

Chapitre 5. *Évaluation des aléas sismiques*

5-1 Séismes de scénario

5-1-1 Modélisation des failles actives et du sismotectonique

Les failles actives suivantes ont été identifiées et considérées à l'égard de leur impact du sismotectonique dans les modèles de déformations actuels de la zone d'étude (Figure 5-1). La longueur, la largeur et le rapport de glissement ont été modélisés.

(1) Faille de Sahel

La faille de Sahel forme la limite entre le bassin de la Mitidja dans le sud et le Sahel d'Alger dans le nord. Néanmoins, vu que la géométrie profonde de la faille est inconnue, il est considéré qu'une rupture le long de toute la longueur de la faille, c'est à dire d'environ 75 km (avec tous les segments s'absorbant en profondeur et se rompant). Il est aussi considéré que la faille du Sahel s'étend vers le bas à une profondeur de 15 km. Selon la réponse topographique au déplacement le long de la faille du Sahel, il est estimé que le rapport de glissement devrait être de l'ordre de quelques dizaines de mm par an. Pour la présente étude, un rapport de glissement de $0,5 \pm 0,2$ mm/an sera considéré le long de la faille du Sahel.

(2) Faille de Chenoua

La faille de Chenoua relie le massif de Chenoua dans le sud et s'étend en mer dans une direction nord-ouest. Selon les données bathymétriques de la croisière MARADJA et la sismicité instrumentale, il est considéré que la faille de Chenoua a une longueur d'environ 50 km sur une descente vers le nord-ouest avec un pendage de 45° . Pour la présente étude, un rapport de $0,5 \pm 0,2$ mm/an sera présumé le long de la faille de Chenoua.

(3) Faille de Blida

La faille de Blida (Mitidja du sud) marque la limite entre le bassin de la Mitidja dans le nord et l'Aïlas blidien dans le sud. Vu que la segmentation en profondeur est inconnue, il sera considéré que les segments de la faille du Sahel identifiés sur la topographie s'absorbent en profondeur et forment un segment unique d'une longueur approximative de 90 km. Il est aussi considéré que la faille de Blida s'étend jusqu'à 20 km de profond. Pour la présente étude, un rapport de glissement de $2,5 \pm 1,0$ mm/an est donc présumé le long de la faille de Blida.

(4) Failles actives en mer le long de la marge algérienne

Les données bathymétriques et de la sismicité de réflexion relevant de la croisière de MARADJA (Deverchères et al. 2005) font imaginer la trace de cette faille en mer le long de la base d'une pente continentale nord de Zemmouri. Les données bathymétriques de la croisière MARADJA montrent une étendue vers l'ouest de cette faille au large de Zemmouri ne dépassant pas plus loin que la longitude approximative de la Cape Matifou. Cependant, les données supplémentaires de la croisière MARADJA sur la partie ouest de la baie d'Alger (Domzig et al., soumis) montrent une grande faille en mer similaire avec pendage vers le sud suivant la base de la pente continentale du banc de Khair al Din. Les données bathymétriques montrent une extension vers l'est de cette faille jusqu'à environ la longitude

d'Ain Benian. Même s'il n'y a aucune épreuve de l'extension vers l'ouest dans la trace de la faille jusqu'à la baie d'Alger, il est considéré que cette faille au large de Khair al Din devrait s'étendre en profondeur au moins en dessous de la zone d'étude. La segmentation des deux failles est inconnue, mais il est présumé une éventuelle rupture le long de toute la longueur de ces structures, c'est à dire d'environ 100 km de la faille en mer de Zemmouri et d'environ 100 km de la faille en mer de Khair al Din. Il est considéré que ces deux structures importantes s'étendent jusqu'à 20 km de profond. Quant à la faille de Blida, la faille en mer de Khair al Din pourrait accommoder au plus environ la moitié de toute la convergence afro-eurasienne, c'est à dire le rapport de glissement de $2,5 \pm 1,0$ mm/an le long de la faille en mer de Khair al Din. La faille en mer de Zemmouri pourrait accommoder potentiellement la partie la plus large de toute la convergence afro-eurasienne, c'est à dire le rapport de glissement de $4,0 \pm 1,0$ mm/an le long de la faille de Zemmouri.

(5) Faille de Thenia

La faille de Thenia court dans une direction ONO-ESE près de la ville de Boumerdes. Elle s'étend de la baie d'Alger jusqu'à Oued Isser sur une longueur totale d'environ 35 km. Pour la présente étude, le rapport de glissement de 0.75 ± 0.25 mm/an le long de la faille de Thenia est supposé

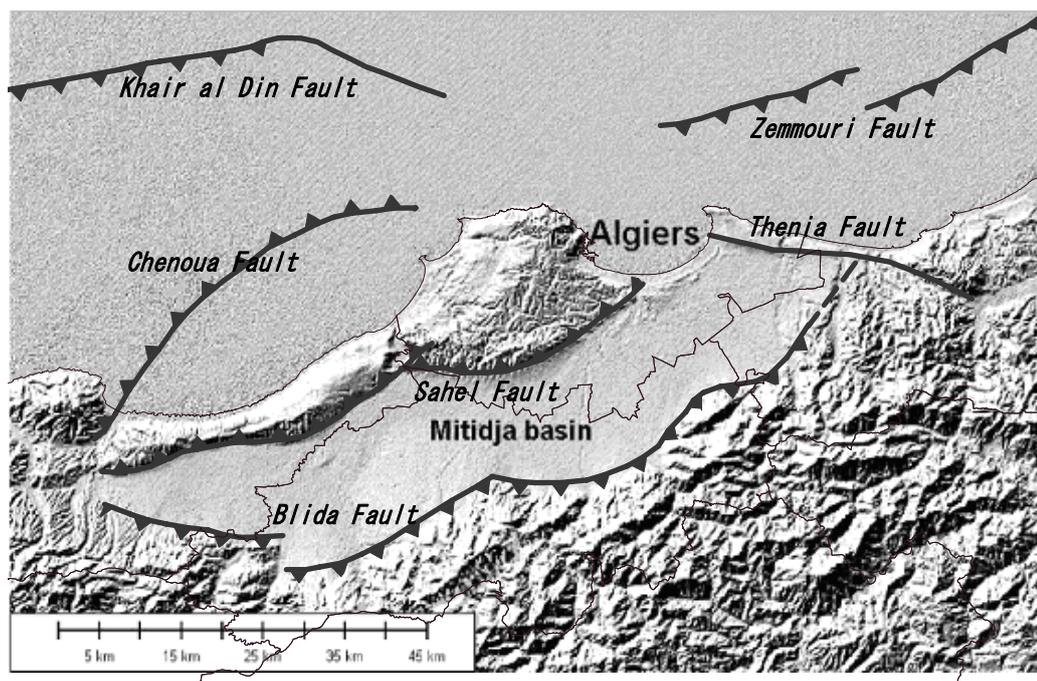


Figure 5-1 Localisation et traces des surfaces inférées des failles
(Image d'arrière-plan: SRTM DEM)

5-1-2 Modélisation de magnitude

(1) Magnitude maximum

La magnitude de MCE (séisme crédible maximum, MCE) sur chaque faille active identifiée a été dérivée en utilisant le rapport entre la magnitude du moment et la zone de rupture relevant de Wells & Coppersmith (1994). Ces valeurs sont résumées au Tableau 5-1.

