de Campbell et Bozorgnia (2003) avec une influence plus importante dans le cas de sources de type chevauchant.

Figure 9 : Comparaison des lois d'atténuation sélectionnées pour le calcul de l'aléa sur le territoire du Maroc



3.6 Construction de l'arbre logique

Le processus de propagation des incertitudes mis en oeuvre dans le cadre du calcul probabiliste des cartes d'aléa sismique du Maroc couple une technique d'arbre logique pour tenir compte des incertitudes à caractère épistémique, à un processus de Monte-Carlo pour propager les incertitudes à caractère aléatoire. L'arbre logique développé dans le cadre de cette étude est présenté sur la **Figure 10**. Il est composé des branches suivantes :

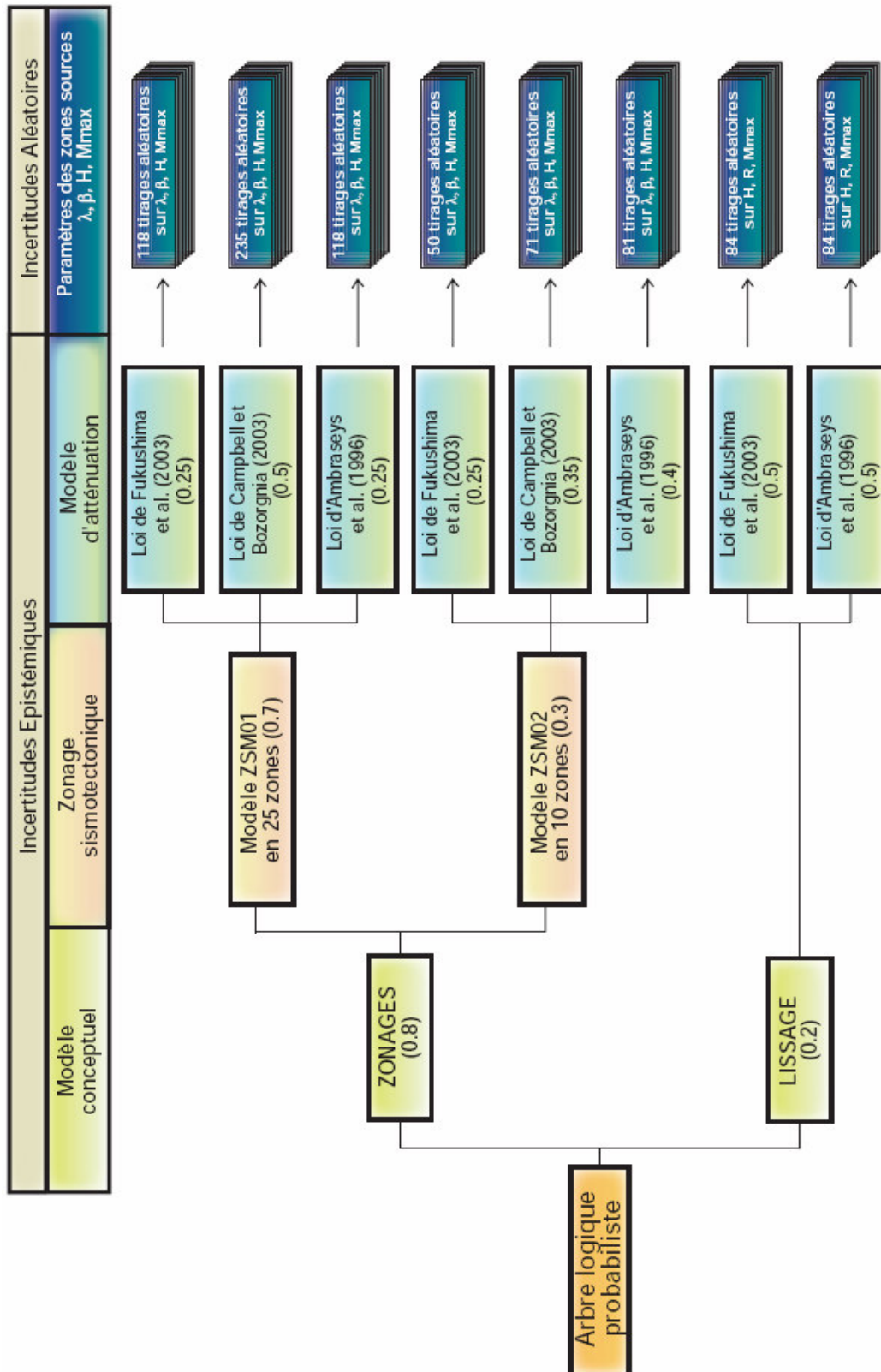
Deux modèles conceptuels sont utilisés pour traiter l'incertitude associée au mode de calcul de l'aléa sismique. Une branche suit le modèle de calcul par zonage et la seconde le modèle par lissage.

