



REGION MARTINIQUE



CONSEIL REGIONAL

**Nouvelle méthodologie de réalisation
des microzonages sismiques -
Application au microzonage
du Lamentin (Martinique)**

C. Martin, D. Chassagneux, P. Dominique

**juin 1994
R 38031**

numéro de référence P 9604242000

**BRGM
SERVICE GEOLOGIQUE NATIONAL
Département Utilisation et Protection de l'Espace géologique
Groupe Risques naturels et Géoprospective (SGN/UPE/RNG)
117, avenue de Luminy - BP. 167 - 13276 Marseille Cedex 09 - France
Tél. (33) 91 17 74 74 - Télécopieur : (33) 91 17 74 75**

RESUME

Ce programme constitue un prolongement de l'étude et prévention du risque sismique réalisée de 1986 à 1989 en Martinique, et s'insère dans le cadre du projet scientifique AR47 (Evaluation et prévention des Risques Naturels Majeurs en Martinique), qui a bénéficié du soutien financier du Conseil Régional de la Martinique.

La réalisation d'un microzonage sismique sur une partie de la commune de Fort de France, effectuée lors du programme antérieur, avait permis de souligner plusieurs difficultés inhérentes aux méthodes conventionnelles mises en oeuvre, en particulier liées à la gestion d'une masse très importante de données géologiques et géotechniques, à la génération d'un modèle géotechnique aussi objectif que possible, et à la cartographie manuelle des aléas, laissant ainsi une part importante à la subjectivité de l'interprétation des données de base.

Il paraissait donc important de mettre en place un outil cartographique informatisé d'évaluation de l'aléa sismique local.

Les outils modernes de gestion de l'information géographique, que ce soit les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG), les logiciels de dessin assisté par ordinateur (DAO), ou les systèmes de gestion de bases de données relationnels (SGBD-R) permettent désormais de structurer et d'exploiter les informations de base, et d'avoir accès de façon sélective ou globale à toute l'information disponible sur un secteur donné.

L'objectif du programme a donc visé l'amélioration sous SIG d'une méthodologie d'évaluation et cartographie de l'aléa sismique local, de manière à réduire la part de subjectivité propre aux méthodes traditionnelles d'identification des zones présentant une réponse sismique homogène, à homogénéiser et standardiser les processus et à produire des cartes de synthèse actualisables, pouvant être confrontées plus aisément aux documents d'urbanisme ou aux cartes de vulnérabilité.

Les résultats sont présentés, dans la première partie du rapport, sous forme de guide méthodologique, présentant les techniques et outils développés, et dans la seconde, sous celle d'une application à une zone test : la plaine du Lamentin en Martinique. Ils devraient trouver une large application, dans le cadre de la réalisation de futurs plans d'exposition aux risques et plans de prévention des risques.

TABLE DES MATIERES

Pages

RESUME

1. INTRODUCTION	1
PARTIE I - DEVELOPPEMENTS METHODOLOGIQUES	3
2. OBJECTIFS GENERAUX	4
2.1. Aléa sismique local	4
2.2. Objectifs methodologiques	6
3. RAPPELS CONCERNANT L'ALEA SISMIQUE REGIONAL	7
3.1. Synthèse sismotectonique	7
3.1.1. Cadre géodynamique de l'arc des petites Antilles	7
3.1.2. Cadre structural et néotectonique	10
3.2. Sismicité	10
3.3. Identification et caractérisation des sources sismiques	13
3.4. Mouvements sismiques de référence au rocher	15
4. METHODOLOGIE DEVELOPPEE	21
4.1. Principes généraux	21
4.2. Inventaire, validation et saisie des données de base	22
4.3. Structuration informatisée des données	23
4.4. Modèle géotechnique numérique 3D	24
4.4.1. Identification d'un nombre fini d'unités ou niveaux géotechniques	24
4.4.2. Saisie des données de base interprétées	24
4.4.3. Réalisation de coupes géotechniques : méthode des profils	27
4.4.4. Construction du modèle géotechnique 3D	27
4.5. Exploitation du modèle : évaluation et cartographie de l'aléa sismique local	28
4.6. Méthodes retenues pour la quantification des effets de site	28
4.6.1. Étude de niveau A : évaluation de l'aléa sismique pour l'application des recommandations AFPS 90 et des règles parasismiques PS92	29
4.6.2. Étude de niveau B : méthode simplifiée et cartographie de To et Ao	34
4.6.3. Étude de niveau C : méthodes plus complexes : instrumentation et modélisation numérique	37
5. DEVELOPPEMENTS INFORMATIQUES	41
5.1. Rappel des Objectifs	41
5.2. Configuration matérielle et logiciels nécessaires	41
5.3. Installation des logiciels	42
5.4. Structure et construction du modèle géotechnique	42
5.4.1. Création du MNT topographique à partir d'un fond de l'IGN	44
5.4.1.1. Digitalisation sous intergraph	44
5.4.1.2. Procédure	45
5.4.1.3. Interpolation des données	47
5.4.1.3.1. Méthode d'interpolation par courbure minimale	48