(2) Magnitude contre la période de retour

L'approche probable ne semble pas pertinente pour la zone d'Alger puisque l'échantillonnage sismique est très peu sur le plan de densité, cadre de temps et magnitude. Cette approche aboutirait à laisser diluer l'aléa avec toute surface étendue de la source d'origine.

L'approche purement historique (déterministe), impliquant la nécessité de localiser le séisme historique maximum à la localisation plus critique le long de la faille, ne paraît pas non plus pertinente puisqu'elle aboutirait sur un aléa très conservatif indépendant de toute période de retour.

Nous proposons de faire un mélange des approches probable et déterministe se focalisant sur l'aléa contrôlé par les failles actives identifiées à travers les modèles développés par Youngs et Coppersmith (1985). Les magnitudes d'une période de retour donnée sont déterminées pour l'aménagement urbain.

La magnitude (m^0) d'une période de retour (T_m) le long de chaque faille active identifiée a été estimée par la formule suivante :

$$m^0 = m^u - \frac{1}{b \cdot \ln 10} \ln \left[1 + \frac{N(m^0) b M_o^u}{(1.5 - b) \mu A_f S} \right]$$

où m^u est la magnitude maximum, b est la valeur b du rapport G-R, $N(m^0) = 1/T_m$, M_o^u est le moment sismique correspondant à la magnitude m^0 , μ est la rigidité, A_f est la surface plane totale de la faille et S est le plissement moyen le long de la faille.

Le Tableau 5-1 ci-dessus résume les magnitudes associées avec une période de retour de 475 ans de chaque source sismogène critique et les paramètres déduits du contexte sismogène qui sont utilisés pour l'estimation de ces magnitudes.

Tableau 5-1 Magnitudes associées avec la période de retour de 475 ans pour les sources sismogènes critiques de la zone d'Alger

Sources sismiques	Magnitude supérieure limitée (Mw)	Surface de rupture (km ²)	Rapport de glissement (mm/an)	Mw pour la période de retour de 475 ans
Faille Sahel	7,2 ± 0,3	1590 ± 210	0,5 ± 0,2	5,9 ± 0,3
Faille Chenoua	7,0 ± 0,3	1060 ± 210	0,5 ± 0,2	5,8 ± 0,3
Faille Blida	7,4 ± 0,3	2545 ± 280	2,5 ± 1,0	6,8 ± 0,2
Faille Khair al Din	7,4 ± 0,3	2830 ± 565	2,5 ± 1,0	6,8 ± 0,2
Faille Zemmouri	7,4 ± 0,3	2830 ± 565	4,0 ± 1,0	7,0 ± 0,1
Faille Thenia	6,8 ± 0,3	600 ± 150	0,75 ± 0,25	5,9 ± 0,2

[Références]

- Deverchère J., Yelles K., Domzig A., Mercier de Lepinay B., Bouillin J.P., Gaullier V., Bracène R., Calais E., Savoye B., Kherroubi A., Le Roy P., Pauc H., and Dan G., 2005. Active thrust faulting offshore Boumerdes, Algeria, and its relation to the 2003 Mw 6.9 earthquake. *Geophysical Research Letters*, v. 32, L04311
- Domzig A., Le Roy C., Yelles K., Deverchère J., Bouillin J-P., Bracene R., Mercier de Lèpinay B., Le Roy P., Calais E., Kherroubi A., Gaullier V., Savoye B., and Pauc H, submitted. *Africa-Eurasia Miocene*

collision and neotectonics offshore Algeria: Preliminary results from the MARADJA cruise. Under review for publication in C.R. Géosciences (July 2005).

Wells D.L., & Coppersmith K.J., 1994, New empirical relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area and Surface Displacement. Bulletin of the Seismological Society of America, 84, pp. 974-1002.

Youngs R. R. and Coppersmith K. J., 1985, Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates, Bull. Seism. Soc. Am. 75, 939-964.

5-2 Modélisation des sols

Le mouvement sismique de la surface de sol est fortement affecté par la structure des couches sous jacentes. Les effets des sols sur le mouvement sismique sont évalués par la simulation numérique. Pour ce faire, les modèles des sols (colonne) de chaque maille de 250 m de côté ont été créés sur la base des informations géologiques, géotechniques et géophysiques. Ces modèles de sols sont aussi utilisés dans l'analyse du potentiel de liquéfaction. La modélisation des sols a été conduite suivant le schéma du principe montré à la Figure 5-2.

(1) Compilation des données de logs de forage et des ondes PS

Les données de logs de forages et des ondes PS menés dans la présente étude ont été compilées avec les données existantes.

(2) Détermination du substratum sismique

Selon les cartes géologiques existantes, les forages existantes, les littératures, les logs de forages compilés et les valeurs de vitesses des ondes PS, les marnes bleues plaisanciennes (p1-f) avec la V_s de 630 m/sec et les schistes frais avec la V_s de 1 030 m/sec ont été adoptés comme substratum.

(3) Compilation des essais au laboratoire

Les données des essais au laboratoire de la présente étude ont été compilées avec les données collectées existantes.

(4) Identification de la classification des sols

Basés sur les données de forage compilées, les données de vitesses des ondes PS et les données des essais au laboratoire, les sols identifiés dans la présente étude ont été classifiés dans le but de l'analyse de la réponse sismique. La couche de sol de chaque log de forage a été classifiée selon cette classification.

(5) Interpolation de lissage

La profondeur de ces couches à chaque maille de 250 m a été donc estimée avec les techniques d'interpolation numérique en utilisant les données limitées de ces points.

(6) Sols de surface

La carte géologique a été utilisée afin d'estimer les conditions de sols de surface dans chaque maille de 250 m. La Figure 5-3 montre la distribution des sols de surface.

