

- 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).
- Glangeaud L., Aymé A., Mattauer M., and Muraour P., 1952, Histoire géologique de la province d'Alger. XIXème Congrès Géologique International, Monographies Régionales, 1ère Série, Algérie, N. 25
- Hanks and Kanamori, 1979, A moment magnitude scale, J.G.R., 84, 2348-2350.
- Idriss, 1985, Proceed. 11th Conf. Soil Mech. & Found. Eng., San Francisco, V1, Bolkema Ed. 255-330.
- Kanamori, 1977, The energy release in great earthquakes, J.G.R., 82, 2981-2987.
- Maouche S., 2000, Etude sismotectonique de l'Algérois et des zones limitrophes de Cherchell-Gouraya. Thèse de Magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Bâb Ezzouar, Alger, Algérie, 130 pp.
- Meghraoui M., 1991, Blind reverse faulting system associated with the Mount Chenoua-Tipaza earthquake of 29 octobre 1989, (North-Central Algeria), Terra Nova, 3, 84-93.
- Saadallah A., 1981, Le massif cristallophyllien d'El-Djazaïr (Algérie): évolution d'un charriage à vergence nord dans les Internides des Maghrébides. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 160 pages.
- Saadallah, 1984, Tectonique globale et active en Algérie alpine septentrionale: facteurs déterminants pour une approche de la définition de l'aléa sismique. Conférence Internationale sur la Microzonation sismique, Actes de la Conférence, Tome II, pp. 121-135.
- Saoudi N., 1989, Pliocène et Pléistocène inférieur et moyen du Sahel occidental d'Alger. Entreprise National du Livre, Alger, 1989.
- Slemmons D. and Lugaski T., 1984, Preliminary evaluation of maximum earthquakes, Algiers region, Algeria. Conférence Internationale sur la Microzonation sismique, Actes de la Conférence, Tome II, pp. 143-152.
- Swan et al., 1998, Probabilistic seismic hazard assessment of the Algiers region. Geomatrix Consultant report.
- 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.
- Yelles K., Lammali K., and Mahsas A., 2004, Coseismic deformation of the May 21st, 2003, Mw=6.8 Boumerdes earthquake, Algeria, from GPS measurements. Geophysical Research Letters, v. 31, L13610, doi:10.1029/2004GL019884.
- 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 à la surface de sol est fortement affecté par la structure du sous-sol. Les effets des sols sur le mouvement sismique sont évalués par la simulation numérique. Pour ce faire, les modèles de sols de chaque maille de 250 m de côté ont été créés sur la base des informations géologiques, géotechniques et géophysiques. Ces mêmes modèles sont aussi utilisés dans l'analyse du potentiel de liquéfaction. La modélisation des sols a été obtenue suivant le schéma du principe montré à la Figure 5-9.

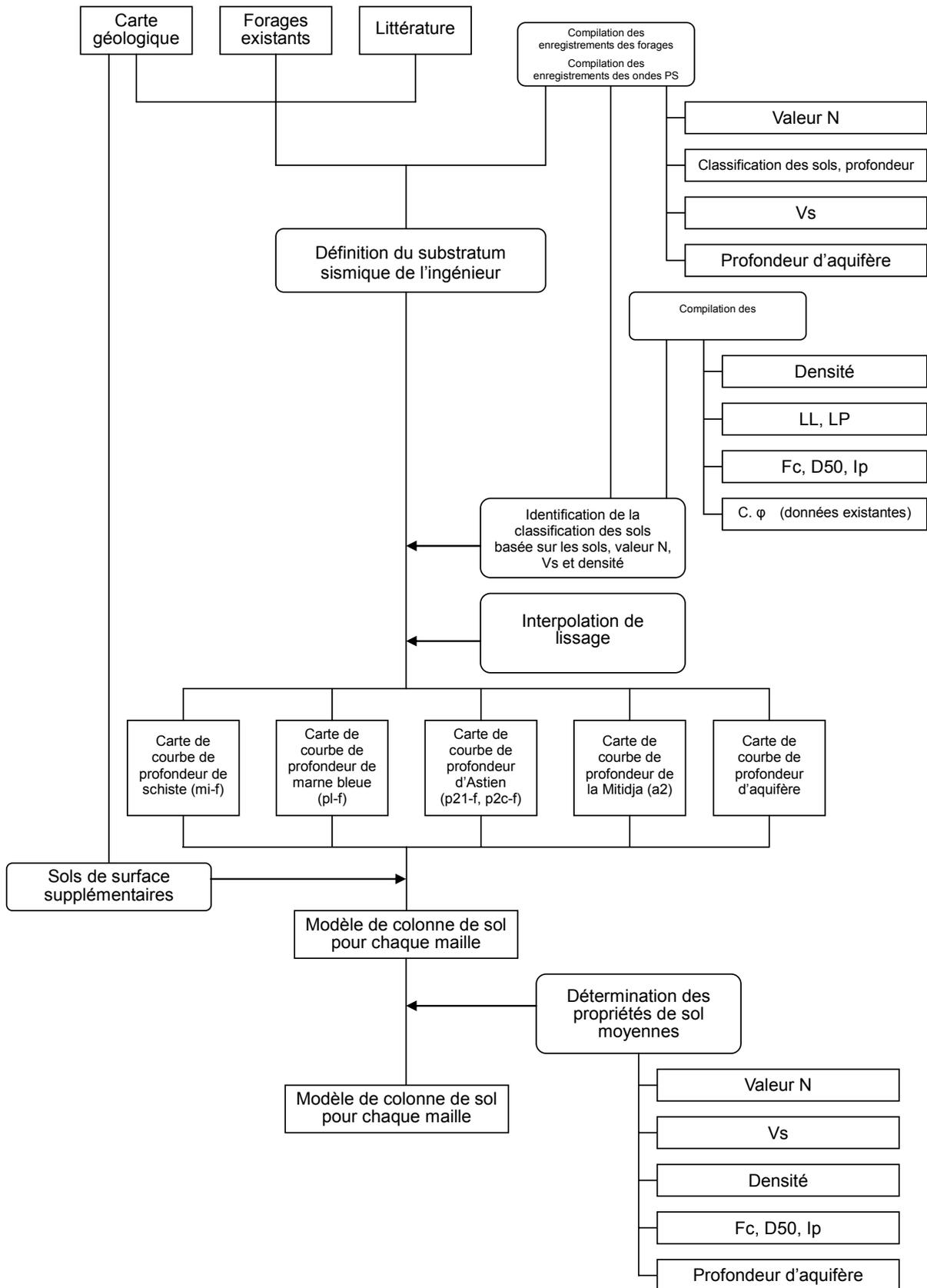


Figure 5-9 Schéma de principe pour la modélisation des sols

(1) Compilation des données de logs de forage et des résultats de sismique des puits (vitesses de propagation des ondes P et S) (Boring logs et PS loggings)

Les données de forages ainsi que les résultats des vitesses de propagation des ondes P et S ont été compilés dans la présente étude avec les données de forage existantes. Ces données ont été présentées de manière détaillée aux sections 3-3-1 et 3-3-3. La compilation a été conduite principalement pour obtenir les paramètres suivants :

- Valeur N relevant du SPT (essai de pénétration standard)
- Classification des sols et profondeur des différentes couches des modèles de sol
- Vitesse de l'onde S (V_s)
- Profondeur du niveau de la nappe d'eau souterraine

Dans la compilation, la localisation de chaque point de forage constitue aussi des informations très importantes. Les localisations des forages nouvellement effectués ont été mesurées par le laboratoire contractant et vérifiées à l'aide de GPS et de MNT (modèle d'élévation de terrain).

(2) Détermination du substratum

Le mouvement sismique a été déterminé à partir du mouvement sismique au substratum en évaluant l'amplification des différentes couches reposantes sur le substratum.

En règle générale, le substratum sismique peut être défini comme suit :

- Il se distribue sur toute la région d'enquête
- Les fluctuations des propriétés physiques au-dessous de cette couche sont moins importantes que celles des couches au-dessus de celle-ci
- $V_s = 3,0$ km/sec ou plus.

Actuellement, le substratum sismique avec 3,0 km/sec de V_s ou plus s'étend parfois dans une profondeur de plusieurs kilomètres à l'intérieur du bassin sédimentaire. Une enquête géophysique de grande envergure est nécessaire pour connaître sa structure.

Puisque la distribution du substratum sismique au tour de la zone d'étude est inconnue, on a adopté une couche de marnes bleues plaisanciennes (p1-f) avec 630 m/sec de V_s en tant que substratum sismique sur la base des cartes géologiques existantes, forages existants, littératures et données nouvelles des logs de forages et vitesse de propagation des ondes de cisaillement. Ces marnes bleues plaisanciennes ont été trouvées sur presque toute l'étendue de la zone d'étude exceptée la partie nord-ouest, c'est-à-dire, les communes de BAB EL OUED et BOUZAREAH, et l'extrémité nord-est, c'est-à-dire, la commune d'EL MARSA. Ces zones consistent en couches de schistes directement couvertes de sédiments ou de roches détériorées. Ces couches de schistes, avec 1030 m/sec de V_s , ont été utilisées adoptées comme substratum en ces zones. La distribution dudit substratum sismique de l'ingénieur est montrée à la Figure 5-10.

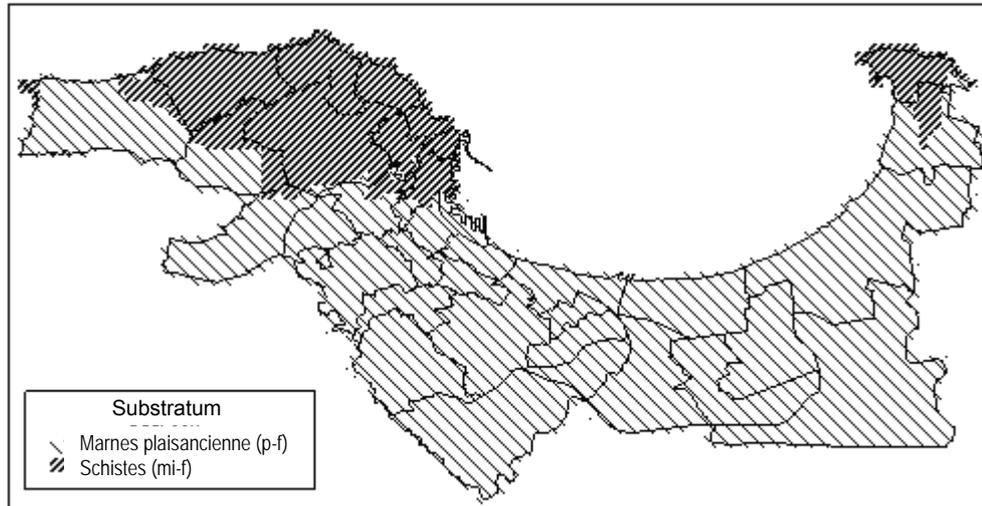


Figure 5-10 Distribution des deux types de substratum

(3) Compilation des essais au laboratoire

Les données des essais au laboratoire de la présente étude ont été compilées avec les données collectées existantes. Les données sont montrées à la Section 3-3-2. La compilation a été conduite principalement selon les paramètres suivants :