5.4.1.3.2. Interpolation des données via INTERPO	48
5.4.2. Construction du modèle géotechnique 3D	49
5.4.2.1. Acquisition de données supplémentaires: méthode des profils	50
5.4.2.2. Interpolation des fichiers.....	54
5.4.2.3. Vérification qualitative du MNT géotechnique	54
5.4.3. Outils informatiques particuliers.....	56
5.4.3.1. Modification partielle d'une grille : mise à jour et correction de la géologie de surface	56
5.4.3.2. Constitution des fichiers .BLN à partir des fichiers .DGN :	57
5.4.3.3. Réalisation automatique de coupes géotechniques entre deux mailles du modèle	57
5.4.3.4. Visualisation des MNT	58
5.4.3.5. Réalisation de blocs diagrammes	59
PARTIE II - APPLICATION	61
6. APPLICATION AU MICROZONAGE DU LAMENTIN (MARTINIQUE).....	62
6.1. Construction du modèle géotechnique 3D	62
6.1.1. Contextes géologique et hydrogéologique de la zone d'étude.....	62
6.1.2. Données de base et limites associées	64
6.1.3. Structuration des données	65
6.1.4. Unités géomécaniques retenues	67
6.1.5. Réalisation des coupes géotechniques (Profils) et vérifications associées	69
6.1.6. Détermination des colonnes de sols et notions de représentativité.....	73
6.1.7. Améliorations méthodologiques envisageables	75
6.2. Evaluation et cartographie de la susceptibilité à la liquéfaction.....	75
6.2.1. Identification des sols liquéfiables	75
6.2.2. Données de base et limites associées	75
6.2.3. Méthodologie développée	76
6.2.4. Conclusion.....	77
6.3. Evaluation et cartographie des effets de site.....	80
6.3.1. Microzonage sismique de niveau A	80
6.3.2. Microzonage sismique de niveau B.....	80
6.3.3. Microzonage de niveau C - Calcul des spectres de réponse élastique tenant compte du site.....	83
6.3.3.1. Caractéristiques des sources sismiques retenues	83
6.3.3.2. Mouvement sismique de référence au rocher.....	84
6.3.3.3. Méthodes numériques d'évaluation des effets de site	84
6.3.3.3.1. Programme de calcul SHAKE.....	87
6.3.3.3.2. Approche paramétrique retenue pour tenir compte de la variabilité des données géomécaniques.....	91
6.3.3.4. Calcul effectif des spectres	93
6.3.3.4.1. Sélection d'un nombre fini de colonnes de sol - Rappel	93
6.3.3.4.2. Tests sur l'influence des principaux paramètres.....	93
6.3.3.4.3. Spectres finalement retenus.....	94
6.3.4. Cartographie des effets de site : niveau C.....	105
7. CONCLUSION	107

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Epicentres et magnitudes des séismes historiques dans l'arc des Antilles françaises.....	8
Figure 2 - Structure et subduction de la croûte océanique atlantique et de ses rides asismiques sous la plaque caraïbes (d'après Bouysse et al., 1988)	9
Figure 3 - Représentation schématique des sources sismiques retenues pour l'évaluation de l'aléa régional en Guadeloupe.....	12
Figure 4 - Représentation schématique des sources sismiques retenues pour l'évaluation de l'aléa régional en Martinique.....	12
Figure 5A - Zonage sismique régional obtenu suivant une approche déterministe	16
Figure 5B - Spectres de réponses élastiques proposés pour l'application des règles parasismiques de construction des ouvrages courants (classe B).....	16
Figure 6 - Méthodologie	19
Figure 7 - Microzonage sismique - Méthodologie SIG.....	20
Figure 8 - Exemple de table de données géotechniques référencées	26
Figure 9 - Application des règles parasismiques - Classification des bâtiments	31
Figure 10 - Paramètres d'identification des sols (Recommandations AFPS 90)	33
Figure 11 - Spectres de réponse élastiques des sites So, S1, S2 et S3 (Recommandations AFPS 90)	35
Figure 12 - Détermination du coefficient d'amplification topographique	35
Figure 13 - Représentation schématique du calcul d'une fonction de transfert	38
Figure 14 - Réglementation de la fonction de transfert d'un site monocouche.....	39
Figure 15 - Modèle numérique topographique	43
Figure 16 - Modèle numérique géotechnique	43
Figure 17 - Procédure de création d'un MNT topographique	46
Figure 18 - Principe de l'interpolation	47
Figure 19 - Modèle interpolé - Digitalisation initiale	48
Figure 20 - Procédure de création du modèle géotechnique 3D	51
Figure 21 - Génération des profils	50
Figure 22 - Coupe géotechnique	52