(7) Détermination des propriétés moyennes des sols

Les paramètres géotechniques et géologiques; i.e. la V_s , la densité, la profondeur, etc. ont été déterminés pour chaque couche de modèle à 250 m de maille.

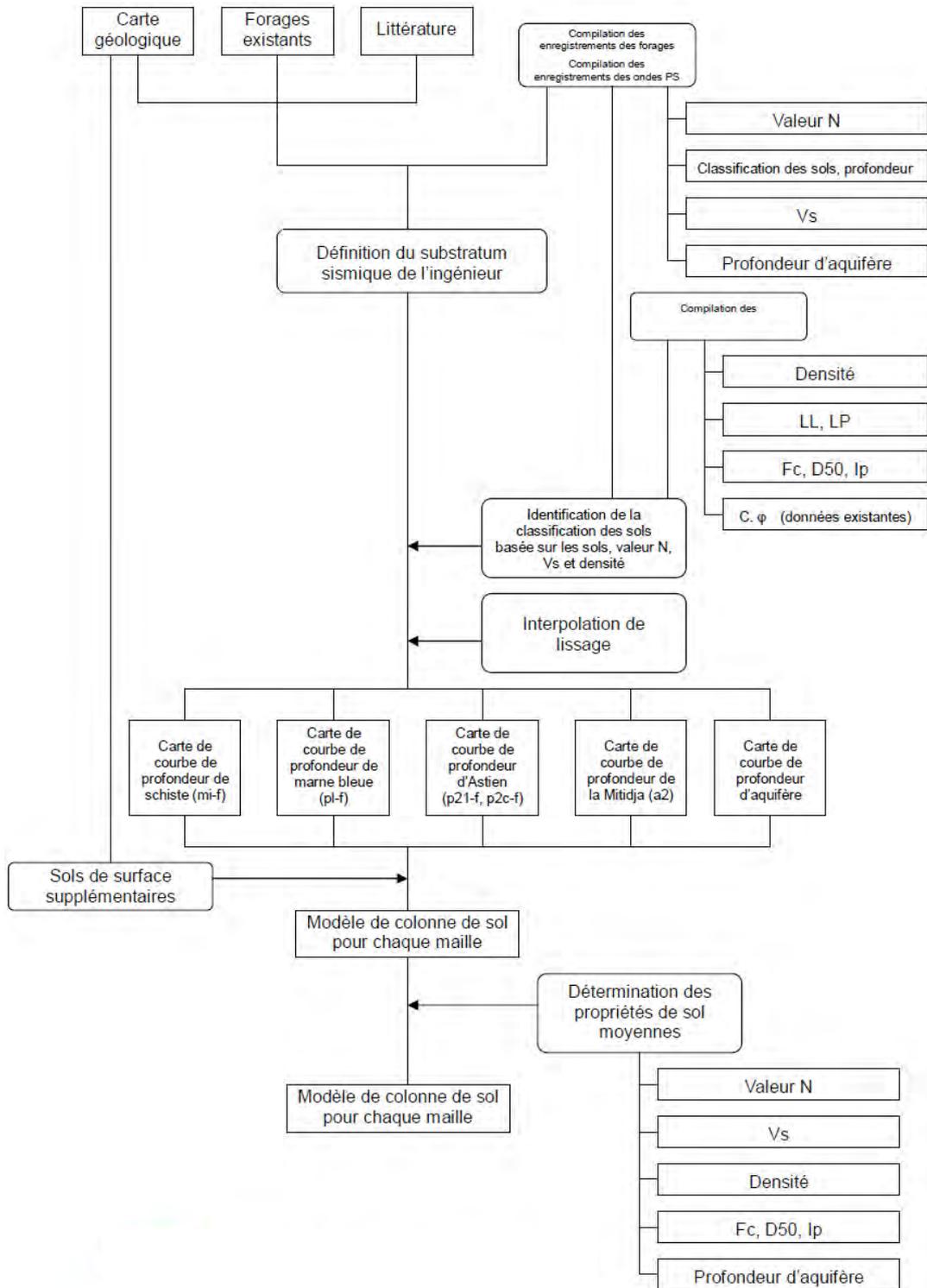


Figure 5-2 Schéma du principe de la modélisation des sols

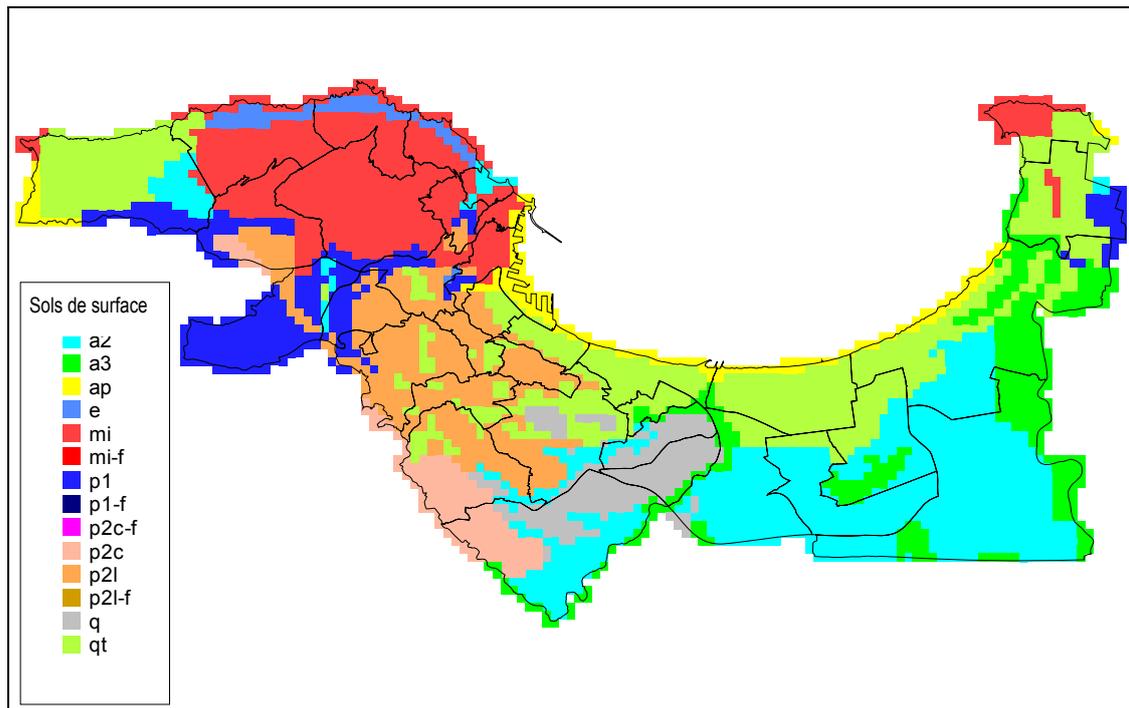


Figure 5-3 Sol de surface

5-3 Estimation du mouvement du sol

5-3-1 Analyse de mouvement du substratum

Le pic d'accélération au sol au niveau du substratum associée avec les séismes de référence a été calculé en utilisant les rapports d'atténuation appropriés. L'applicabilité à la zone algéroise de plusieurs relations d'atténuation sélectionnées au préalable a été évaluée à travers la comparaison avec les enregistrements du mouvement très forts observés lors du séisme de Boumerdes 2003. Les lois suivantes d'Ambraseys et al. (2005) ont été sélectionnées pour calculer la PGA de la zone d'étude.