Suivant la branche zonage, deux modèles sismotectoniques sont utilisés pour traiter l'incertitude épistémique sur la définition des zones sources. Les modèles alternatifs développés indépendamment par les experts de GEOTER et les experts marocains correspondent respectivement aux zonages sismotectoniques ZSM01 (**Figure 7**) et ZSM02 (**Figure 8**). Un poids de 0.7 est attribué au modèle ZSM01 par rapport au modèle ZSM02 dont le poids est porté à 0.3. Ce choix suit plusieurs raisons. D'une part, le modèle ZSM01 avec 25 zones est plus détaillé que le modèle ZSM02 en 10 zones ; il en résulte donc une meilleure répartition de l'activité sismique plus conforme aux données géologiques et sismologiques. Un zonage constitué de zones élargies se traduit généralement par un effet de lissage ayant pour tendance d'atténuer l'aléa là où l'activité est normalement plus forte et à rehausser les niveaux dans les régions peu sismogènes. Par ailleurs, le zonage ZSM01 a été développé spécifiquement pour cette étude dans un objectif de calcul probabiliste tandis que le zonage ZSM02 résulte de la réglementation RPS200 dont le cadre était déterministe.

Le troisième niveau d'incertitudes épistémiques considéré dans l'arbre logique reflète la variabilité de la prédiction des mouvements du sol à partir des lois d'atténuation. Dans la branche zonage, les trois modèles d'atténuation sélectionnés au chapitre précédent sont reportés : Fukushima et al.(2003), Campbell et Bozorgnia (2003) et Ambraseys et al. (1996). Leur préférence relative dépend alors du zonage choisi. Avec le zonage détaillé ZSM01, le modèle préféré, avec un poids de 0.5, est celui de Campbell et Bozorgnia (2003) qui prend en compte à la fois les profondeurs, les mécanismes au foyer et la saturation en champ proche. Les deux autres modèles sont considérés de manière équiprobable avec un poids de 0.25 chacun. Avec le modèle ZSM02, qui diffuse davantage les caractéristiques sismiques des zones, une préférence avec un poids de 0.4 est donnée à la loi d'Ambraseys et al. (1996) qui ne tient pas compte de la profondeur. Avec un poids de 0.35, la loi de Campbell et Bozorgnia (2003) est préférée pour sa prise en compte des mécanismes au foyer. Suivant la branche lissage, la loi de Campbell et Bozorgnia (2003) n'a pas été retenue car le mécanisme au foyer de chaque séisme du catalogue est inconnu. Les lois de Fukushima et al. (2003) et d'Ambraseys et al. (1996) sont conservés sur cette branche suivant un même poids de 0.5.

A l'extrémité de chaque branche de l'arbre logique, des sous branches sont créées afin d'intégrer les incertitudes aléatoires au calcul final des cartes d'aléa. Chacune de ces branches secondaires est construite par échantillonnage de type Monte-Carlo des distributions des paramètres aléatoires suivants : les paramètres λ et β des lois de Gutenberg Richter, la profondeur H, et la magnitude maximale Mmax. Dans chaque zone source un jeu de quatre paramètres est ainsi tiré aléatoirement suivant des distributions de probabilité Gaussienne pour les paramètres λ et β et uniforme pour la Mmax et la profondeur H. Suivant la branche lissage les paramètres aléatoires échantillonnés sont représentés par la Mmax, la distance (distribution Kernel) et la profondeur H. Ce processus est répété un nombre de fois suffisant pour assurer une bonne exploration des combinaisons possibles entre les branches de l'arbre logique et les paramètres aléatoires. Un nombre minimum de 50 itérations a été fixé pour la branche la moins représentative pour permettre une convergence satisfaisante des indicateurs statistiques médians et percentiles. En suivant les poids attribués à chacune des branches de l'arbre logique un total de 840 calculs d'aléa est ainsi généré avec 235 tirages pour la branche la plus représentée.