- Densité
- Limite d'Atterberg (LL, LP)
- Contenu en particules fines (Fc)
- Granulométrie de 50% de tamisat (D50)
- Indice de plasticité (Ip)
- Cohésion (C) et angle de frottement interne (ϕ), (données existantes seules)

(4) Identification de la classification des sols

Basés sur les données de forage compilées, les données géophysiques des ondes P et S et les données des essais au laboratoire, les sols identifiés dans la présente étude ont été classés conformément à la géologie de l'ingénieur. La classification des sols est montrée au Tableau 5-4. Les différentes couches constituant la colonne de sol ont été classées selon cette classification

Tableau 5-4 Classification des sols pour la géologie

Symbole	Explication
ap	Dépôt de plages et de sables
e	Dépôt de pentes
a3	Dépôt quaternaire (sables)
a2	Dépôt quaternaire (argiles)
q	Dépôt quaternaire ancien
qt	Terrasse marine
p2c	Couche astienne (marnes, détériorées)
p2c-f	Couche astienne (marnes, fraîches)
p2l	Couche calcaire astienne (détériorées)
p2l-f	Couche calcaire astienne (fraîche)
p1	Couche plaisancienne (marnes bleues, détériorées)
p1-f	Couche plaisancienne (marnes bleues, fraîches)
mi	Roches métamorphiques (schistes, détériorés)
mi-f	Roches métamorphiques (schistes, fraîches)

(5) Interpolation et lissage

La profondeur des couches de sol a été identifiée pour les nouveaux points de forage et pour les forages existants. Les couches de schistes, plaisanciennes et astiennes montrent une légère inclinaison dans la zone d'étude selon les logs de forages et les littératures. 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. L'« analyse de surface » d'ArcGIS est utilisée pour cet objectif. Puisque cette interpolation numérique montre parfois une distribution de profondeur irréaliste à cause de manque de données ou d'erreurs inévitables de données, la distribution de profondeur a été révisée sur la base des règles suivantes :

- Les anciens dépôts ne couvrent pas les couches récentes.
- La surface de sol est couverte de rochers ou sols détériorés.

Les profondeurs des schistes (mi-f), marnes bleues (p1-f), couches astiennes (p21-f, p2c-f) et argiles de la Mitidja (a2) sont montrées à la Figure 5-11.

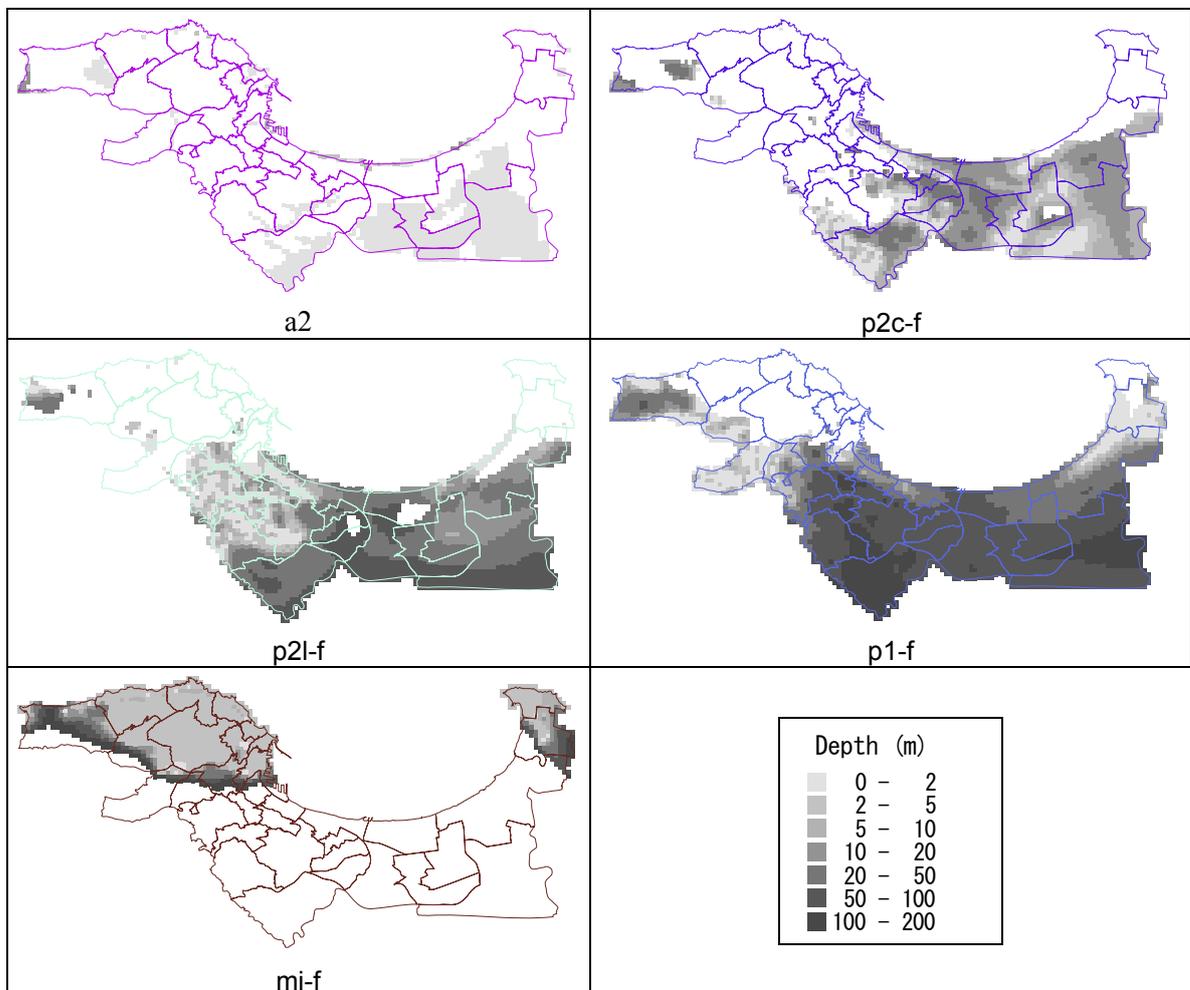


Figure 5-11 Profondeurs des couches après interpolation

(6) Sols de surface

Différent des rochers et des sols durs, les sols de surface meubles montrent habituellement une variation locale évidente. Le sol de surface moins profond que la couche astienne présente une grande différence sur de courte distance. La densité de forage n'était pas suffisante pour l'estimation des propriétés de sols de surface. En conséquence, la carte géologique (Figure 3-19) a été utilisée pour l'estimation des conditions de sol dans chaque maille.

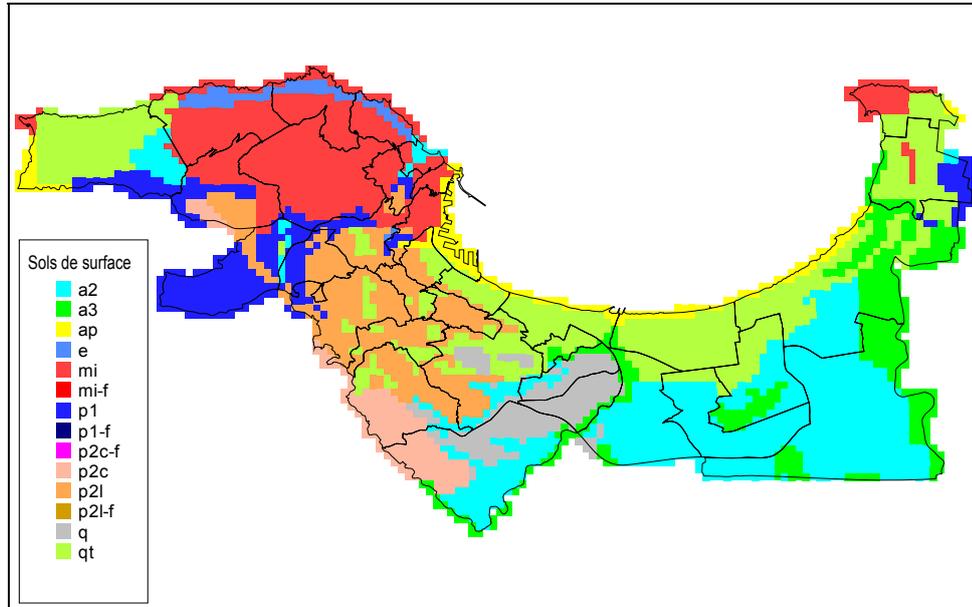


Figure 5-12 Sols de surface

(7) Détermination des propriétés moyennes des différentes couches de sol

Les paramètres géotechniques et géophysiques suivants ont été déterminés pour chaque couche de modèle à 250 m de maille sur la base des paramètres du Tableau 3-16.

- 1) Pour l'analyse de la réponse
 - Profondeur
 - V_s
 - Densité
- 2) Pour l'analyse de la liquéfaction
 - Profondeur
 - Valeur N (La dépendance de la profondeur est considérée, voir la section 5-4)
 - F_c
 - D_{50}
 - I_p
 - Niveau d'eau

Les Figure 5-13 et Figure 5-14 montrent les sections typiques du sol dans une direction de l'est à l'ouest et une autre du nord au sud de la zone d'étude, respectivement. La Figure 5-15 montre un exemple de modèle géologique.