$$\log y = 2,522 - 0,142Mw + (-3,184 + 0,314Mw) \log \sqrt{d^2 + 7,6^2}$$

$$+ \begin{cases} 0,137 : \text{sol meuble} \\ 0,050 : \text{sol meuble} \\ 0,0 : \text{rocher} \end{cases} + \begin{cases} 0,062 : \text{poussée} \\ 0,0 : \text{direction - glissement} \end{cases}$$

y : PGA (m/sec²)

Mw : mouvement du magnitude

d : distance à la projection en surface la faille (km)

Les modèles de failles de source des six scénarios sismique sont montrés à la Figure 5-4. Pour chaque modèle de failles, les distances du centre de chaque maille jusqu'à la projection de la surface des failles de sources ont été mesurées et la PGA au niveau du substratum a été calculé.

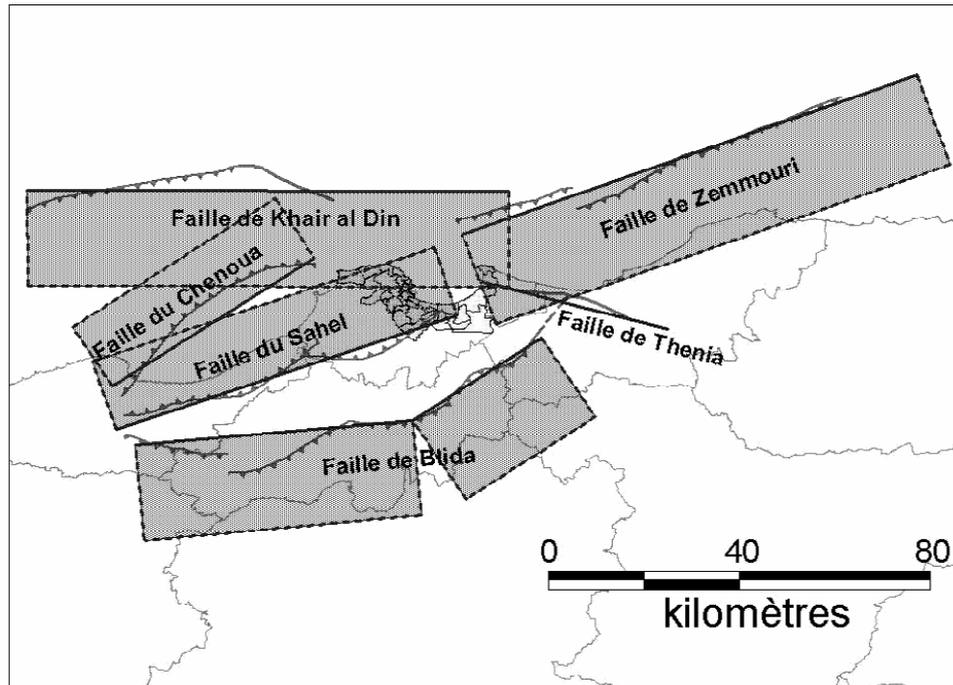


Figure 5-4 Modèles de faille des séismes de scénario

5-3-2 Analyse de l'amplification des couches de sols

Le mouvement sismique à la surface de sol est fortement affecté par les structures des sous sols (zone couverte des sédiments quaternaires, en particulier). Les effets de sols sur le mouvement sismique ont été évalués par l'analyse de la réponse sur la base des 4 013 modèles du sol de 250 m de côté. L'amplification du sous sol au-dessus du substratum sismique a été estimée par le code SHAKE pour l'analyse de la réponse 1D.

L'analyse de la réponse est conduite dans le contexte des propriétés à la fois linéaires et non linéaires. Du fait qu'il n'y a aucun laboratoire d'essai dynamique de sols pour l'évaluation des propriétés dynamiques de sols non linéaires en Algérie, les propriétés dynamiques de sols non linéaires existantes qui sont utilisées dans une étude de microzonage de la zone métropolitaine de Tokyo, Japon, ont été appliquées après avoir considéré les similarités des sols, vitesses de l'onde S et valeurs N.

Les ondes au substratum estimées lors du séisme de Boumerdes de 2003 sont utilisées en tant que mouvement d'entrée. La magnitude du séisme de Boumerdes, $M_w=6,9$, est comparable aux scénarios sismiques et la distance de la zone entre la zone de source et la zone d'étude ne diffère pas significativement. Par conséquent, les fréquences des ondes sismiques observées à Alger lors du séisme de Boumerdes sont convenables pour la mouvement d'entrée dans l'analyse de la réponse.

5-3-3 Élévation du mouvement sismique du sol

La valeur PGA à la surface de sol de chaque cellule de maille (Figure 5-5) a été calculée à partir du mouvement du substratum et de l'analyse de réponse. Le résultat de l'analyse linéaire montre la PGA légèrement importante dans la zone de l'est et la différence n'est pourtant pas importante. Le résultat de l'analyse non linéaire est utilisé plus tard comme distribution de la PGA.

L'intensité sismique sur l'échelle MSK (Figure 5-6) a été estimée par une nouvelle relation empirique révisée. L'intensité sismique et les enregistrements de mouvements forts disponibles au CGS des séismes de Chenoua de 1989, d'Ain Timouchent de 1999 et de Boumerdes de 2003 ont été collectés avant de réviser la nouvelle relation pour l'Algérie.

[Références]

Ambraseys N.N., Douglas J., Sarma S.K. and Smit P.M., 2005, Equations for the Estimation of Strong Ground Motions from Shallow Crustal Earthquakes Using Data from Europe and the Middle East: Horizontal Peak Ground Acceleration and Spectral Acceleration. Bulletin of Earthquake Engineering, 3, pp.1-53.