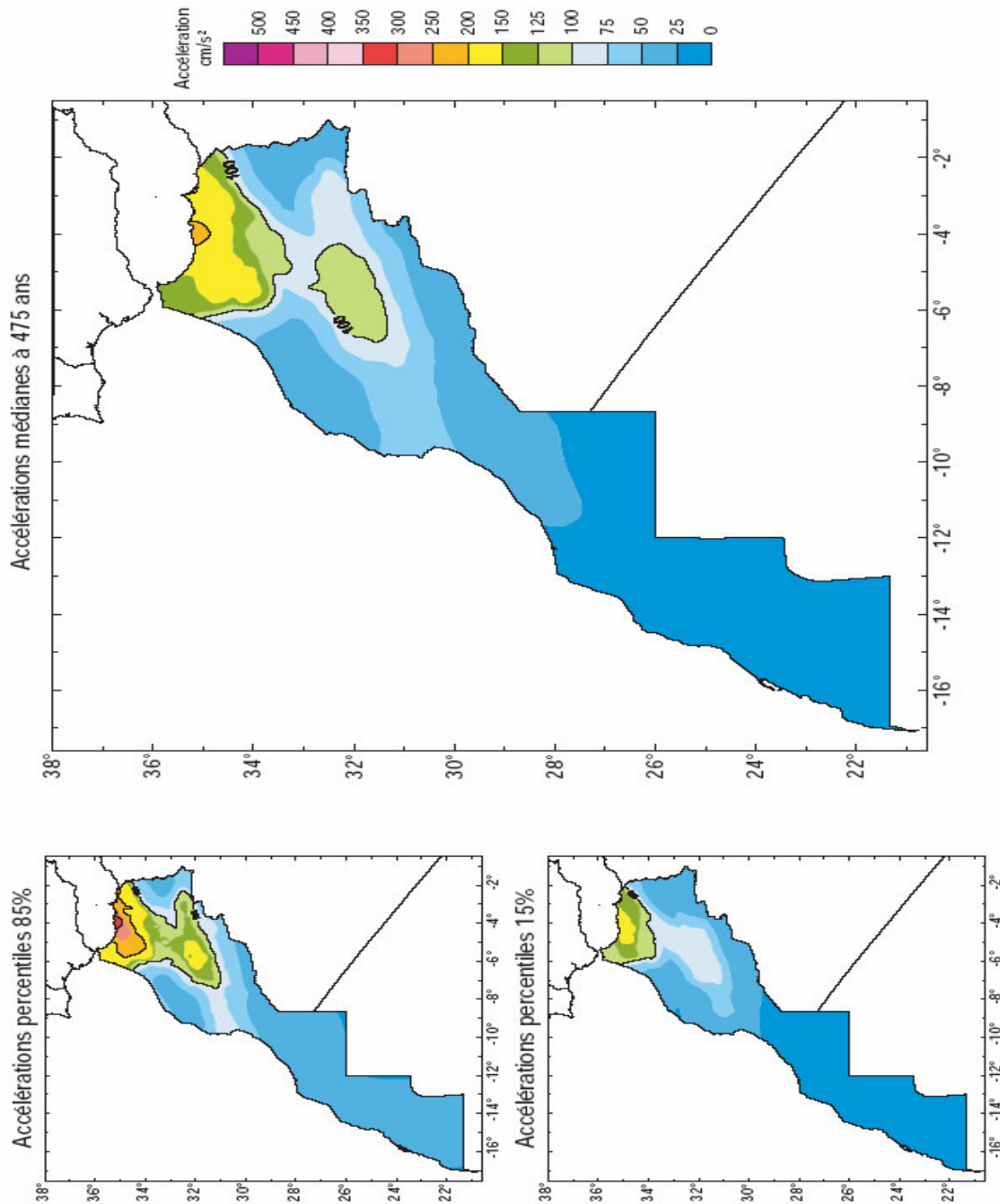
Figure 10 : Arbre logique développé pour le traitement des incertitudes dans le calcul probabiliste des mouvements sismiques sur le territoire du Maroc



4- Principaux résultats

Pour chacune des périodes de retour requises, 100 ans, 475 ans et 975 ans, l'exploration de tout l'arbre logique résulte en 840 calculs d'aléa couvrant le territoire du Maroc. A titre d'exemple, la carte des accélérations maximales horizontales médianes du sol calculée pour la période de retour de 475 ans résultant de l'exploitation de tout l'arbre logique est présentée **Figure 11** avec les cartes des accélérations médianes, percentiles 15% et 85%.

Figure 11 : Carte des accélérations horizontales médianes du sol calculée pour la période de retour de 475 ans résultant de l'exploitation de tout l'arbre logique : cartes des accélérations médianes, percentiles 15% et 85%



5- Vers le zonage réglementaire

5.1 Objectif

Les cartes d'aléa pour chaque période de retour permettent d'engager la réalisation du zonage réglementaire (Phase 3 de la mission 1 dont les résultats sont prévus pour la fin de l'année)

Le zonage sera naturellement principalement basé sur les cartes probabilistes d'aléa sismique obtenues en phase 2, et notamment sur la distribution des niveaux d'accélération à 475 ans de période de retour.