Figure 23 -Coupe géotechnique référencée	52
Figure 24 -Localisation de la zone d'étude et des données ponctuelles de sondages	63
Figure 25 -Localisation des profils	70
Figure 26 -Exemple de coupe géotechnique interprétée	71
Figure 27 -Carte de susceptibilité à la liquéfaction	78
Figure 28 -Carte des sondages présentant des sols potentiellement liquéfiables	79
Figure 29 -Carte des sites PS 92	81
Figure 30 -Carte des fréquences propres	82
Figure 31 -Spectre de réponse élastique horizontal au rocher horizontal affleurant - Séisme lointain - Amortissement 5%	85
Figure 32 -Spectre de réponse élastique horizontal au rocher horizontal affleurant - Coordonnées quadrilogarithmiques - Séisme lointain - Amortissement : 5%	86
Figure 33 -Exemple d'accélérogramme synthétique au rocher horizontal affleurant représentatif du spectre de réponse élastique au rocher horizontal affleurant de la source lointaine.....	88
Figure 34 -Propagation verticale des ondes de cisaillement à travers un système monodimensionnel	89
Figure 35 -Module de cisaillement et coefficient d'amortissement en fonction du taux de déformation (d'après Seed H.B. et Idriss I.M., 1970)	92
Figure 36 -Spectre de réponse élastique de la zone R2 comparé au spectre de référence au rocher - Amortissement 5%.....	95
Figure 37 -Spectre de réponse élastique de la zone R3 comparé au spectre de référence au rocher - Amortissement 5%.....	97
Figure 38 -Spectre de réponse élastique de la zone R4 comparé au spectre de référence au rocher - Amortissement 5%.....	99
Figure 39 -Spectre de réponse élastique de la zone R5 comparé au spectre de référence au rocher - Amortissement 5%.....	101
Figure 40 -Spectre de réponse élastique de la zone R6 comparé au spectre de référence au rocher - Amortissement 5%.....	103
Figure 41 -Carte de réponse sismique des sols	106

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Caractéristiques des sources sismiques retenues pour l'évaluation de l'aléa sismique en Guadeloupe (Basse Terre, Grande Terre, La Désirade, Marie-Galante et les Saintes).....	13
Tableau 2 - Caractéristiques des sources sismiques retenues pour l'évaluation de l'aléa sismique en Martinique	14
Tableau 3 - Extrait du tableau des données géoréférencées	66
Tableau 4 - Synthèse des caractéristiques géotechniques interprétées.....	68
Tableau 5 - Extrait du fichier d'entrée de données référencées, utilisable pour l'interpolation du MNT de la couche As	72
Tableau 6 - Statistiques sur l'épaisseur des couches géotechniques	74
Tableau 7 - Zone R2 - Valeurs en accélération, vitesse et déplacement en chaque noeud du spectre	96
Tableau 8 - Zone R3 - Valeurs en accélération, vitesse et déplacement en chaque noeud du spectre	98
Tableau 9 - Zone R4 - Valeurs en accélération, vitesse et déplacement en chaque noeud du spectre	100
Tableau 10 - Zone R5 - Valeurs en accélération, vitesse et déplacement en chaque noeud du spectre	102
Tableau 11 - Zone R6 - Valeurs en accélération, vitesse et déplacement en chaque noeud du spectre.....	104

1. INTRODUCTION

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet scientifique AR47 (Evaluation et Prévention des Risques Naturels Majeurs en Martinique) et a bénéficié du soutien financier du Conseil Régional de la Martinique.

Elle constitue une suite logique au programme de réalisation des microzonages sismiques mis en oeuvre dans le cadre du programme d'étude qui s'est échelonné de 1986 à 1989 portant sur la prévention du risque sismique aux Petites Antilles.

Lors de ce programme, la réalisation d'un microzonage sismique sur une partie de l'agglomération de Fort de France a permis de **souligner certaines difficultés et problèmes inhérents à la méthode mise en oeuvre**, liés en particulier:

- aux difficultés de gestion d'une masse parfois considérable de données géologiques et géotechniques ;
- aux difficultés à identifier, sur une zone de plusieurs km², les zones **présentant un comportement géomécanique homogène**, uniquement à partir d'une **interprétation et d'une interpolation "manuelles"** des données de sondage, laissant ainsi une part importante à la **subjectivité de l'interprétation** ;
- à la lourdeur de la **cartographie manuelle des résultats** ;
- à la difficulté, sans un investissement temps considérable, d'intégrer, suivant les méthodes conventionnelles, des connaissances nouvelles (reconnaisances géotechniques complémentaires par exemple) et de modifier les cartographies préexistantes rendant illusoire toute tentative de **cartographie évolutive**.