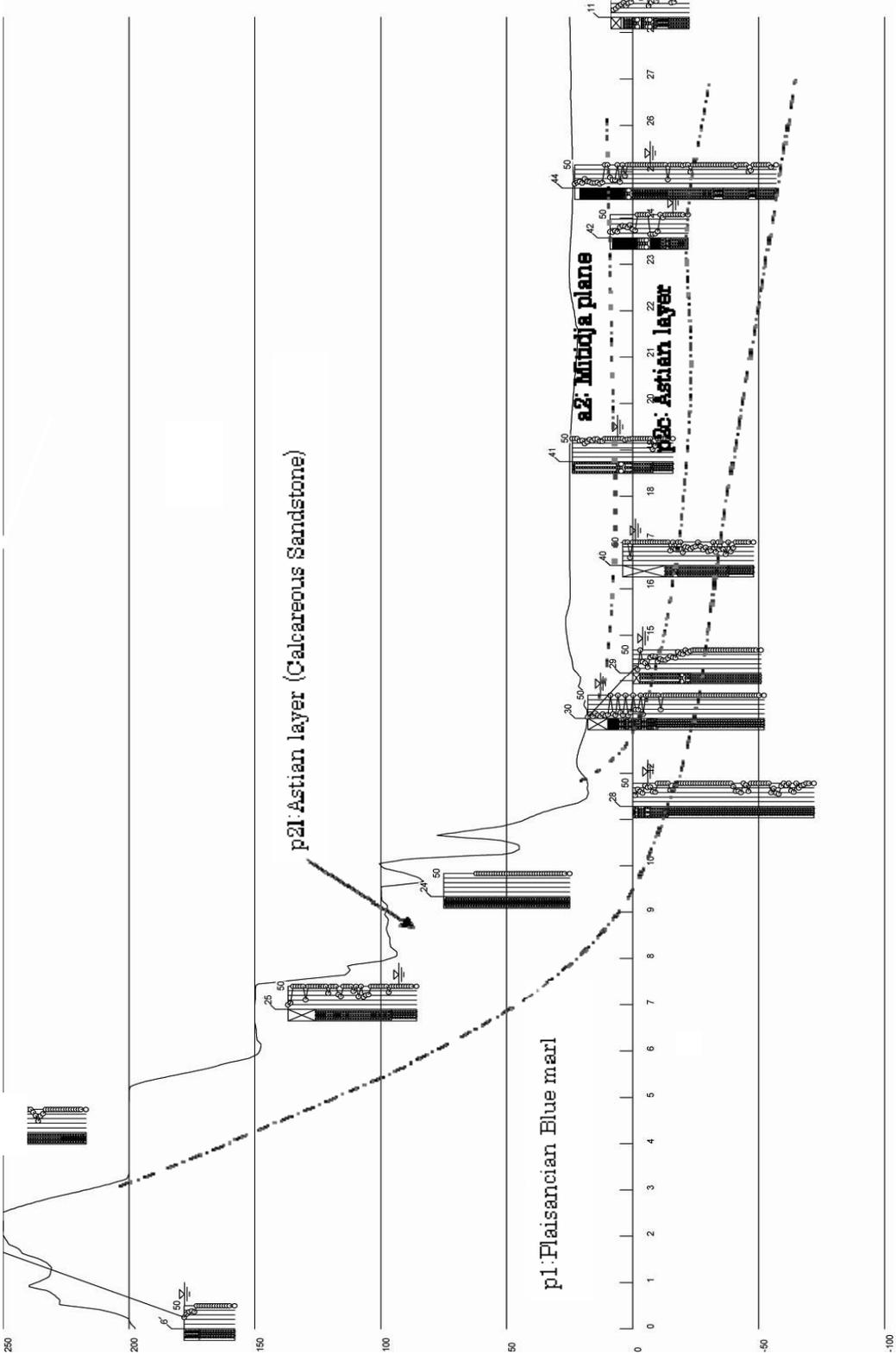


Figure 5-13 Section transversale typique de la zone d'étude (est-ouest (Forage_ No6-Forage No.11))

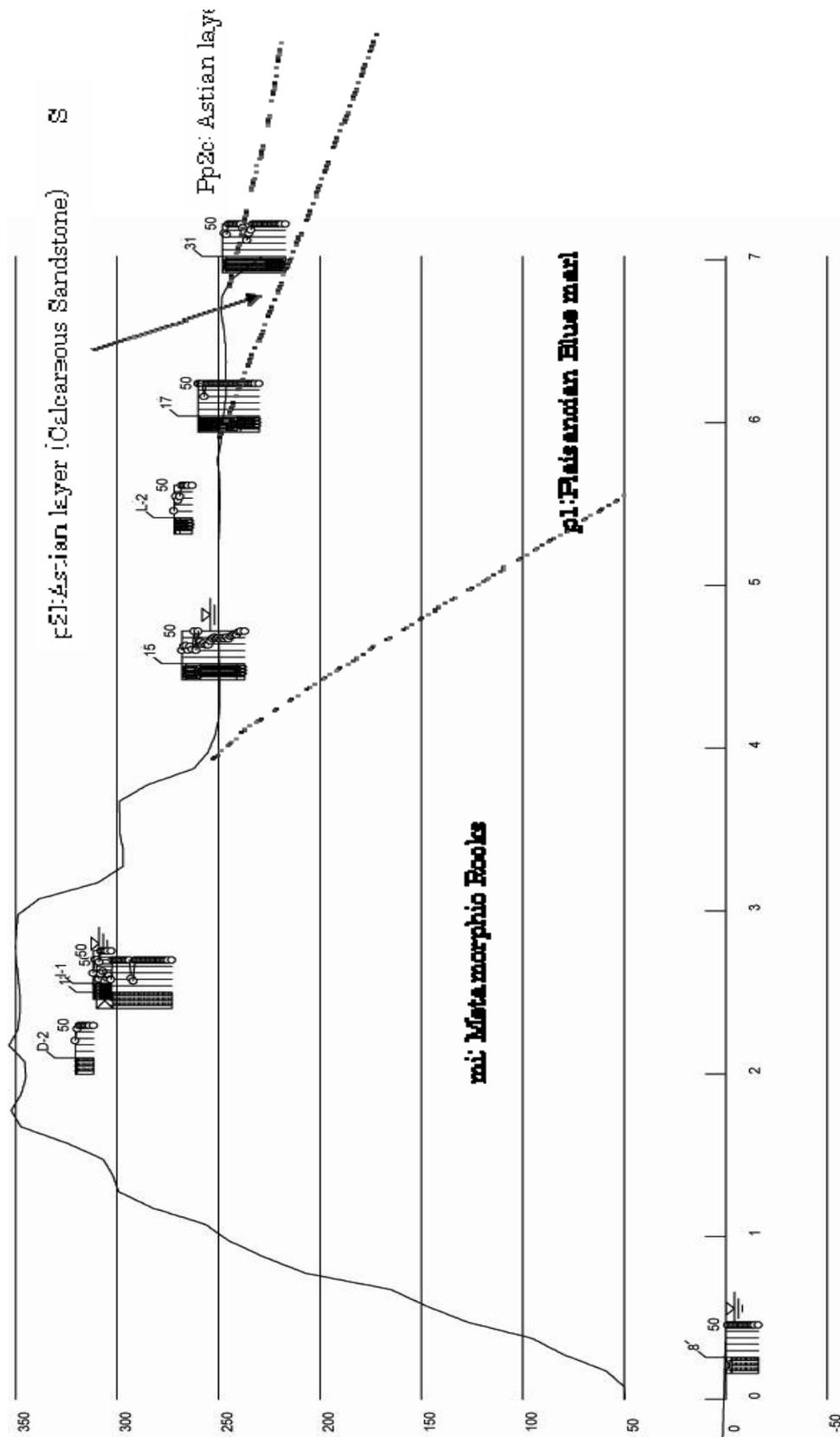
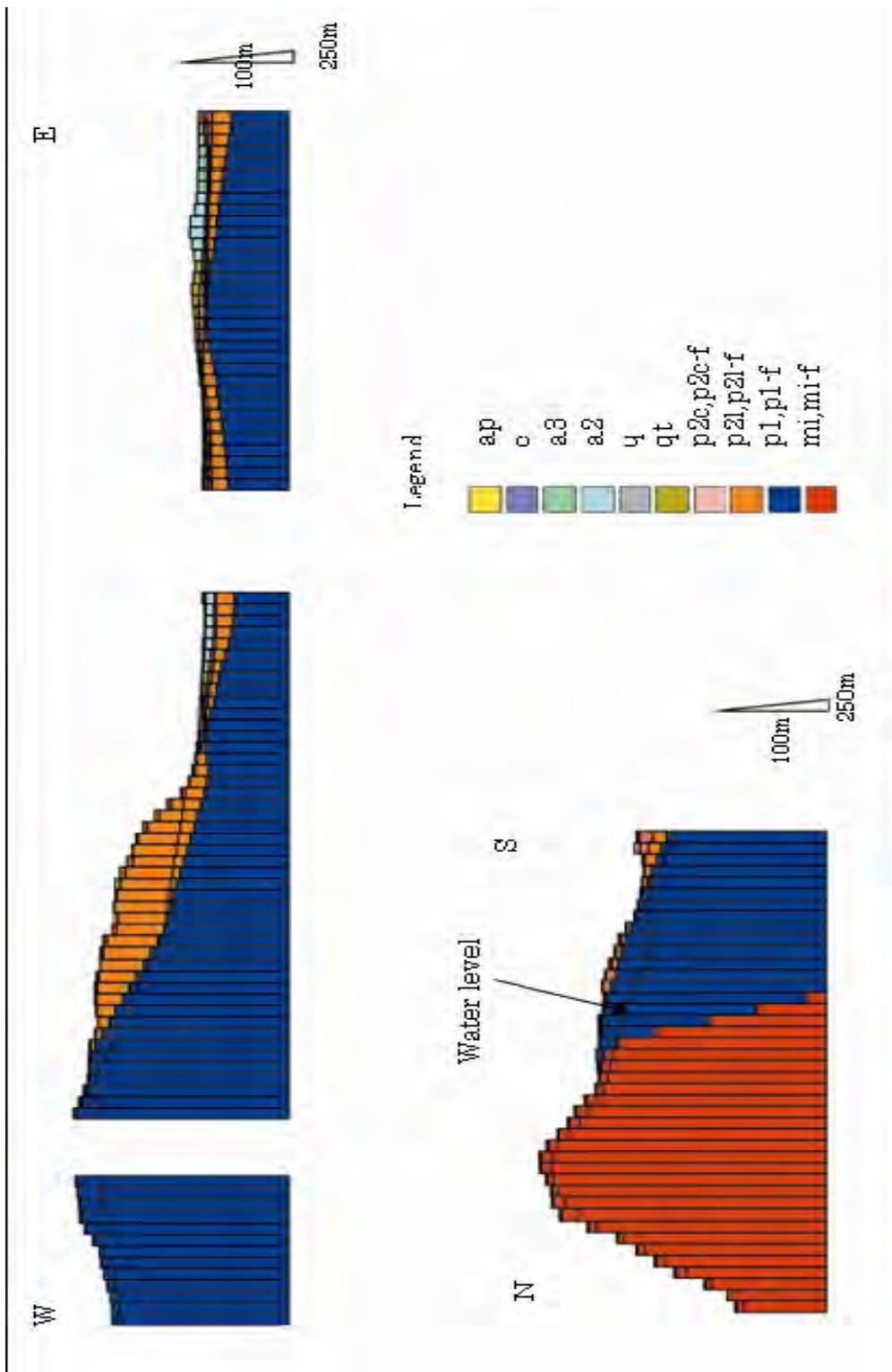


Figure 5-14 Section transversale typique de la zone d'étude (nord-sud (Forage_No. 8-Forage No. 31))



Au-dessus du graphique : La même section que la Figure 5-13
 Au-dessous du graphique : La même section que la Figure 5-14

Figure 5-15 Modèle de sols converti du modèle typique

5-3 Estimation du mouvement du sol

5-3-1 Analyse de mouvement du substratum

Les effets produits par les sources sismogènes sont quantifiés à travers les paramètres de mouvement du sol (accélération, vitesse, accélération spectrale, etc.). Ces effets sont calculés en mettant en valeur les lois d'atténuation basées sur la distance entre source et site, magnitude et profondeur d'hypocentre. Les lois d'atténuation sont choisies selon le contexte sismotectonique et la comparaison avec les enregistrements des mouvements importants observés et le mouvement du substratum est donné en tant que carte de mouvement du sol pour une période de retour donnée. Ceux-ci sont donnés dans le présent rapport en tant que carte de pic d'accélération horizontale (PGA) au niveau du substratum pour une période de retour de 475 ans (c-à-d 10% de probabilité de dépassement en 50 ans).