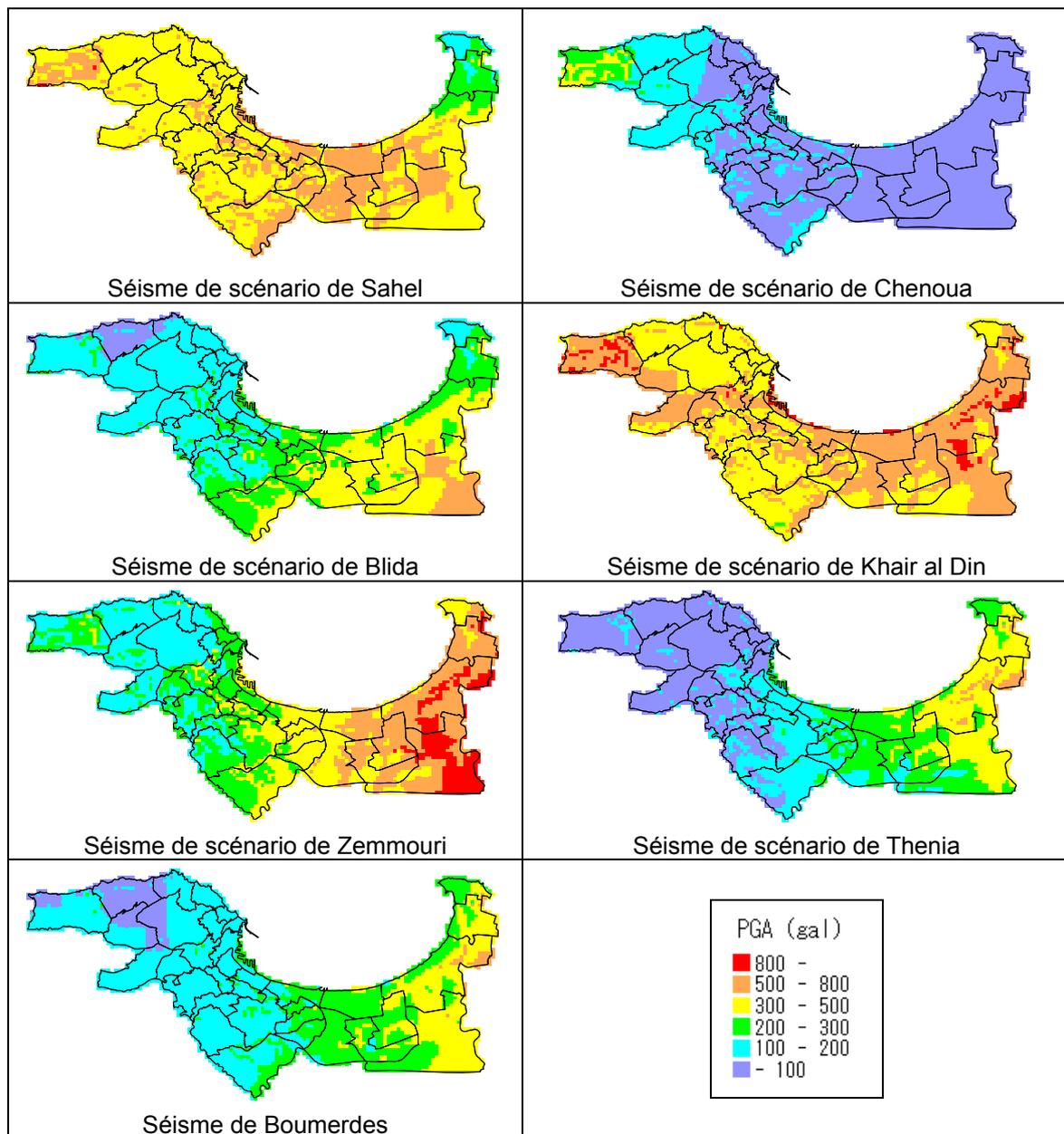


Figure 5-5 Distribution de l'accélération de pic au sol à la surface de sol

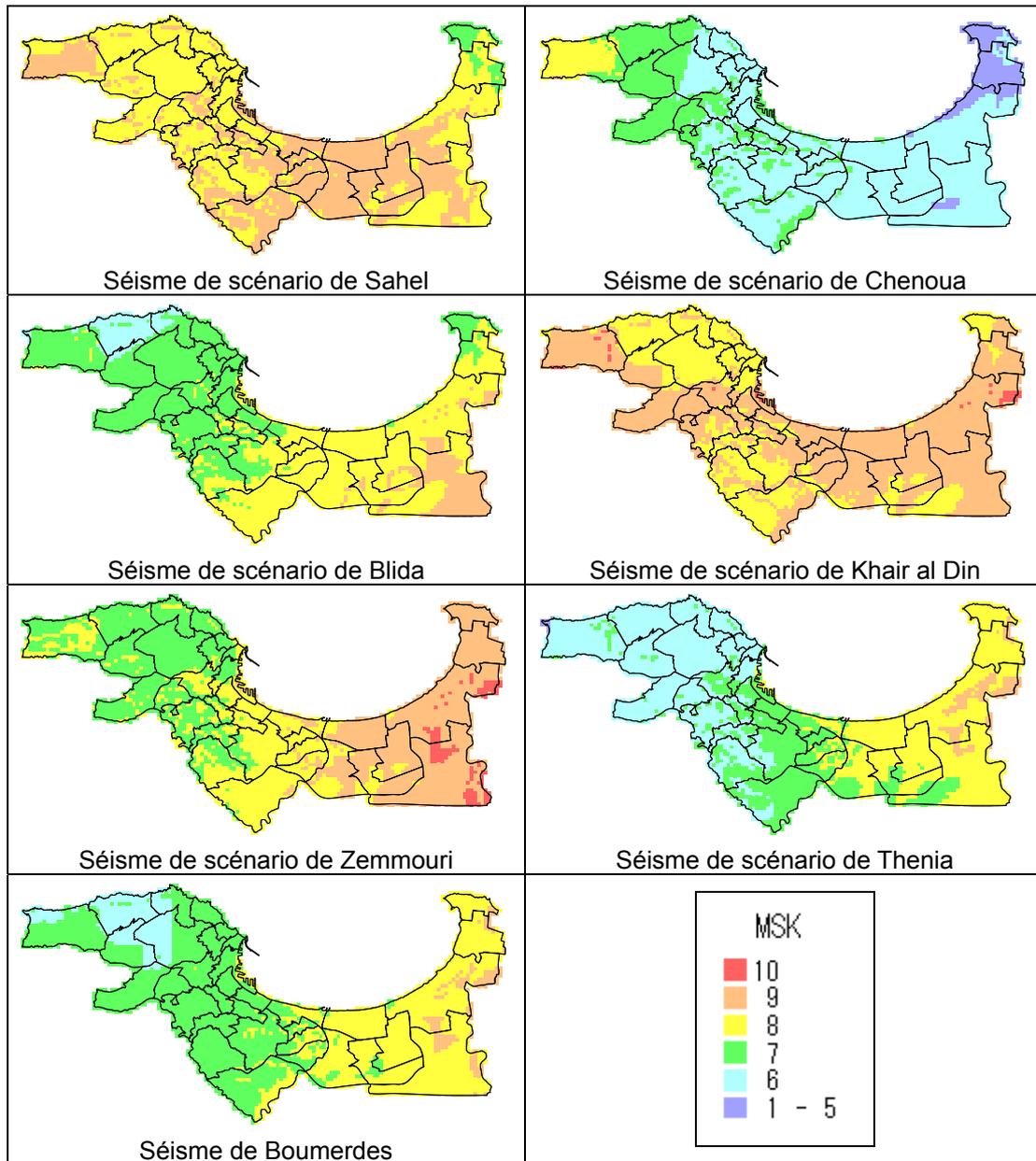


Figure 5-6 Distribution de l'intensité sismique sur l'échelle MSK

5-4 Estimation du potentiel de liquéfaction

5-4-1 Méthodologie

La méthode F_L (Japan Road Association /Association routière du Japon, 2002) a été adoptée pour l'estimation du potentiel de liquéfaction des dépôts de chaque profondeur. L'approche par cette méthode F_L de l'évaluation du potentiel de liquéfaction consiste en les étapes suivantes :

- 1) Estimation des résistances des sols à la liquéfaction dans un dépôt (R);
- 2) Estimation des contraintes de cisaillement susceptibles d'être impliquées dans le dépôt de sol pendant un séisme (L);
- 3) Estimation du potentiel de liquéfaction (F_L) du dépôt sur la base de 1) et 2).

En vue de microzonage sismique, il est important d'estimer, plutôt que l'occurrence de la liquéfaction elle-même dans un dépôt, son effet sur la surface de sol ou les ouvrages. Pour ce faire, l'indice de potentiel de liquéfaction P_L de Iwasaki et al. (1982) a été adopté dans la présente étude. La combinaison des méthodes F_L et P_L est communément utilisée au Japon pour souci d'usage pratique.

5-4-2 Conditions préalables pour l'analyse

(1) Couches de sol étudiées et leurs propriétés géotechniques