Devant la nécessité de disposer de méthodes et outils plus efficaces, concernant aussi bien la gestion et le traitement des données, que la cartographie des résultats obtenus, un effort important a été consacré au **développement d'une méthodologie permettant de gérer et traiter des données de façon la plus informatisée possible**, de manière à **réduire la part de subjectivité dans l'identification des zones présentant une réponse sismique homogène**, et à **produire des cartes de synthèse**, pouvant être à l'avenir confrontées plus aisément aux documents d'urbanisme, et aux cartes de vulnérabilité.

Tout en bénéficiant des progrès réalisés ces dernières en matière de développement et d'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG), la méthodologie proposée repose également sur une optimisation des outils informatiques nécessaires aux traitements. En particulier, les différentes étapes peuvent aussi bien être réalisées à l'aide de SIG puissants (Arc/Info, Synergis), mais coûteux et nécessitant une formation spécifique, qu'à l'aide de logiciels fonctionnant sur PC.

La méthodologie ainsi développée, bien que nécessitant encore des améliorations, est désormais opérationnelle et disponible pour un large éventail d'utilisateurs potentiels. Elle pourrait être mise en oeuvre dans le cadre de la réalisation de futurs microzonages sismiques ou de plans d'exposition aux risques.

Dans ce rapport, les résultats sont présentés dans la première partie sous forme de guide méthodologique présentant les techniques et les outils développés et dans la seconde partie sous forme de cartes et résultats obtenus pour la zone étudiée : la plaine du Lamentin en Martinique.

Nous tenons particulièrement à souligner le **caractère méthodologique de cette étude**, qui visait, dans le cadre d'un programme de recherche, plus la mise au point et la validation de procédures, que la production de cartes utilisables à des fins réglementaires. Aussi les documents et cartes présentés dans ce rapport, ne sauraient être utilisés à de telles fins, sans l'avis des experts les ayant produits.

PARTIE I

DEVELOPPEMENTS METHODOLOGIQUES

2. OBJECTIFS GENERAUX

Les microzonages sismiques, constituent la partie technique préalable à l'élaboration des Plans d'Exposition au Risque Sismique, qui représentent, en quelque sorte, une transposition du "constat technique", en prescriptions réglementaires opposables aux tiers.

Aussi, les méthodes d'évaluation et de cartographie de l'aléa sismique local, doivent-elles répondre à l'attente des maîtres d'ouvrage qui ont besoin de documents synthétiques leur permettant d'analyser rapidement les problèmes que peuvent poser la prise en compte de cet aléa, en particulier pour ce qui concerne l'aménagement à long terme.

Dans cette optique, il devenait nécessaire de proposer, pour les adopter plus largement à l'avenir, des méthodes plus rapides et efficaces, testées et validées, conduisant à une évaluation et à une cartographie conformes à la réglementation existante.

C'est la raison pour laquelle, la méthode proposée, et les règles de calcul adoptées dans cette étude, **se réfèrent volontairement aux textes réglementaires suivants :**

- l'article 41 de la loi n° 87-565 du 22 juillet 1987, relative à la prévention des risques majeurs, qui pose le principe de l'application obligatoire des règles de constructions parasismiques aux ouvrages et installations à réaliser dans les régions sujettes à séisme ;
- le décret 91-461 du 14 mai 1991, qui en fixe les modalités d'applications en définissant les catégories de bâtiments auxquelles ces dispositions sont applicables et en répartissant les différents cantons du territoire en cinq zones de sismicité ;
- l'arrêté du 16 juillet 1992 fixant les règles parasismiques applicables aux installations soumises à la législation sur les ouvrages courants ;

2.1. ALEA SISMIQUE LOCAL

A l'échelle locale du 1: 5000 ou du 1: 10000, l'évaluation de l'aléa sismique, repose sur la réalisation d'un microzonage sismique qui vise à cartographier les différentes composantes de l'aléa sismique local, qui concernent:

- **les structures tectoniques actives** (failles sismogènes) et la prise en compte des déformations tectoniques de surface qui peuvent leur être associées ;
- la modification du signal sismique par les conditions géomorphologiques locales, soit la **quantification et la cartographie des effets de site** ;
- **les phénomènes induits: liquéfaction, tassements, mouvements de terrain.**

Les méthodes à mettre en oeuvre pour aboutir à cette évaluation peuvent être plus ou moins élaborées, suivant le degré de précision recherché et l'on retient classiquement trois degrés de finesse: A, B, C en allant du plus rudimentaire au plus élaboré (AFPS, 1993):

- **Pour le niveau A, le moins développé, la prise en compte des effets de site et effets induits se limite à la réglementation existante ;**
- Pour le niveau B, intermédiaire, ne sont mises en oeuvre que des **méthodes simplifiées ;**
- Pour le niveau C, le plus détaillé, des **techniques de calcul plus élaborées permettent de quantifier les effets locaux.**

La plupart des méthodes d'évaluation de l'aléa sismique local, permettant de quantifier les effets de site et effets induits, bien que sans cesse améliorées, sont actuellement connues, et ont fait l'objet de deux guides méthodologiques (DRM: guide méthodologique pour la réalisation des études techniques dans le cadre des PER, 1989; AFPS: guide méthodologique pour la réalisation d'études de microzonage, 1993), dont on s'inspire ici.