(1) Rapport d'atténuation

Le pic d'accélération horizontale au substratum associée avec les séismes de référence est calculé en utilisant les rapports d'atténuation appropriés. Initialement, trois rapports d'atténuation suivants ont été sélectionnés après avoir considéré les enregistrements algériens :

- Laouami et al. (2005) : Rapport empirique développé par Laouami et al. (2005) permet de calculer la PGA horizontale pour les séismes avec une échelle de magnitudes (M_s) de 5,7 à 6,0 pour les distances hypocentrales entre 13 et 70 km. Cette loi d'atténuation ne considère ni le type de sol ni le style de développement de faille. Elle est basée sur quatre séismes algériens.
- Ambraseys et al. (2005): Rapport empirique développé par Ambraseys et al. (2005) permet le calcul du PGA horizontale et du spectre de réponse pour les séismes pour lesquels la magnitude de moment (M_w) varie entre 5,0 et 7,6, pour les distances jusqu'à la projection de surface de la faille rangeant entre 0 et 100 km, et pour des séismes peu profonds. Ces rapports tiennent compte du type de sol (roche/sol rigide/sol meuble), avec $V_{s,30} > 750$ m/s pour le type rocheux et le mécanisme de déformation (inverse/décrochement/normal). Les équations sont basées sur les données de l'Europe et du Moyen Orient incluant 15 enregistrements de l'Algérie.
- Berge-Thierry et al. (2003): Rapport empirique développé par Berge-Thierry et al. (2003) permet le calcul du PGA horizontale et du spectre de réponse pour les séismes pour lesquels la magnitude de surface varie entre 4,0 et 7,9, la distance de foyer varie entre 4 et 330 km et pour les séismes peu profonds. Ces rapports tiennent compte du type de sol (roche/sol) avec $V_{s,30} > 800$ m/s pour le type de roche. Les équations sont basées sur les données de l'Europe, de la Californie et du Moyen et Proche Orient incluant 3 enregistrements de l'Algérie.

L'applicabilité à la zone d'Alger de ces trois rapports d'atténuation a été évaluée à travers la comparaison avec les enregistrements des mouvements importants observés lors du séisme de Boumerdes de 2003. La Figure 5-16 montre les points d'enregistrement des mouvements importants dus au séisme de Boumerdes le long de l'épicentre et la faille de source par Delouis et al. (2004). Les valeurs du PGA des composants horizontaux sont tracées à la Figure 5-17 selon les conditions des sols. La valeur d'accélération au substratum des stations de Hussein Dey et de KOUBA est analysée par l'analyse de la réponse (SHAKE) basée sur les résultats de

l'investigation en sismique des puits (PS-logging) réalisés dans le cadre de cette étude aux endroits exacts. Ces valeurs, tracées sur la Figure 5-17, sont autour d'une distance épacentrale de 40 km ou d'une distance de 25 km de la projection superficielle de la faille. Les modèles du sol de HUSSEIN DEY et de Kouba sont montrés au Tableau 5-5.

Les lignes des graphiques supérieures de la Figure 5-17 sont la formule de Laoumi et al. (2005) et Berge-Thierry et al. (2003), alors que celles d'Ambraseys et al. (2005) est dans les graphiques inférieurs. La formule d'Ambraseys et al. (2005) offre des estimations meilleures que les deux autres. La raison principale est telle que la méthode d'Ambraseys et al. (2005) peut évaluer l'étendue de la source sismique alors que les autres ne peuvent pas le faire. Si la magnitude est faible, la source sismique peut être traitée comme point de source et les valeurs calculées basées sur ces trois formules seront largement différentes. Cependant, la magnitude du séisme de scénario de la présente étude n'est pas suffisamment petite. Par conséquent, nous avons décidé d'utiliser la méthode d'Ambraseys et al. (2005) pour le calcul du mouvement du substratum dans la présente étude.

La formule d'Ambraseys et al. (2005) pour calculer le PGA est comme suit :

$$\log y = 2.522 - 0.142M_w + (-3.184 + 0.314M_w) \cdot \log \sqrt{d^2 + 7.6^2} + \begin{cases} 0.137 & \text{: soft soil} \\ 0.050 & \text{: stiff soil} \\ 0.0 & \text{: rock} \end{cases} + \begin{cases} 0.062 & \text{: thrust} \\ 0.0 & \text{: strike-slip} \end{cases}$$

y : PGA(m/sec²)

M_w : magnitude de moment

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

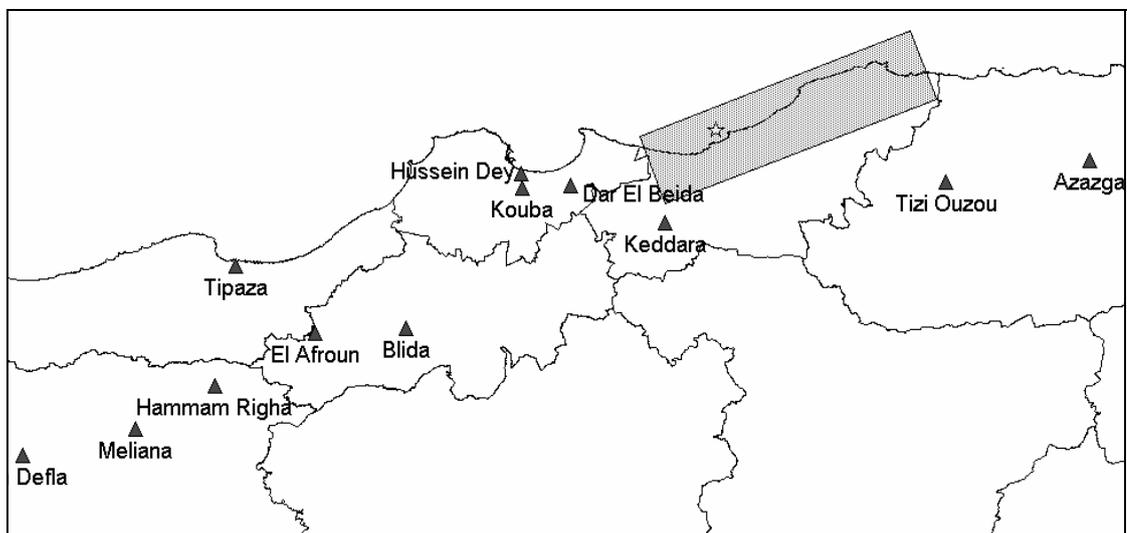


Figure 5-16 Localisations des stations accélérométriques qui ont enregistré le séisme de Boumerdes; triangle: observatoire, étoile: épacentre, rectangle: source de faille de Delouis et al. (2004)

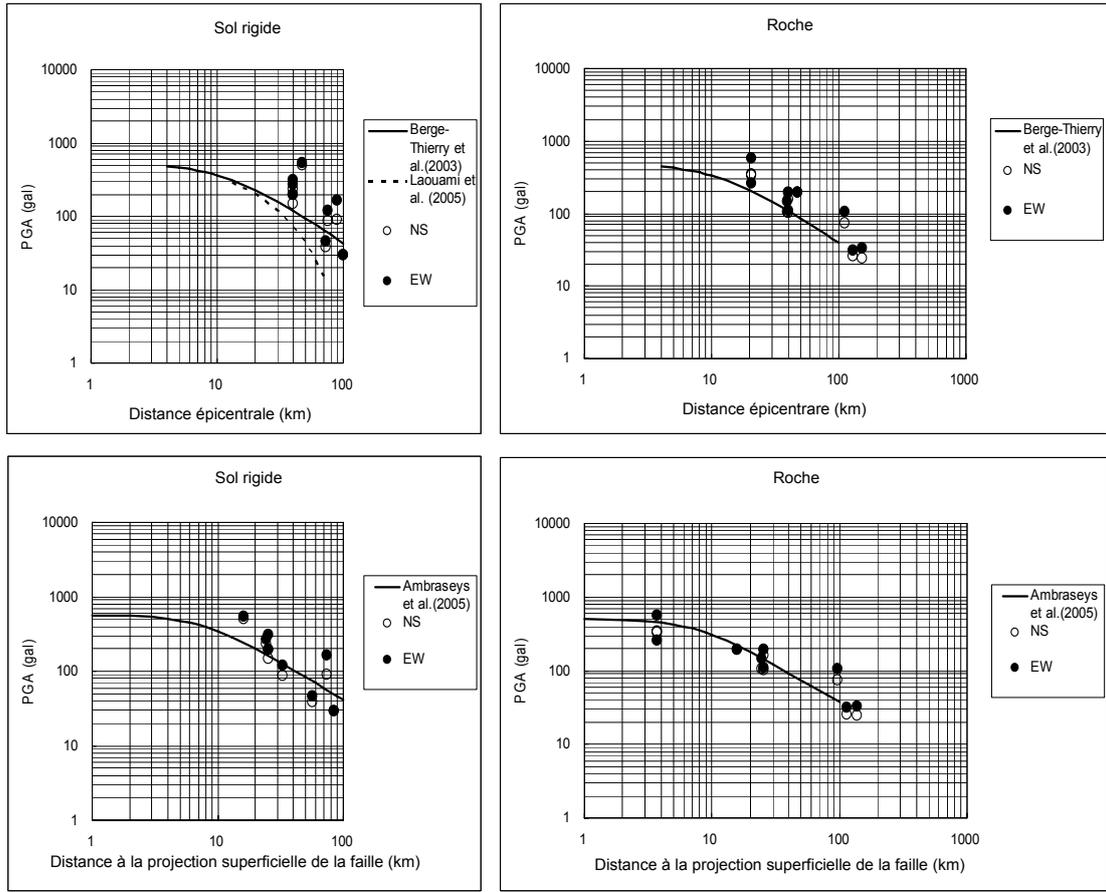


Figure 5-17 Comparaison des PGA observées avec la loi d'atténuation

Tableau 5-5 Modèle du sol pour l'analyse de la réponse à l'Observatoire de mouvements importants

HUSSEIN DEY

Profondeur (m)	Sol	Vitesse (m/sec)	Densité (g/cm ³)
0	Remblai	200	1,8
2	Sable rouge	300	1,85
7	Grés	680	2,2
16	Marne bleue	470	1,8
20	Marne bleue	670	2,0
32	Marne bleue	520	1,9
58	Marne bleue	780	2,0

KOUBA

Profondeur (m)	Sol	Vitesse (m/sec)	Densité (g/cm ³)
0	Remblai	300	1,7
3	Grés	380	1,9
11	Pierre du limon /Grés	480	1,9
40	Marne/Grés	870	1,9

(2) Mouvement du substratum

Les modèles de failles de source des six scénarios sismique sont montrés à la Figure 5-18. 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. Selon l'identification d'Ambraseys et al. (2005), le substratum signifie un site avec une vitesse de l'onde S supérieure à 30 m de la surface dépassant 750 m/s.

Les cartes du PGA générée par une période de retour de 475 ans de séisme de scénario sont présentées à la Figure 5-19. La carte du séisme de Boumerdes est aussi présentée à la Figure 5-19.