Pour autant, certaines zones du territoire historiquement affectées par des séismes destructeurs, comme la région d'Agadir par exemple, ne sont pas clairement mises en évidence par l'approche probabiliste, soit en raison de particularités sismotectoniques (séismes modérés à grande période de retour, et faible taux de micro activité) soit, en raison d'une faible couverture par le réseau nationale de surveillance sismique, qui n'a pas permis un échantillonnage complet et homogène de la microsismicité sur une grande période de temps.

Ce sont les raisons pour lesquelles, les critères d'exploitation de l'aléa probabiliste seront complétés par des critères relatifs à la distribution des accélérations historiques vraisemblablement atteintes. Ces accélérations sont obtenues par simple application des lois d'atténuation en considérant les épicentres historiques et instrumentaux du catalogue de magnitude égale ou supérieure à 4.0. Une illustration de ces accélérations vraisemblablement atteinte est fournie à titre d'exemple **Figure 12**.

La carte du zonage réglementaire sera ainsi, le cas échéant, pondérée et modifiée, par les cartes d'accélération déterministes maximales vraisemblablement atteintes. Cette approche permettra ainsi de tenir compte, à la fois du modèle prédictif probabiliste, ainsi que des principaux séismes historiques connus et localisés dans des zones d'activité microsismique peu actives.

5.2 Principes proposés pour l'établissement du zonage réglementaire

Cinq grandes zones à sismicité croissante sont proposées. Pour bien marquer la différence avec le zonage RPS 2000, il est proposé de les appeler respectivement M1, M2, M3, M4 et M5.

Il est bien évident que ces seuils ont une importance forte sur la géométrie des zones réglementaires. Une variation de 0,05 m/s² peut ainsi faire évoluer la limite d'une zone de plusieurs dizaines de kilomètres.

Autant que possible, les seuils des différentes zones doivent former une série régulière, formant une progression géométrique ou arithmétique. A priori, la progression géométrique est préférable puisque les actions sismiques sont modulées par des coefficients multiplicateurs. De plus, la raison de cette progression doit être comparable au coefficient d'importance pour les bâtiments de la classe la plus élevée (classe I dans l'EC8).

Le choix peut être fait de caler les limites de zones sur les valeurs d'accélération obtenues pour le fractile 85% et pour une période de retour de 475 ans, et de fixer ces seuils sur la base d'une comparaison avec les accélérations déduites directement de la sismicité historique pour les zones mal mises en évidence par l'approche probabiliste.

A ce stade de l'étude, les seuils de coupure suivants sont proposés : 0.7, 1.1, 1.5 et 2.2 m/s². Ils résultent d'une progression géométrique dont la raison (1.5) est comparable au coefficient d'importance recommandé dans les EC8 pour les bâtiments les plus importants (1.4).

- Le seuil bas de 0.7 m/s² limiterait les zones M1 et M2 ;
- Le seuil de 1.1 m/s² limiterait les zones M2 et M3 ;
- Le seuil de 1.6 m/s² limiterait les zones M3 et M4 ;

- Le seuil de 2.2 m/s² limiterait les zones M4 et M5 ;

Les seuils définis ci-dessus permettront d'établir, en phase 3, une carte physique dont les contours seront adaptés, pour une traduction réglementaire, en suivant des limites administratives.

Il est proposé de baser l'élaboration du zonage réglementaire sur les limites communales du découpage administratif.

Pour les communes dont le territoire serait coupé par une limite entre deux zones "physiques", le critère d'attribution de zone proposé est tel que seules les communes dont plus de 80% du territoire se trouve physiquement dans la zone de sismicité la plus faible entre les deux zones concernées, soient classées dans cette dernière classe.

CONCLUSION

La réussite et l'application effective de ce guide est tributaire de l'implication de tous : gestionnaires, concepteurs et constructeurs des ouvrages d'art.

Dès l'achèvement de la première mission à caractère purement sismologique, tous les intervenants (bureaux d'études, entreprises et laboratoires) sont invités à collaborer à la réalisation de ce document.

Toutes les propositions, observations et retours d'expérience seront les bienvenus pour faire en sorte que le document final soit complet, précis, réaliste, pratique et simple d'utilisation.

REFERENCES

- Cahier des prescriptions spéciales et règlement de la consultation relatifs à l'appel d'offres pour l'élaboration d'un guide marocain de conception parasismique des ponts.
- Rapport intermédiaire GEOTER n° GTR/SET/0206 – 288Av1 de la phase 1 de la mission1 : Elaboration d'un zonage sismique du Maroc D.CARBON, Ch.CLEMENT, Ph.COMBES

Figure 12 : Carte des accélérations maximales vraisemblablement ressenties, calculées en fonction de la loi d'atténuation d'Ambraseys et al. (1996) à partir des séismes de magnitude ≥ 4.0 du catalogue de sismicité utilisé