Toutes nécessitent que soient connues, avec le degré de précision compatible avec le niveau A, B ou C de l'étude, **la structure géologique du site, et les caractéristiques géotechniques et dynamiques des différentes formations qui la composent, autrement dit, que soit au préalable élaboré un modèle géologique et géotechnique 3D du sous-sol.**

Or, s'il est relativement aisé, sur un site ponctuel, de mettre en oeuvre un minimum de reconnaissances géotechniques et géophysiques pour connaître ces propriétés, le problème est beaucoup plus ardu, à l'échelle de plusieurs km², car les données disponibles ne permettent pas toujours d'avoir une connaissance globale du site.

Se pose notamment, le problème de la **régionalisation de l'information, à partir de données ponctuelles.**

Sans considération des coûts, l'approche idéale consiste à réaliser une campagne de reconnaissances comprenant des sondages géotechniques et essais géophysiques, en des sites judicieusement choisis et suffisamment représentatifs du lieu. Malheureusement, le coût élevé de tels essais, rend généralement illusoire la réalisation de telles campagnes.

En pratique, ce sont donc les données existantes, et tout particulièrement **leur exhaustivité et leur représentativité à l'échelle de la zone d'étude, qui contrôlent la qualité du modèle géotechnique, et celle de l'exploitation que l'on peut en faire.**

Dans le cadre de cette étude, si aucune reconnaissance n'a pu être menée, les données existantes étaient suffisamment nombreuses (elles proviennent soit de la banque de données du sous-sol du BRGM, soit d'études géotechniques menées par d'autres bureaux d'études, qui nous ont aimablement donné accès à leurs données), pour espérer progresser de manière significative sur les méthodes d'évaluation de l'aléa local.

2.2. OBJECTIFS METHODOLOGIQUES

La méthodologie développée vise:

- la **modélisation numérique géotechnique tridimensionnelle du sous sol** (topographie, géométrie : éléments structuraux et interfaces géologiques, caractéristiques géomécaniques, niveau de la nappe) ;
- à partir de ce modèle, la mise au point d'une **méthode informatisée d'identification des zones présentant une réponse sismique homogène, de quantification de l'aléa correspondant suivant les méthodes de niveau A, B ou C recommandées par l'A.F.P.S., et de cartographie de ces zones.**

En ce sens, un effort important a donc été consacré à l'acquisition, la validation et la structuration des données thématiques sous **système d'information géographique, et au développement informatique d'algorithmes permettant d'exploiter les données du modèle 3D** relatives à chaque niveau d'information, suivant les différentes méthodes envisageables.

Nous nous sommes **limités à la prise en compte des effets de site et effets induits**, en laissant volontairement de côté la reconnaissance et la cartographie des failles sismogènes, qui avaient en revanche fait l'objet des microzonages précédents (Godefroy et al., 1990 et 1991). Les développements méthodologiques auraient en effet nécessité, pour progresser de manière significative, la mise en oeuvre de méthodes d'investigation lourdes et coûteuses (géophysique, prospection électrique, sondages, tranchées) incompatibles avec le budget de la présente étude.

3. RAPPELS CONCERNANT L'ALEA SISMIQUE REGIONAL

Au cours des trois derniers siècles, les îles de la Guadeloupe et de la Martinique ont été sévèrement touchées par des tremblements de terre (1839, 1843, 1851, 1897, 1946).

Le séisme du 16 mars 1985 ($M_s = 6.0$, épicentre situé au nord de l'île de Montserrat) a été moyennement ressenti sur le territoire de la Guadeloupe, en particulier à Pointe-à-Pitre, la ville principale ; mais il est venu rappeler que des séismes majeurs pouvaient toucher chacune des îles des Petites Antilles. En particulier, le séisme du 8 février 1843 (intensité IX MSK) a été responsable de plus de 1 500 morts à Pointe-à-Pitre, et celui du 11 janvier 1839 a atteint l'intensité VIII-IX à Fort-de-France (Martinique) (figure 1).

Les effets d'un gros séisme sur ces îles peuvent par ailleurs être fortement accrus à cause du contexte naturel (propice aux mouvements de terrain, et la liquéfaction des sols et de l'amplification du signal sismique) et de la grande vulnérabilité des habitations. Dans le cadre d'un programme global de mitigation du risque sismique, une étude générale concernant l'évaluation de l'aléa sismique a été engagée par les pouvoirs publics, de 1986 à 1990 (GODEFROY et col., 1990 ; GODEFROY et col., 1991). Nous en présentons ici les principaux résultats.