Les sols qui nécessitent une étude du potentiel de liquéfaction sont essentiellement des dépôts récents. La liquéfaction ne peut pas avoir lieu si F_c est supérieur à 35% et que I_p est supérieur à 15%. Dans la zone d'étude, « ap », « e », « a3 », « a2 », « q » et « qt » se conforment à ces critères.

(2) Niveau d'eau souterraine

Plusieurs niveaux d'eau souterraine montrent un écart évident des autres points puisqu'ils peuvent être les niveaux d'eau d'un aquifère profond plutôt que celui de surface. Le niveau d'eau souterraine requis dans l'analyse du potentiel de liquéfaction est le plus superficiel ; ainsi, le niveau d'eau souterraine du modèle de sols a été déterminé par les données observées et le jugement de l'ingénieur.

5-4-3 Potentiel de liquéfaction

Le potentiel de liquéfaction a été évalué en utilisant la valeur P_L (Tableau 5-2). Le résultat en est résumé à la Figure 5-7.

Tableau 5-2 Critères d'évaluation du potentiel de liquéfaction

Potentiel de liquéfaction	Critères	Explication
Élevé	$15 < P_L$	Amélioration de sols indispensable
Relativement élevé	$5 < P_L \leq 15$	Amélioration de sols nécessaire Enquête des structures importantes indispensable
Relativement faible	$0 < P_L \leq 5$	Enquête des structures importantes indispensable
Faible	$P_L = 0$	Zone à la portée de liquéfaction