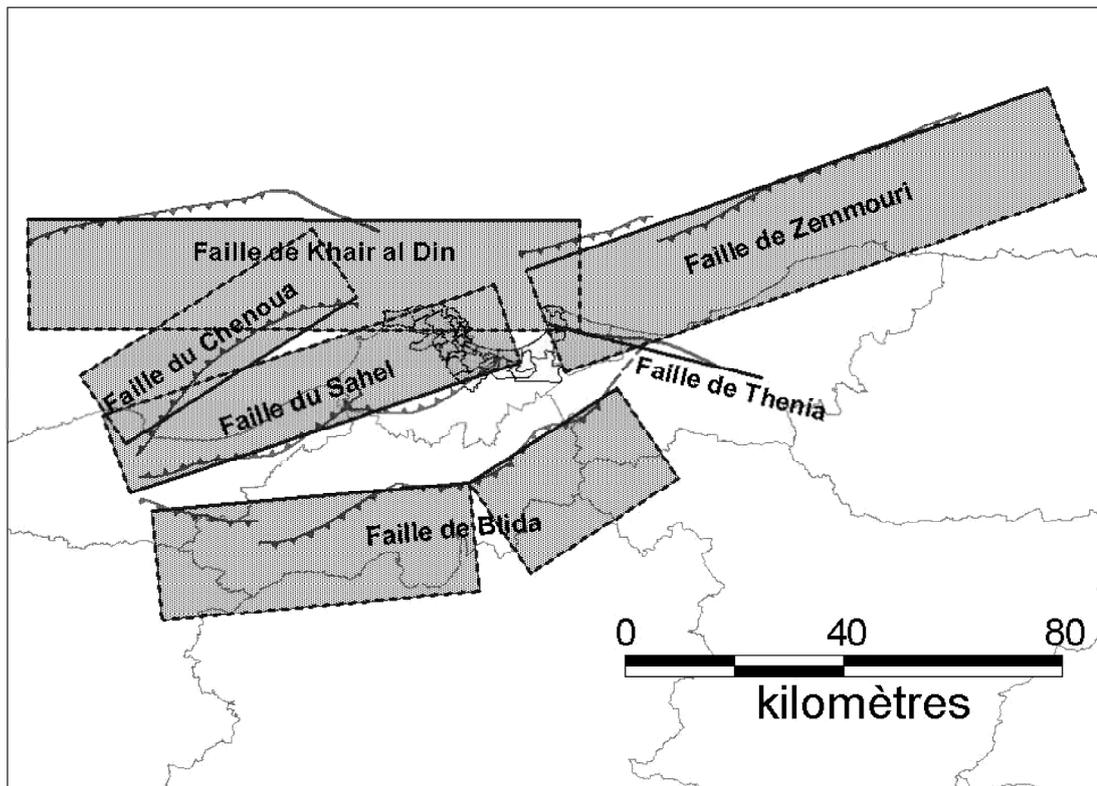


Figure 5-18 Modèles de faille des séismes de scénario

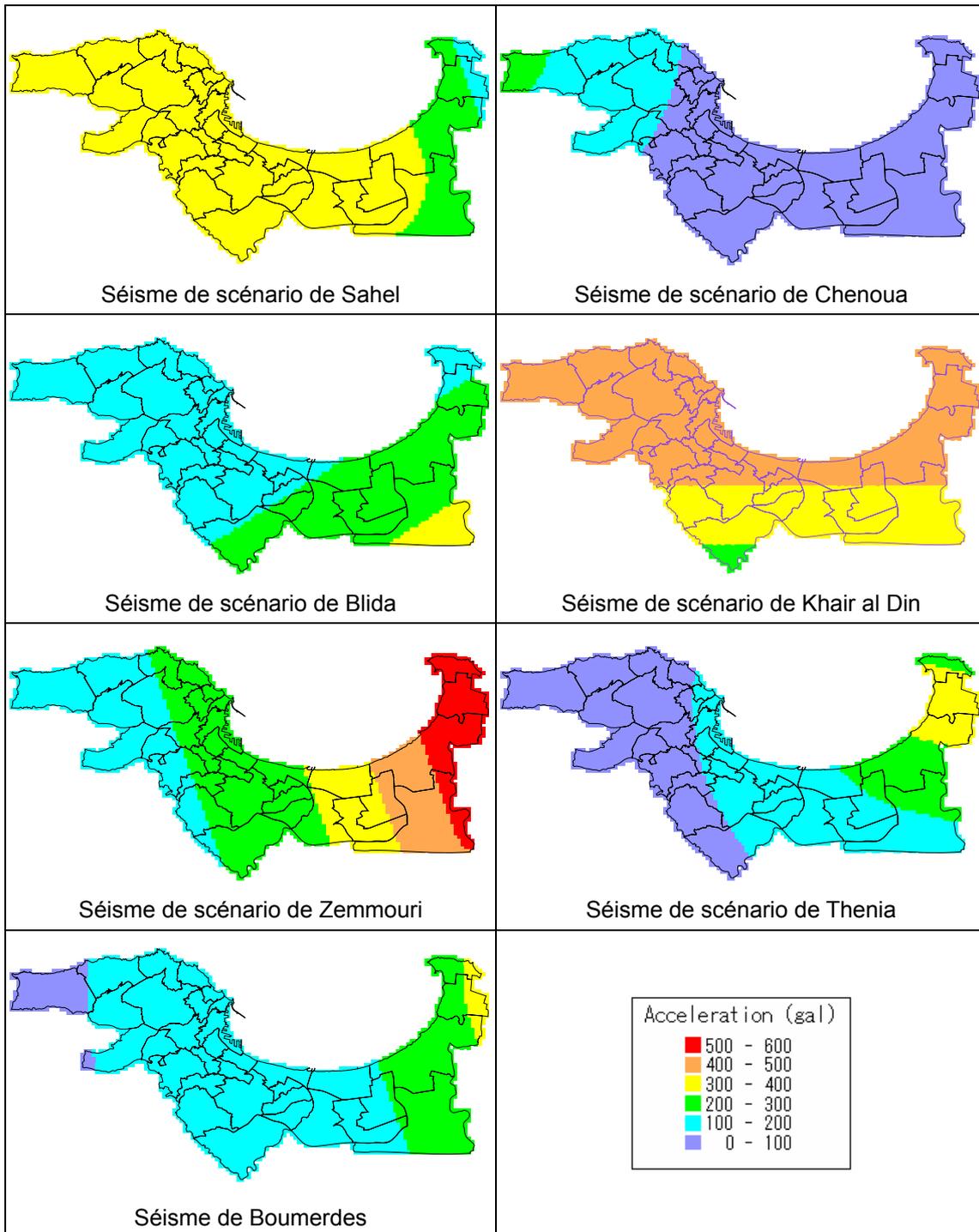


Figure 5-19 Distribution de l'accélération sur le substratum

5-3-2 Analyse de l'amplification sous la terre

Le mouvement sismique à la surface de sol est fortement affecté par les couches surmontant le substratum (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 4013 modèles du sol de maille de 250 m de côté. Le mouvement sismique du sol a été obtenu sous forme de carte de PGA et de distribution des intensités sismiques des six scénarios sismiques et du séisme de Boumerdes de 2003.

L'amplification due au sol au-dessus du substratum sismique a été estimée par le code SHAKE par l'analyse de la réponse unidimensionnelle. Ce code analyse la propagation de l'onde de cisaillement à travers la couche horizontale intermédiaire au-dessus du substratum. Les hypothèses ou conditions décrites ci-après sont adoptés dans la présente analyse.

(1) Mouvement d'entrée

Le mouvement du substratum calculé à la Section 5-3-1 est définie en supposant qu'une couche dépassant 30 m de la surface présente une vitesse plus grande que 750 m/sec. Puisque la formule d'atténuation appliquée d'Ambraseys et al. (2005) a pu évaluer le mouvement du substratum à HESSEIN DEY ($V_s=780$ m/sec) et KOUBA ($V_s=870$ m/sec) lors du séisme de Boumerdes (voir la Section 7-2), le mouvement du substratum déterminé en utilisant Ambraseys et al. (2005) est censé être sur la couche à vitesse égale à 750 m/sec en cas d'Alger. Comme la marne plaisancienne est à vitesse de 630 m/sec et le schiste paléozoïque à vitesse de 1030 m/sec, l'accélération au substratum sismique technologique est calculée en utilisant le rapport empirique de vitesse amplification de Midorikawa et al. (1994) comme suit :

$$\text{Log } R = 1,35 - 0,47 \log V$$

R : facteur d'amplification de la PGA

V : vitesse de l'onde moyenne S jusqu'à 30 m (m/sec) de profond

(2) Propriétés non linéaires des sols

Il est très connu que les couches aux sols meubles montrent des propriétés non linéaires quand le mouvement sismique est suffisamment important. Proportionnellement au niveau de contrainte, la rigidité du sol devient basse alors que l'amortissement s'élève. Cette propriété non linéaire affecte l'amplification du mouvement sismique si la couche de couverture des sols meubles est épaisse. Comme l'indique le Chapitre 3-4, la valeur moyenne N des sols à Alger dépasse 10 et la vitesse de l'onde S est supérieure à 240 m/sec. Les expériences du Japon et des autres pays signalent que le sol d'Alger n'est pas trop meuble et qu'on peut présumer que l'effet non linéaire des sols n'est pas significatif dans l'analyse d'amplification.

Dans la présente étude, 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. La non linéarité du sol « ap », « a3 », « e », « a2 » et « q » a été considérée, alors que les autres sols ont été traités comme matériaux linéaire. La Figure 5-20 montre les propriétés non linéaires de sols adoptées.

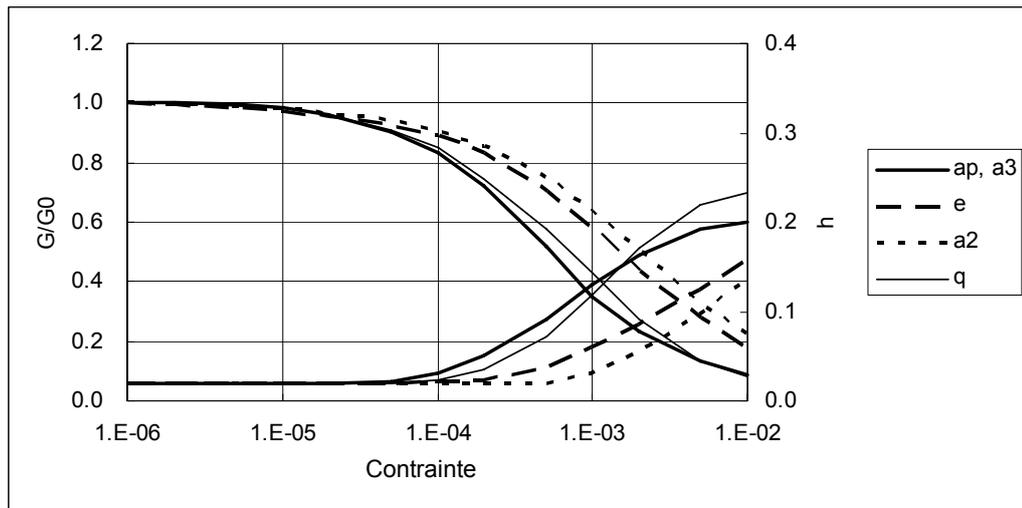


Figure 5-20 Propriétés non linéaires des sols

(3) Ondes sismiques d'entrée

Les caractéristiques d'amplification des couches sous la terre diffèrent tout en dépendant des ondes sismiques d'entrée dans le modèle du sol. Dans la présente étude, les ondes du 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 motion d'entrée dans l'analyse de la réponse.

Comme l'indique la Section 5-3-1, les mouvements de surface du sol des stations de mouvement important à HUSSEIN DEY et à KOUBA ont été réduits dans l'analyse de la réponse avant d'estimer les ondes au substratum. L'amplitude maximum des ondes d'entrée a été étalonnée par le mouvement du substratum à chaque maille. Les composantes horizontales de chaque station ont été utilisées : par conséquent, quatre formes d'onde ont été utilisées pour l'analyse. Les formes des quatre ondes d'entrée sont montrées à la Figure 5-21. La valeur moyenne des PGA calculées correspondant aux quatre ondes d'entrée a été utilisée en tant que résultat définitif.