3.1. SYNTHESE SISMOTECTONIQUE

3.1.1. Cadre géodynamique de l'arc des petites Antilles

L'Est Caraïbes auquel appartiennent les 2 îles, correspond à une marge active, liée à la subduction de la plaque Amérique sous la plaque caraïbe, avec un taux de convergence moyen estimé à 2 cm/an, une direction WNW-ESE et un plan dont le plongement varie selon les secteurs (voisin de 50° au niveau de la Guadeloupe et de 60° au niveau de la Martinique (figure 2). Ces mouvements de plaques sont responsables d'une activité tectonique, volcanique et sismique.

Les caractéristiques de cette subduction (faible vitesse de convergence entre plaques, âge élevé de la croûte subductée) lui confère un type intermédiaire, entre le "type Chili" (fort couplage) et le "type Marianne" (découplage). Elles semblent y justifier un niveau d'activité sismique relativement modéré par rapport à d'autres zones de subduction. Les forts séismes de subduction sont rares, et de magnitude maximale de l'ordre de 7.5 à 8.0.

La subduction des rides asismiques de Baracuda, Tiburon et Sainte-Lucie, appartenant à la plaque Amérique, sous la plaque caraïbes, paraît contrôler, dans une certaine mesure, l'activité de l'arc ; elle peut en particulier provoquer de forts séismes ($M = 7.5$) au sein de la plaque caraïbe, par réactivation de failles normales majeures.

Figure 1
Epicentres et magnitudes des séismes historiques dans l'arc des Antilles françaises