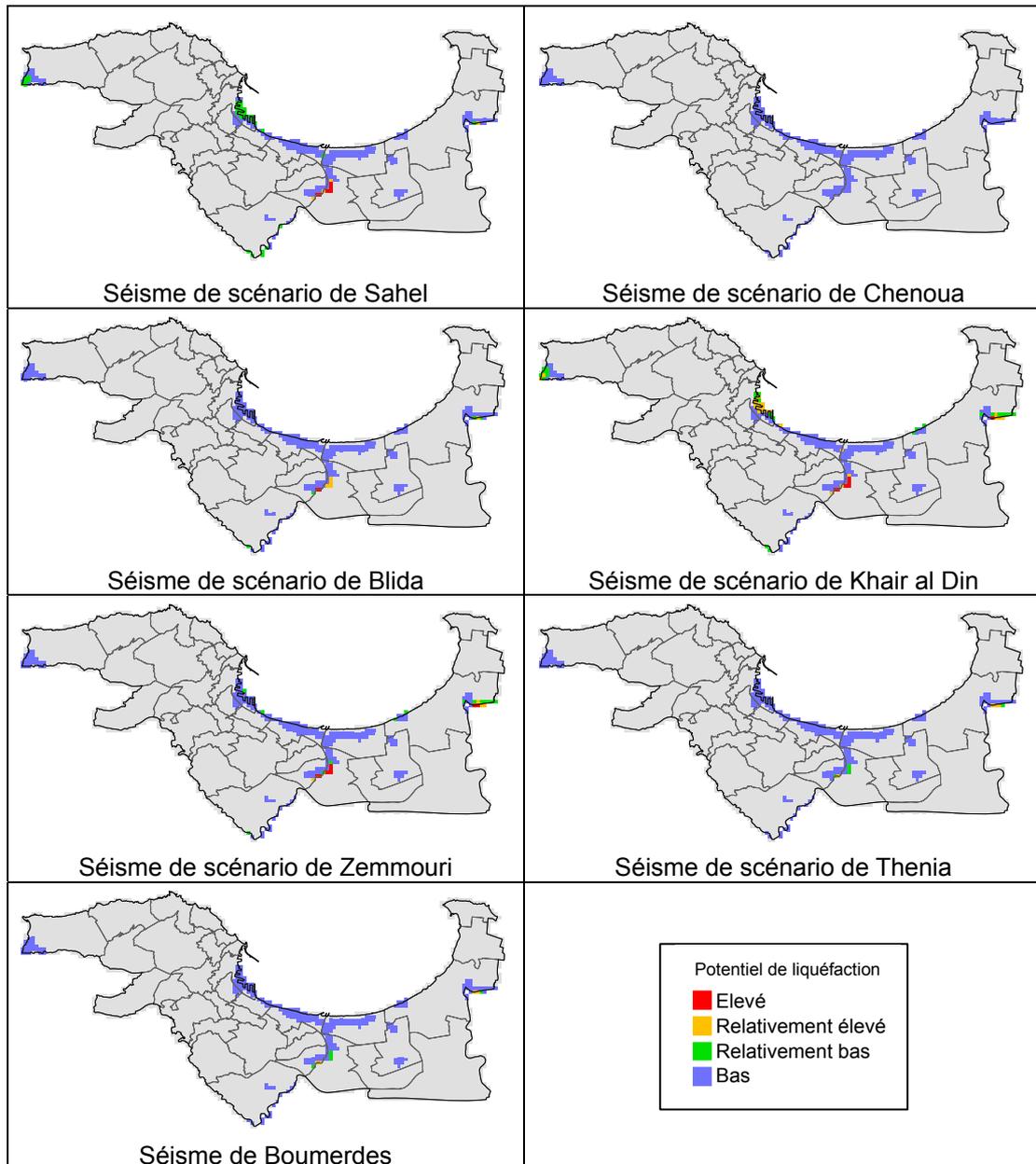


Figure 5-7 Distribution du potentiel de liquéfaction

[Références]

Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S. and Sato, H., 1982, Microzonation for Soil Liquefaction Potential Using Simplified Methods, Proc., 3rd Int. Conf. on Microzonation, Seattle, Vol.3, pp1319-1330.

Japan Road Association (2002). Specifications for Highway Bridges, Part V Earthquake Resistant Design.

5-5 Estimation de la stabilité de terrains en pente

5-5-1 Méthodologie

Deux types de terrains en pente sont généralement observés. Ils sont en pente raide ou faible. Le type dépend de la géologie : des schistes (mi) et des grès calcaires (p21) forment en général une pente raide et les autres types de sol une pente faible. On peut supposer que la première relève de l'effondrement et la dernière du glissement. Par conséquent, « mi » et « p21 » sont évalués sur la base de la méthode de Wilson et al. (1979) alors que les autres types par la méthode d'Ansal et Siyahi (1994).

5-5-2 Conditions préalables d'analyse

(1) Accélération critique

En utilisant les valeurs de c et de ϕ de chaque couche, l'accélération critique contre l'inclinaison de pente a été calculé en utilisant la méthode de Wilson et Ansal et celle de Siyahi.

(2) Distribution des angles de pente

L'angle de pente a été calculé à 5 m d'intervalle sur la base des données MNT produits par l'INCT et les données d'élévation basées sur les cartes topographiques à 1/10 000.

(3) Correction des angles de pente

A l'utilisation des données du MNT pour l'analyse de terrains en pente, il faut considérer que la fiabilité en sera limitée à cause d'intervalle de prélèvement. Une étude des paramètres numériques a été menée pour nombreux terrains en pente en différentes hauteurs et largeurs de sorte qu'un rapport entre l'angle actuel de pente et l'angle de pente basée sur le MNT a été étudié. Selon cette étude, une formule de correction a été développée.

En comparant la valeur de PGA de chaque séisme de scénario avec l'« accélération critique », le ($F_s \geq 1$) stable ou le ($F_s < 1$) instable a été jugé à chaque point de donnée du MNT à 5 m. Le potentiel de rupture de pente de chaque maille de 250 m a été évalué sur la base du taux de points instables des données du MNT dans chaque maille.

5-5-3 Évaluation de la stabilité de terrains en pente

La Figure 5-8 montre le potentiel de rupture de pente obtenu en utilisant la méthode décrite ci-dessus. Dans cette figure, le séisme de Boumerdes a été évalué comme ayant une surface de très faible potentiel de rupture de pente. D'où vient une bonne corrélation avec la description suivante sur les aléas de ce séisme : « Pendant la reconnaissance de post-séisme, seulement peu de glissements de terrain et de ruptures des routes mineurs ont été observés. Aucun glissement de terrain majeur n'a été observé » (EERI, 2003).