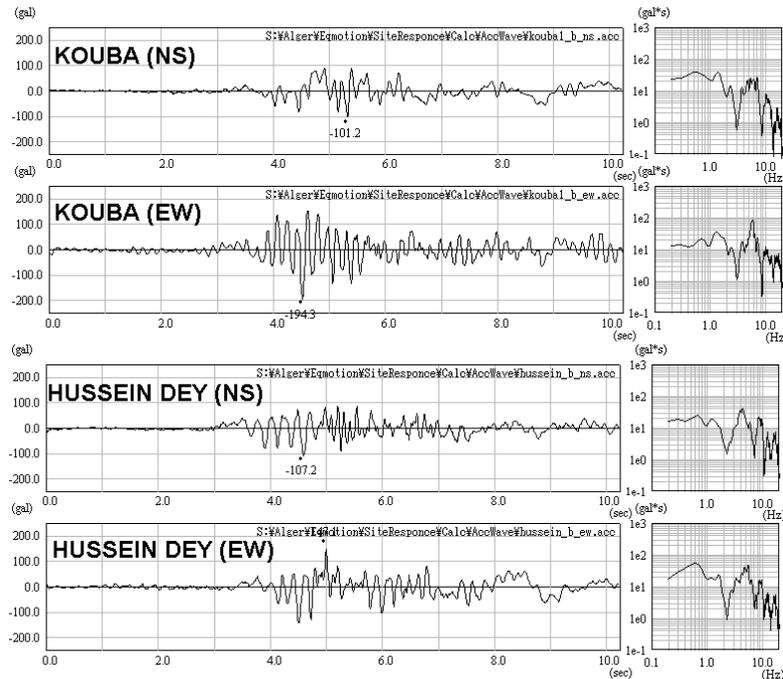


Figure 5-21 Ondes d'entrée utilisées pour l'analyse de la réponse

5-3-3 Élévation du mouvement sismique du sol

La valeur de PGA de la surface de sol à chaque maille est calculée par le mouvement du substratum et l'analyse de la réponse.

(1) Pic d'accélération au sol (PGA)

La distribution du PGA a été estimée par les analyses linéaire et non linéaire. Le résultat de l'analyse linéaire montre des PGA légèrement importants dans la zone de l'est et la différence n'est pourtant pas importante. Le résultat de l'analyse non linéaire (Figure 5-22) est utilisé plus tard comme distribution de la PGA.

- Le séisme de scénario de Khair al Din montre le PGA la plus importante de presque tous les six scénarios sismiques excepté DAR EL BEIDA. La partie contenant AIN BENIAN, BORDJ EL KIFFAN, DAR EL BEIDA et la zone portuaire montre plus de 800 gal. Presque toute la zone d'étude souffre de plus de 300 gal.
- DAR EL BEIDA a vécu le plus grand PGA du séisme de scénario de Zemmouri, pourtant, le PGA de la moitié ouest de la zone d'étude basée sur ce séisme de scénario est moins de 300 gal.
- Le PGA du séisme de scénario du Sahel est plus importante de 300 gal, excepté EL MARSA et BORDJ EL BAHRI. Le modèle de distribution de PGA est similaire ou inférieur en importance à celui du séisme de scénario de Khair al Din.
- Les scénarios sismiques de Blida et de Thenia aboutissent sur plus de 500 gal dans les mailles limitées dans la partie orientale de la zone d'étude et moins de 200 gal dans la partie occidentale.

- L'effet du séisme de scénario de Chenoua est limité à AIN BENIAN avec un PGA allant jusqu'à 500 gal.
- La distribution estimée de PGA du séisme de Boumerdes montre environ 200 gal aux stations d'enregistrements de mouvements importants à HUSSEIN DEY et à KOUBA, comparable avec le PGA observée. Le PGA estimé à la station de DAL EL BEIDA est de l'ordre de 400 gal et il est moins important que le PGA observé d'environ 500 gal. Cette différence peut être imputable aux effets de site locaux ou à la l'appareil d'enregistrement.

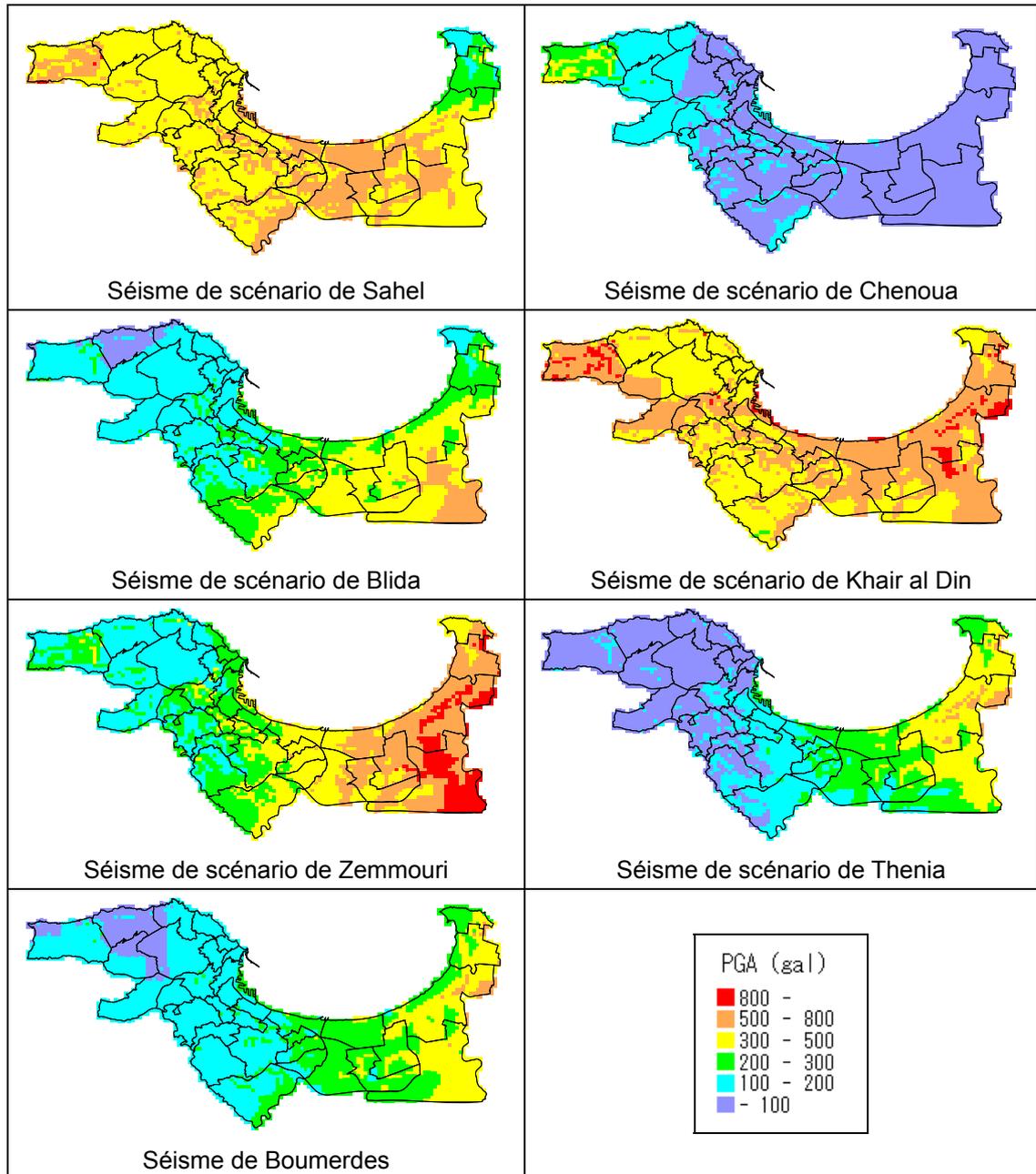


Figure 5-22 Distribution de l'accélération de pic au sol à la surface de sol

(2) Intensité sismique

L'intensité sismique est essentiellement liée à la sensation humaine ou aux dommages de bâtiments et d'équipements. Par conséquent, l'intensité sismique ne peut pas être directement calculée par l'analyse numérique. Bien que l'intensité sismique ne soit pas une valeur physique, elle est un paramètre très important pour l'objectif de la prévention du risque sismique. Ce n'est qu'un paramètre quand les observations instrumentales ne sont pas disponibles.

Nombreux chercheurs ont proposé des rapports empiriques entre l'intensité sismique et les paramètres physiques tels que le PGA ou PGV. Ils montrent une grande variabilité à cause de la différence de bâtiments, d'équipements et de conditions de sols des données utilisées dans les analyses. Dans cette étude, l'intensité sismique en échelle MSK et les enregistrements de mouvements importants du CGS des séismes de Chenoua de 1989, d'Ain Timouchent de 1999 et de Boumerdes de 2003 ont été collectés afin de corriger la nouvelle relation pour l'Algérie. La Figure 5-23 montre le rapport entre la PGA et l'intensité sismique en échelle MSK. La distribution de l'intensité sismique estimée par ce rapport empirique est montrée à la Figure 5-24.

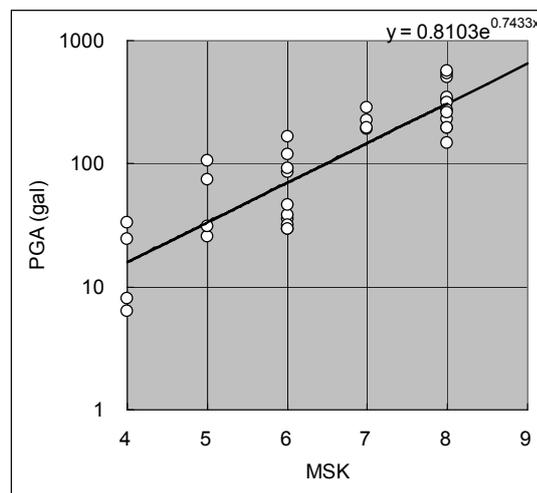


Figure 5-23 Rapport empirique entre la PGA et l'intensité sismique sur l'échelle MSK

- Le séisme de scénario de Khair al Din montre l'intensité sismique la plus grande dans presque toutes les zones des six scénarios sismiques excepté DAR EL BEIDA. La partie concernant AIN BENIAN, BORDJ EL KIFFAN, DAR EL BEIDA et la zone portuaire montre une intensité de 10. Toute la zone d'étude souffre d'une intensité dépassant 8.
- Certaines zones à DAR EL BEIDA ont vécu une intensité de 10 lors du séisme de scénario de Zemmouri qui est pourtant entre 7 et 8 pour la moitié de l'ouest de la zone d'étude.
- L'intensité sismique du séisme de scénario du Sahel est d'entre 8 et 9, excepté EL MARSА et BORGJ EL BAHRI. Le modèle de distribution d'intensité sismique est similaire et inférieur à celle du séisme de scénario de Khair al Din.
- Les scénarios sismiques de Blida et de Thenia occasionnent une intensité de 9 au-dessus des mailles limitées à la partie orientale de la zone d'étude et moins de 7 dans la partie occidentale.