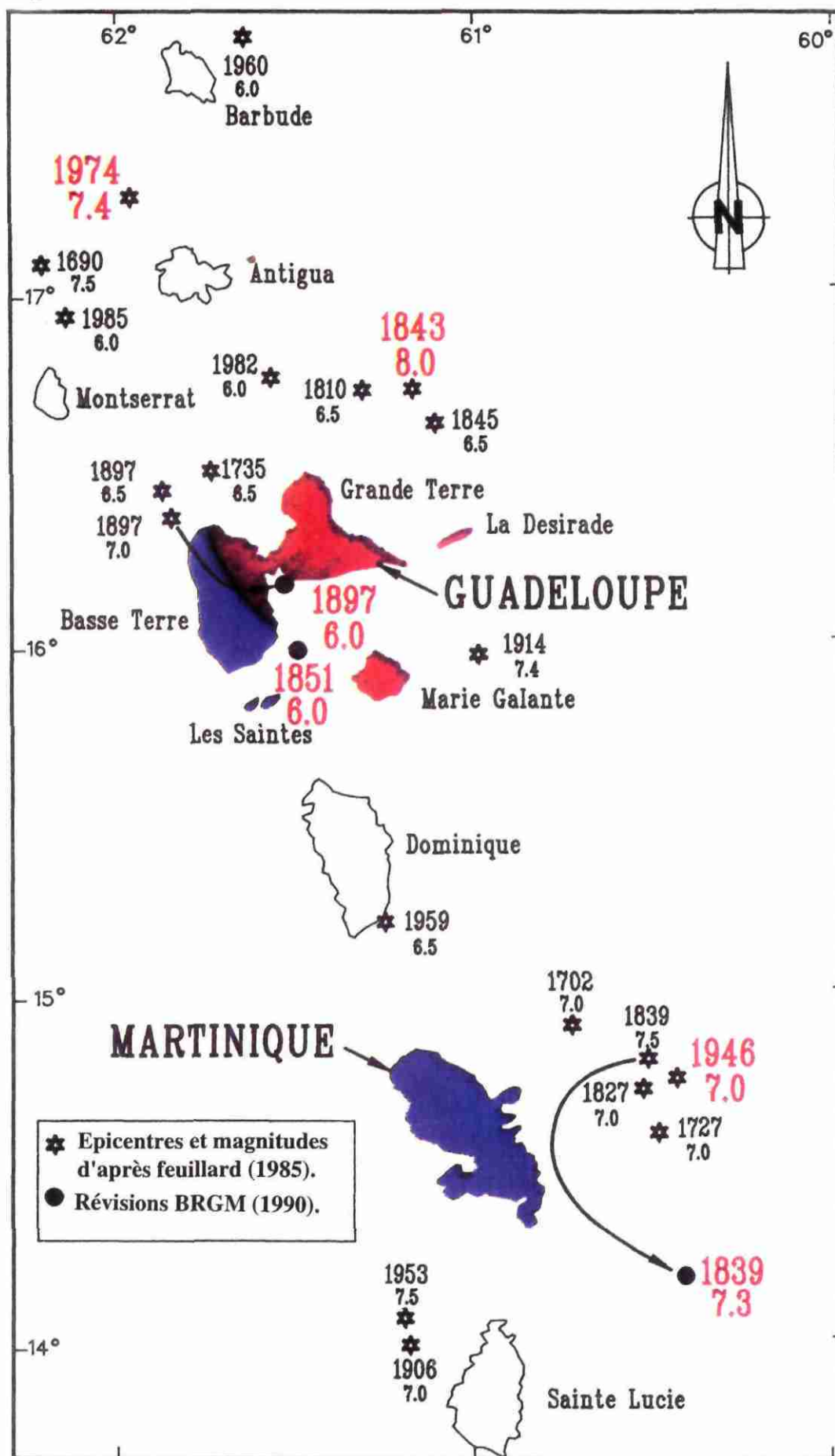
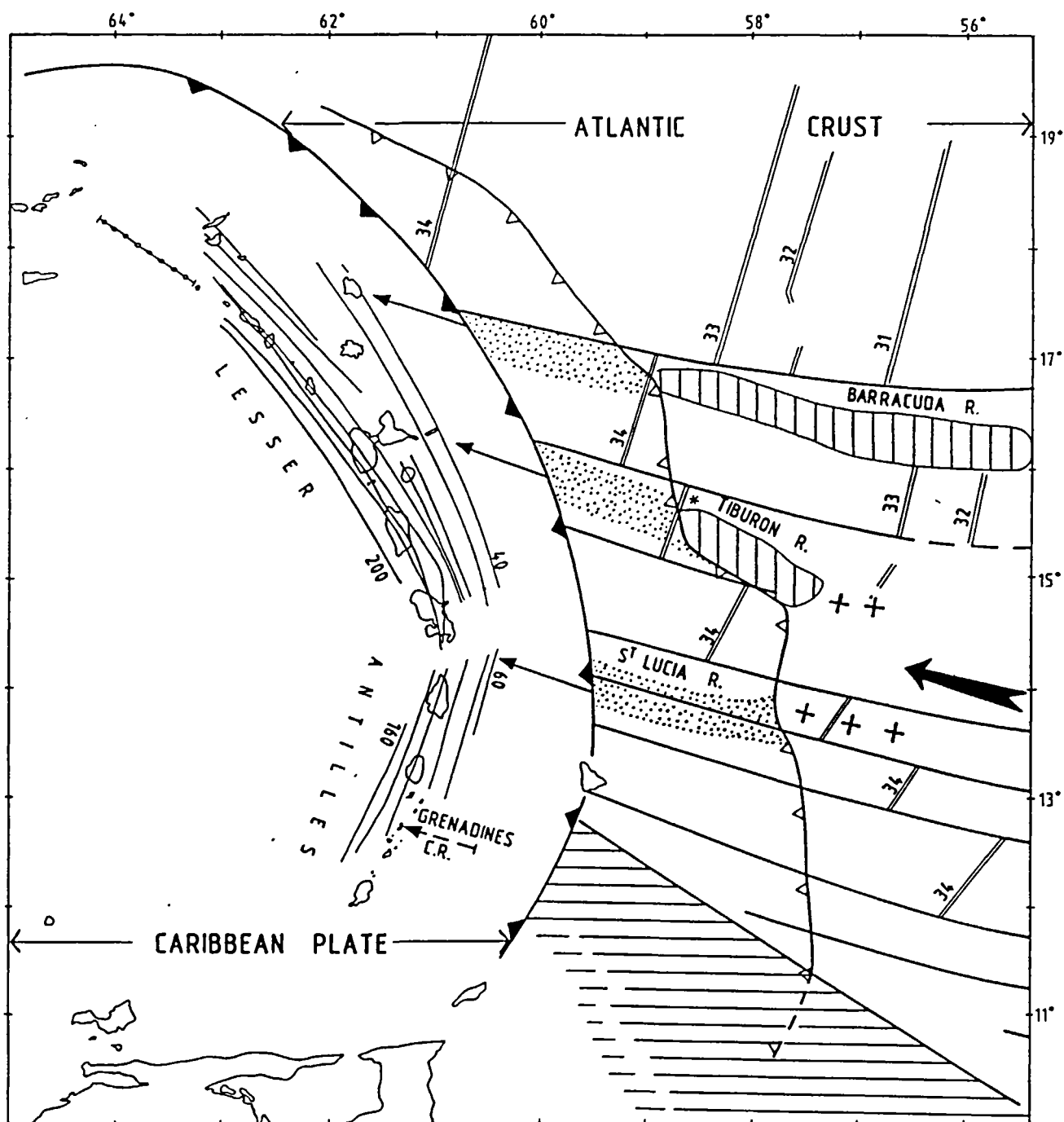


Figure 2
Structure et subduction de la croûte océanique atlantique et de ses rides asismiques sous la plaque caraïbes (d'après Bouysse et al., 1988)



Structure et subduction de la croûte océanique atlantique dans l'Est-Caraïbe.