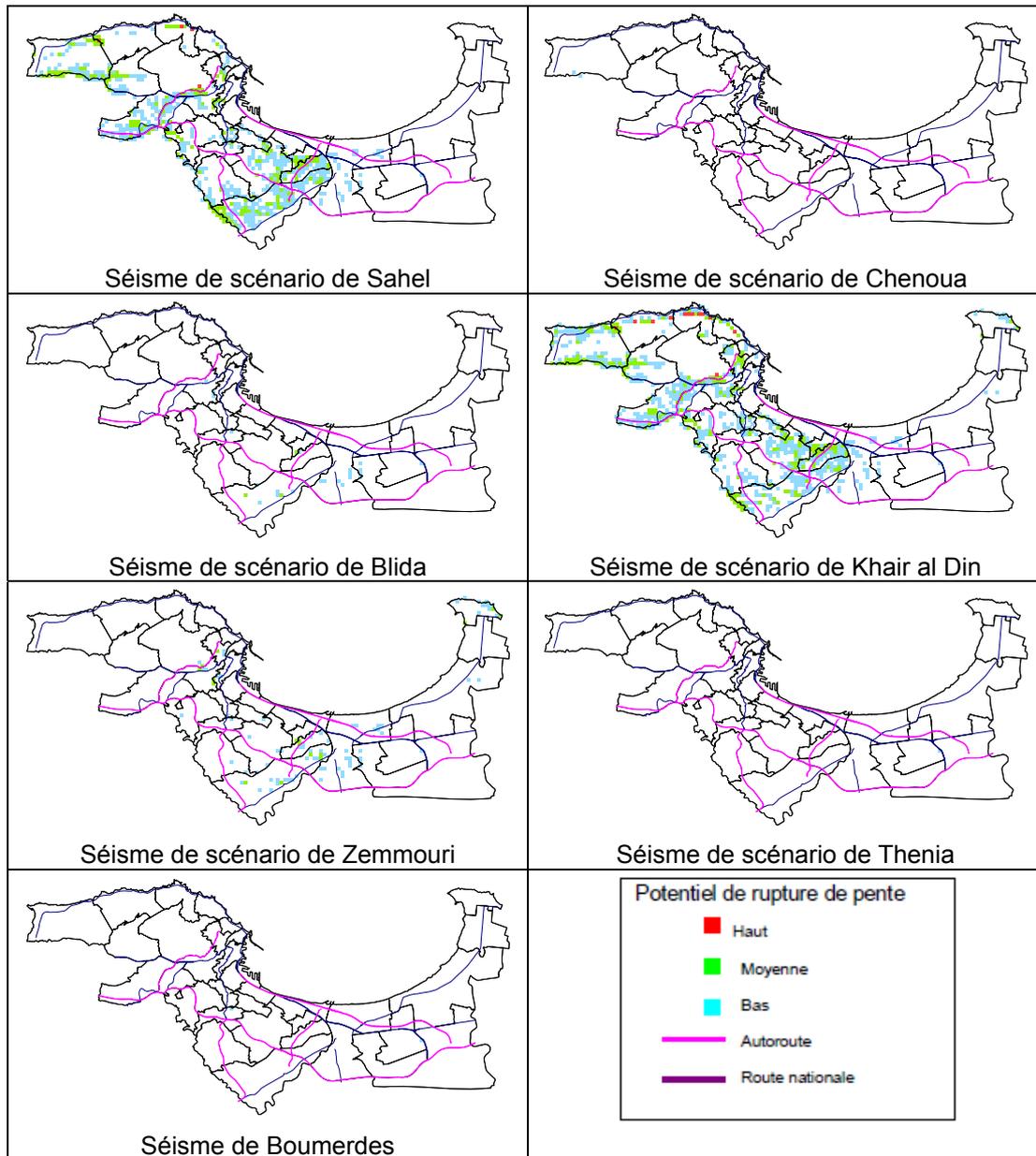


Figure 5-8 Distribution du potentiel de rupture de pente

5-5-4 Inspection des terrains en pente sur le terrain

Pour l'étape suivante, l'inspection individuelle des terrains en pente est recommandée quand il s'agit des mailles de grand potentiel obtenues par l'analyse basée sur le maillage. Les objectifs principaux de l'inspection des terrains en pente proposée sont les suivants :

- Déterminer l'étendue des terrains en pente.
- Évaluer la stabilité des terrains en pente.
- Déterminer les types et les quantités des infrastructures pouvant être affectées.

L'inspection des terrains en pente sur le terrain a été menée par l'équipe d'étude CGS-JICA. Les terrains en pente inspectés sont montrés à la Figure 5-9. Le Tableau 5-3 résume l'ensemble de l'inspection.

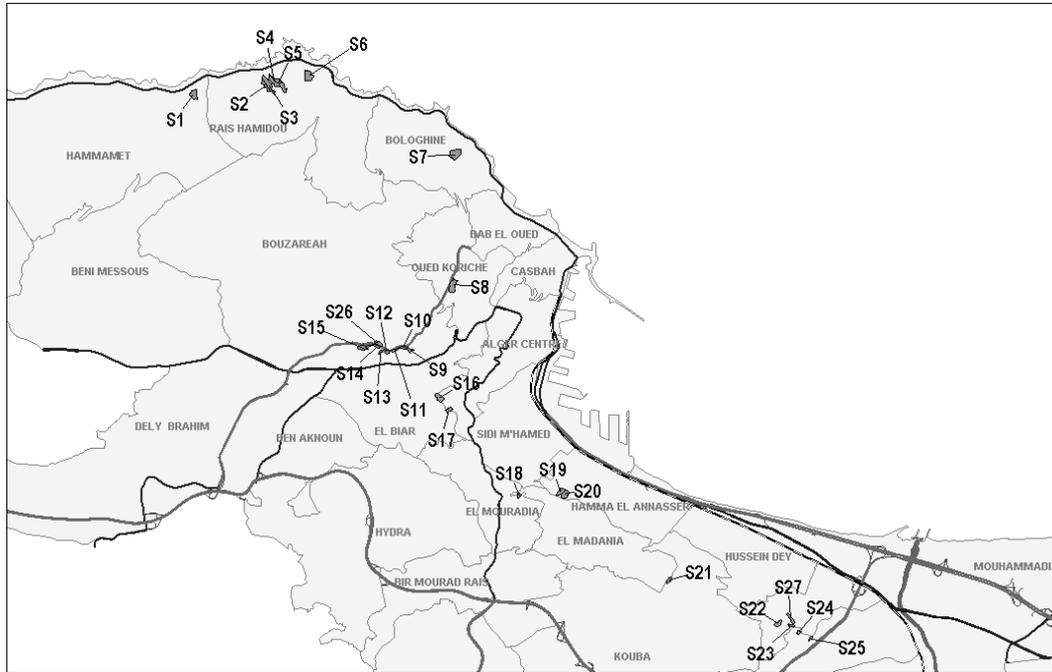


Figure 5-9 Localisations des terrains en pente inspectés

Tableau 5-3 Résumé de l'inspection des terrains en pente

ID de localisation	Appréciation totale	Évaluation de pente par intensité sismique				
		X <	IX - X	VIII - IX	VII - VIII	VI - VII
S1	18	A	A	B	C	C
S2	23	A	A	A	B	C
S3	23	A	A	A	B	C
S4	27	A	A	A	B	C
S5	21	A	A	B	C	C
S6	23	A	A	A	B	C
S7	23	A	A	A	B	C
S8	24	A	A	A	B	C
S9	18	A	A	B	C	C
S10	17	A	A	B	C	C
S11	20	A	A	B	C	C
S12	21	A	A	B	C	C
S13	17	A	A	B	C	C
S14	21	A	A	B	C	C
S15	27	A	A	A	B	C
S16	24	A	A	A	B	C
S17	24	A	A	A	B	C
S18	24	A	A	A	B	C
S19	29	A	A	A	B	C
S20	26	A	A	A	B	C
S21	27	A	A	A	B	C
S22	20	A	A	B	C	C
S23	21	A	A	B	C	C
S24	29	A	A	A	B	C
S25	11	A	B	C	C	C
S26	21	A	A	B	C	C
S27	20	A	A	B	C	C

[Références]

- Ansal, A and B.G. Siyahi, 1994, Microzonation for landslides during earthquakes, 2nd Int. Conf. on Earthquake Resistant Construction & Design, Savidis(ed), Balkema, 151-157.
- EERI, 2003, The Boumerdes, Algeria, Earthquake of May 21, 2003, EERI Learning from Earthquakes Reconnaissance Report.
- Wilson, R.C., G.F. Wiczorek, E.L. Horp, 1979, Development of Criteria for regional Mapping of Seismic Slope Stability, Abstract, 1979 Annual Meeting of the Geological Society of America.