- L'effet important dû au séisme de scénario de Chenoua est limité à AIN BENIAN avec une intensité jusqu'à 8.
- L'intensité sismique estimée du séisme de Boumerdes montre une intensité d'entre 8 et 9 dans la partie orientale de la zone d'étude et 6 et 7 dans la partie occidentale.

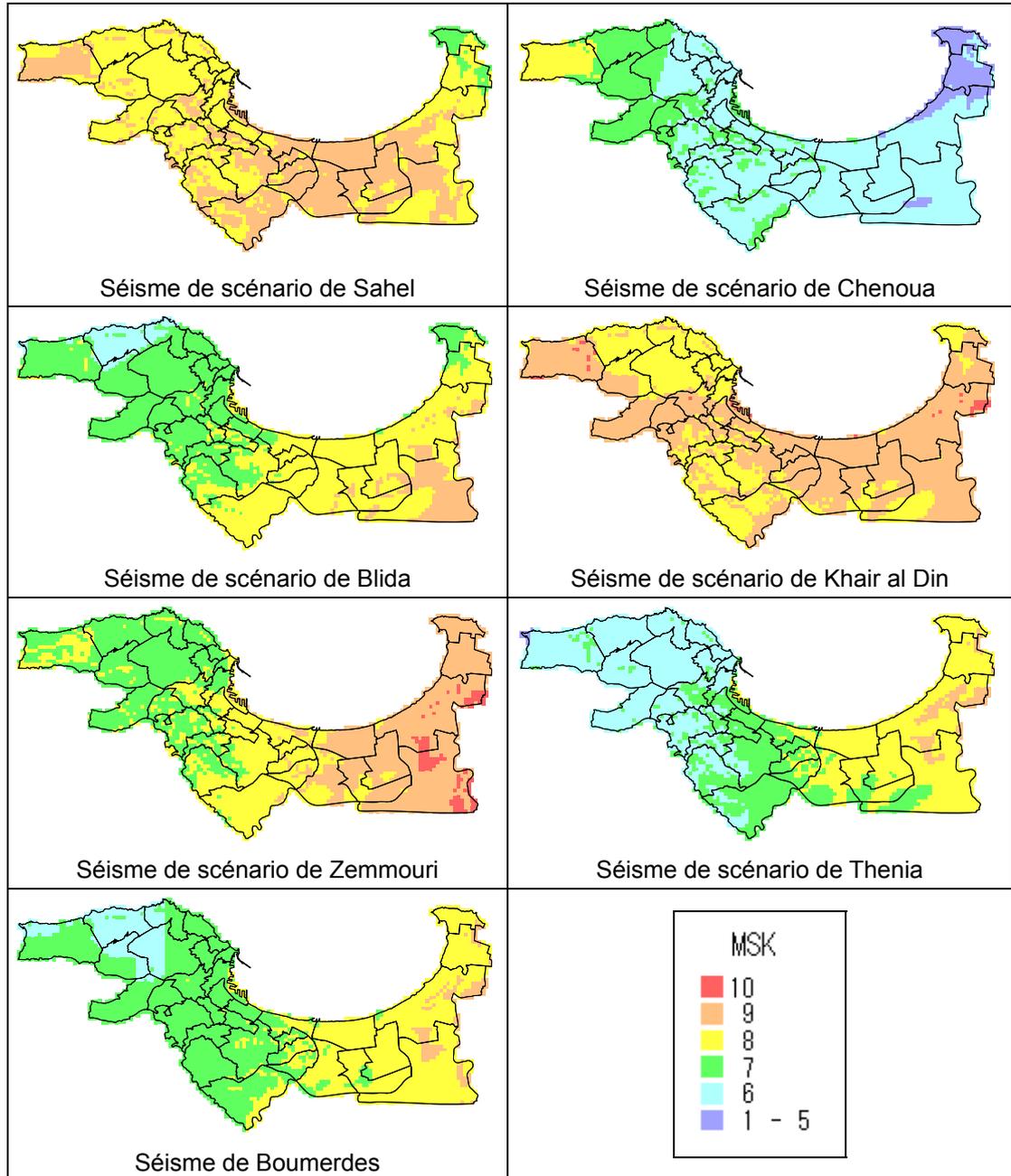


Figure 5-24 Distribution de l'intensité sismique sur l'échelle MSK

5-4 Estimation du potentiel de liquéfaction

La liquéfaction de sol est un phénomène des sables desserrés et liquéfié à cause de leur saturation de l'eau souterraine au moment d'un séisme. La distribution des couches sableuses et la profondeur d'eau souterraine ont été étudiées sur 4013 points de maille avant d'évaluer le potentiel de liquéfaction de chacune. Puisque les sols sableux se trouvent seulement sur la côte et le long des fleuves dans la zone d'étude, l'effet de liquéfaction devrait être moins important par rapport aux effets des autres aléas.

5-4-1 Méthodologie

(1) Procédure d'analyse

Les différentes méthodes ont été proposées pour prévoir le potentiel de liquéfaction. Une méthode ordinaire relève des informations géologiques/géomorphologiques de la zone d'étude ainsi que du rapport entre les unités géologiques/géomorphologiques et les comportements des liquéfactions passées. Si les informations des différentes couches de sol du site étaient disponibles, les analyses numériques plus détaillées pourraient être réalisées. La procédure devrait être déterminée en considération des objectifs de l'analyse et de la disponibilité de données. Dans la présente étude de microzonage, la résistance des sols et le mouvement sismique sont à déterminer de manière uniforme sur toute l'étendue de la zone d'étude. Par conséquent, l'utilisation des méthodes statistiques avec analyse numérique est appropriée.

Les informations suivantes sur les propriétés du sol et le mouvement sismique ont été utilisées dans la présente étude :

- Logs des forages avec les résultats des essais de pénétration standard (SPT)
- Propriétés physiques statistiquement compilées
- Pic d'accélération au sol (PGA) pour les séismes de scénario

En tenant compte desdites informations, 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 d'étude 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.

(2) Méthode de calcul

1) Méthode F_L

Le potentiel de liquéfaction des couches individuelles est analysé par la méthode F_L . Dans la présente étude, le type de séisme qui détermine le paramètre c_w a été adopté en tant que « type 2 » selon le contexte sismotectonique des séismes de scénario.

$$F_L = R/L$$

F_L : facteur de résistance à la liquéfaction

$F_L \leq 1.0$: jugé liquéfié

$F_L > 1.0$: jugé non liquéfié

R: résistance cyclique de cisaillement à la pression de surcharge effective

$$R = c_w \times R_L$$

c_w : coefficient de corrélation de type de séisme

Séisme du type 1 (type aux limites de plaques, grande envergure)

$$c_w = 1.0$$

Séisme du type 2 (type à terre)

$$c_w = 1.0$$

$$(R_L \leq 0.1)$$

$$= 3.3 R_L + 0.67$$

$$(0.1 < R_L \leq 0.4)$$

$$= 2.0$$

$$(0.4 < R_L)$$

R_L : rapport de résistance cyclique obtenu des essais au laboratoire

$$R_L = 0.0882 (N_a/1.7)^{0.5} \quad (N_a < 14)$$

$$= 0.0882(N_a/1.7)^{0.5} + 1.6 \times 10^{-6} (N_a - 14)^{4.5} \quad (14 \leq N_a)$$

Sol sableux

$$N_a = c_1 N + c_2$$

$$c_1 = 1$$

$$(0\% \leq F_c < 10\%),$$

$$= (F_c + 40) / 50$$

$$(10\% \leq F_c < 60\%)$$

$$= F_c / 20 - 1$$

$$(60\% \leq F_c)$$

$$c_2 = 0$$

$$(0\% \leq F_c < 10\%)$$

$$= (F_c - 10) / 18$$

$$(10\% \leq F_c)$$

F_c : Teneur en particules fines (%)

Sol graveleux

$$N_a = \{1 - 0.36 \log_{10}(D_{50}/2.0)\} N_1$$

N: coups comptés SPT

N_a : valeur N corrélée de la granulométrie des particules

N_1 : $170N / (\sigma_v' + 70)$

D_{50} : diamètre des particules de 50% de criblage (mm)

L: contrainte de cisaillement à la pression de surcharge effective

$$L = \alpha / g \times \sigma_v / \sigma_v' \times r_d$$

r_d : facteur de réduction des contraintes

$$r_d = 1.0 - 0.015x$$

x : profondeur au-dessous de la surface de sol (m)

α : accélération de pic au sol (gal)

g: accélération de gravité (= 980 gal)

σ_v : pression de surcharge totale (kN/m^2)

σ_v' : pression de surcharge effective (kN/m^2)

2) Méthode P_L

L'ensemble du potentiel de liquéfaction dans chaque maille a été évalué par la méthode P_L sur la base des résultats de la méthode F_L .

$$P_L = \int_0^{20} F \cdot w(z) dz$$

$15 < P_L$	Potentiel très élevé
$5 < P_L \leq 15$	Potentiel relativement élevé
$0 < P_L \leq 5$	Potentiel relativement faible
$P_L = 0$	Potentiel très faible

$$F = 1.0 - F_L \quad (F_L < 1.0)$$

$$= 0.0 \quad (F_L \geq 1.0)$$

$$w(z) = 10.0 - 0.5z$$

P_L : indice de potentiel de liquéfaction

F_L : facteur de résistance à la liquéfaction

$w(z)$: fonction de poids pour profondeur

z : profondeur au-dessous de la surface de sol (m)

5-4-2 Conditions préalables pour l'analyse

(1) Couches de sol étudiées et leurs propriétés géotechniques

En général, la liquéfaction a lieu dans des dépôts alluviaux sableux desserrés et saturés. Les spécifications conceptuelles japonaises des ponts des grandes routes décrit les conditions suivantes pour une strate qui nécessiterait l'évaluation du potentiel de liquéfaction :

En principe, les dépôts alluviaux sableux et saturés qui satisfassent aux trois conditions suivantes en même temps nécessitent l'analyse du potentiel de liquéfaction :

- 1) Couche sableuse et saturée d'une profondeur de 20 m de la surface de sol réelle avec un niveau d'eau souterraine dans 10 m de la surface de sol.
- 2) Couche de sol avec une teneur en particules fines (F_C) inférieure à 35% ou avec l'indice de plasticité (I_p) moins de 15% même avec un F_C de plus de 35%.
- 3) Couche de sol avec une granulométrie des particules inférieure à 10 mm et avec celle de 10% de tamisât inférieure à 1 mm.

L'évaluation du potentiel de liquéfaction est recommandée pour les dépôts diluviaux avec une faible valeur N ou sans être diagnostiqué.

Les sols qui nécessitent une étude du potentiel de liquéfaction sont essentiellement des dépôts récents. Dans la zone d'étude, « ap », « e », « a3 », « a2 », « q » et « qt » répondent à ces critères.

Les propriétés géotechniques nécessaires pour l'évaluation du potentiel de liquéfaction sont la valeur N , la densité, D_{50} , F_C et I_p . Ces paramètres ont été étudiés à la Section 3-4 et résumés au Tableau 5-6. Au Tableau 5-6, la valeur N est défini en tant que fonction de pression de surcharge au lieu de valeur unique. Plusieurs études rapportent la bonne corrélation entre la valeur N et la pression de surcharge effective. Les sols en Algérie montrent aussi une bonne corrélation telle qu'indiquée à la Figure 5-25.

En considération de la spécification 2) susmentionnée, la liquéfaction ne peut pas avoir lieu si F_c est supérieur à 35% et que I_p est supérieur à 15%, ce qui fait que a2 est exclus de la considération. En conclusion, les sols ciblés sont « ap », « e », « a3 », « q » et « qt » dan la présente étude.

Tableau 5-6 Résumé des propriétés géotechniques pour l'analyse de liquéfaction

Sol	Valeur N ¹⁾	Vitesse Onde S (m/sec)	Densité (g/cm ³)	D ₅₀ (mm)	F _c (%)	I _p
ap	$N=6.7P+15.5$	275	1,80	0,51	16	26
e	$N=6.7P+15.5$ ²⁾	300	1,80	0,24	11	21
a3	$N=14.2P+5.1$	240	1,80	0,20	23	24
a2	-	270	1,74	0,01	84	23
q	$N=61.9P+5.6$	300	1,81	0,42	29	23
qt	$N=23.3P+15.3$	330	1,90	0,15	32	24

1) P: pression de surcharge effective (kgf/cm²)

2) présumé égal à "ap"

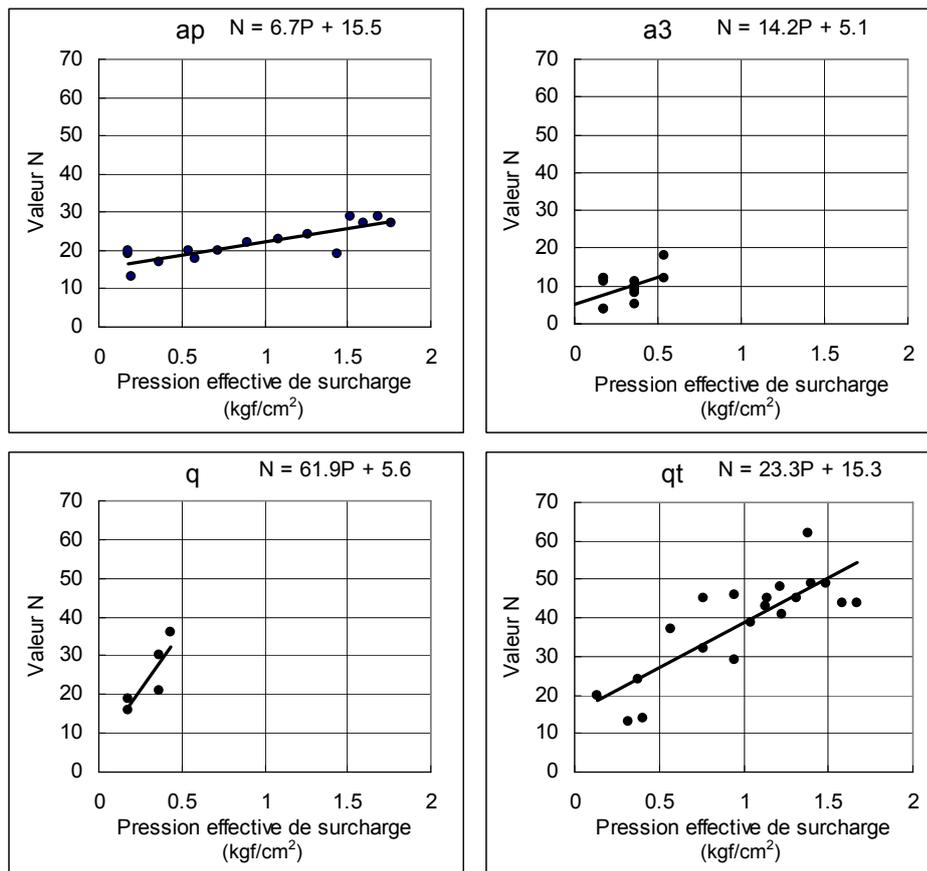


Figure 5-25 Corrélation entre la valeur N et pression de surcharge effective

(2) Niveau d'eau souterraine

Les niveaux d'eau souterraine à chaque forage ont été mesurés pendant l'investigation de sols de la présente étude. Les niveaux d'eau souterraine observés sont résumés à la Section

3-2-2 selon les données fournies par le LNHC et l'ANRH. 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.

En ce qui concerne le jugement de l'ingénieur, les éléments suivants ont été considérés :

- 1) Le niveau d'eau souterraine le plus superficiel est affecté par les précipitations. L'investigation de sols a été effectuée en saison sèche. Il se peut que les niveaux d'eau souterraine puissent être plus élevés que ceux observés en saison des pluies.
- 2) Il se peut qu'il y ait plusieurs types d'eau souterraine parce que plusieurs couches imperméables sont trouvées dans la zone d'étude. Les données d'eau souterraine fournies et observées peuvent être liées aux aquifères profonds, mais il est difficile de l'interpréter précisément.
- 3) Le niveau d'eau souterraine est présumé superficielle près de la ligne côtière ou le long du fleuve. Par conséquent, certains changements ont fait du niveau d'eau souterraine superficiel. La Figure 5-26 montre un exemple de section transversale du niveau d'eau souterraine près d'OUED HARRACH.

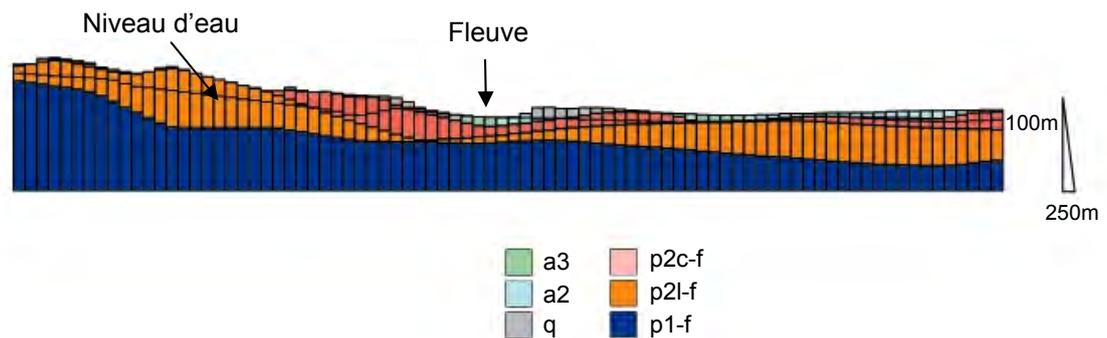


Figure 5-26 Exemple de section transversale du niveau d'eau près d'OUED EL HARRACH

5-4-3 Potentiel de liquéfaction

Le potentiel de liquéfaction a été évalué en utilisant la valeur P_L (Tableau 5-7). Le résultat en est résumé à la Figure 5-27.

Le résultat de l'analyse de la liquéfaction est décrit comme suit :

- La limite d'EL HARRACH et de BOUROUBA le long d'OUED EL HARRACH montre le potentiel élevé (indiqué en couleur rouge à la Figure 5-27) dans les séismes de scénario de Sahel, de Blida et de Khair al Din.
- L'extrémité sud-est de BORDJ EL KIFFAN le long d'OUED GOURER montre le potentiel relativement faible à élevé dans le séisme de scénario de Khair al Din.
- L'extrémité sud-ouest d'AIN BENIAN aux bouches d'OUED BENI MESSOUS montre le potentiel relativement faible à élevé dans les séismes de scénario de Sahel et de Khair al Din.
- La zone portuaire montre le potentiel relativement faible à relativement élevé dans les séismes de scénario de Sahel et de Khair al Din.

Tableau 5-7 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

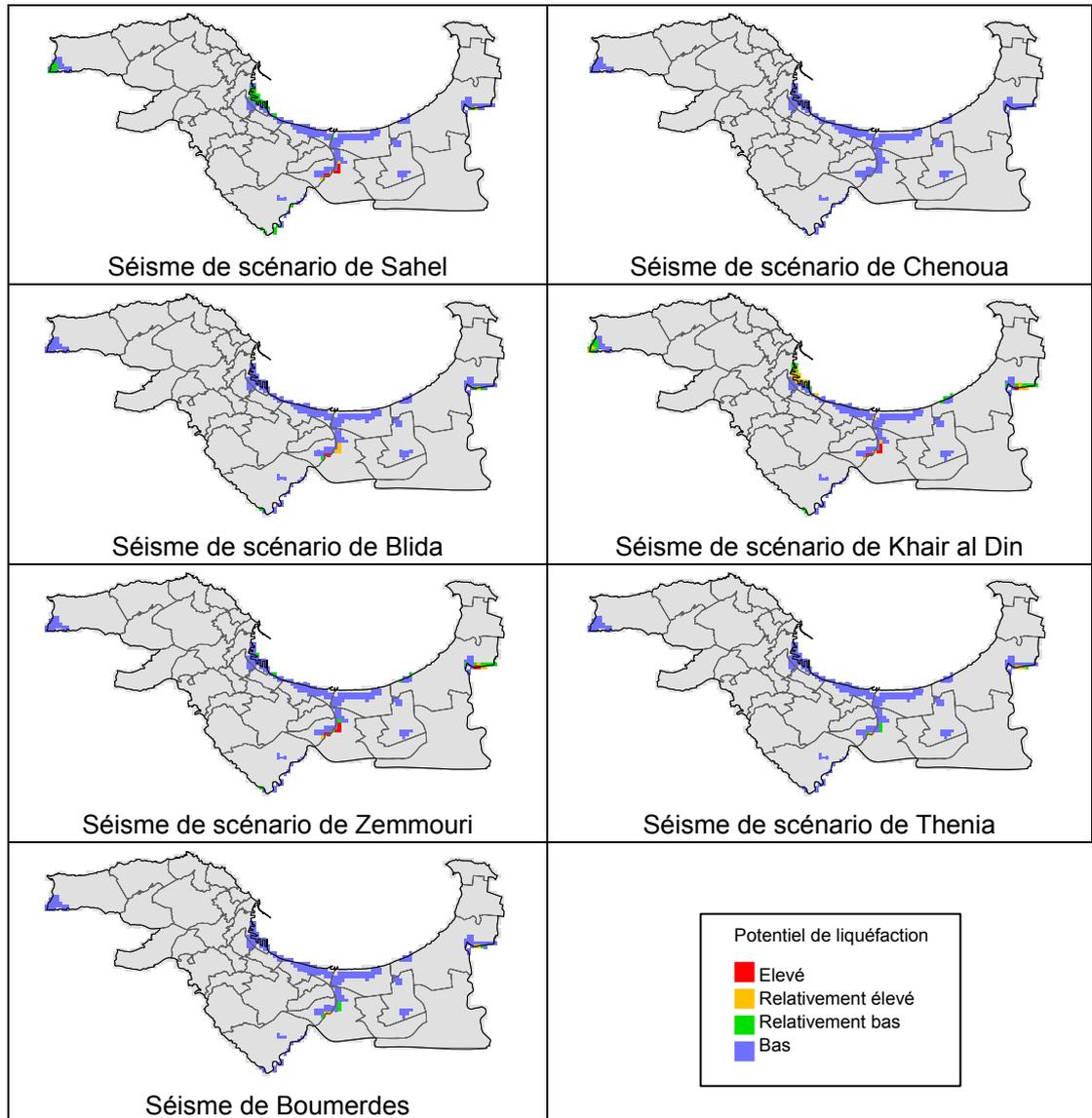


Figure 5-27 Distribution du potentiel de liquéfaction

[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.