1 - Structure (d'après G.K. Westbrook, 1982, et in : R.C. Speed, G.K. Westbrook et al., 1984 ; adapté et simplifié). Ligne avec triangles noirs : trace de la subduction ; ligne avec triangles ouverts : front de déformation du prisme sédimentaire de la Barbade. Double trait et trait simple subperpendiculaire : anomalie magnétique du Crétacé supérieur avec numéro correspondant, et zone de fracture. Zone avec hachures horizontales : croûte océanique d'âge Jurassique et/ou Crétacé inférieur possible. Ride asismique : relief enfoui sous les sédiments atlantiques (croix) ; relief morphologiquement exprimé (hachures verticales) ; relief masqué par le prisme de la Barbade (pointillés) ; extension de la ride dans le plan de subduction (flèche fine ; Grenadines C.R. : crypto-ride des Grenadines). Les petits tronçons très hypothétiques des rides de la Dominique et de la Barbade, sous le prisme, n'ont pas été indiqués.

2 - Subduction (d'après G. Wadge et J.B. Shepherd, 1984 ; simplifié). Isobathes du plan de subduction tous les 20 km. Grosse flèche : azimut de la convergence de l'Est-Caraïbe adopté dans ce travail.

Astérisque : forage 543 du leg DSDP 78 A. Segment avec petits cercles : terminaison septentrionale éteinte de l'arc interne des Petites Antilles (Ph. Bouysse et al., 1985b).

3.1.2. Cadre structural et néotectonique

Les îles de la Guadeloupe et de la Martinique, comme leurs marges, présentent une structuration caractéristique (à terre, en systèmes de horsts et grabens ; en mer, en vallées et hauts-fonds), contrôlée par des failles normales, dont le rejeu synsédimentaire récent est établi pour plusieurs d'entre elles (post-Miocène à Holocène, voire sub-actuel selon les secteurs).

Les accidents géologiques repérés à terre affectent des formations dont les plus anciennes sont datées d'environ 3.5 MA. Ce sont donc tous des accidents actifs au Plio-Quaternaire. Les études néotectoniques locales à terre, par diverses approches, permettent de mettre en évidence des rejeux très récents (postérieurs à - 120 000 ans) sur certains de ces systèmes de failles.

Les études microtectoniques conduisent à retenir un régime d'extension radiale généralisée, depuis une époque récente du Quaternaire jusqu'à l'Actuel. L'activité, la plus probable aujourd'hui, des failles susceptibles d'engendrer des secousses sismiques, correspond ainsi à un jeu en faille normale, quelle que soit leur orientation.

Certaines des failles actives identifiées affectent directement des agglomérations importantes, dont celles de Pointe-à-Pitre et de Fort-de-France, et des mouvements verticaux d'ensemble, d'ampleur régionale, liés à la subduction postérieurement à l'émersion des îles, sont mis en évidence. Ils peuvent traduire des processus lents et réguliers ou, au contraire, résulter de déformations cosismiques brusques, lors de forts séismes de subduction (ou les deux). Le problème se pose en particulier pour l'isthme de Pointe-à-Pitre, avec une tendance à l'affaissement.

3.2. SISMICITE

Les données macrosismiques historiques permettent de disposer de 3 siècles d'informations sur la sismicité des 2 îles, mais pour la période antérieure au XXème siècle, seules les caractéristiques des secousses majeures peuvent être estimées et souvent, avec de fortes incertitudes. Les données instrumentales fournissent des résultats assez fiables et précis pour la période la plus récente : postérieure à 1950, et surtout à 1973 (installation des réseaux locaux de surveillance).

L'arc des Petites Antilles et corrélativement, la Guadeloupe et la Martinique, présentent un niveau de sismicité relativement modéré, à cette échelle de temps, par comparaison à d'autres zones de subduction du monde. Cependant, les intensités maximales observées (IX en Guadeloupe, VIII-IX en Martinique) ainsi que la fréquence des secousses majeures, justifient pleinement une prise en compte du risque sismique : une à deux secousses sont ressenties chaque année, en moyenne, en Guadeloupe et au moins deux secousses d'intensité supérieure ou égale à VII (dommages significatifs aux constructions) par siècle.

La plupart des séismes ressentis en Guadeloupe et en Martinique sont des secousses lointaines. Toutefois, il existe aussi une sismicité locale (sources proches superficielles), certes faible en regard des données instrumentales récentes, mais beaucoup plus significative après révision des données historiques. Deux séismes destructeurs en Guadeloupe, 16 mai 1851 (Io = VII) et 29 avril 1897 (Io = VIII) sont ainsi rattachables à des sources locales, très proches de grosses villes : Capesterre et Pointe-à-Pitre.

L'étude minutieuse de la sismicité des 2 îles, replacée dans le contexte géodynamique, structural et néotectonique régional et local, a permis de retenir 3 principaux types de source sismique en Guadeloupe et 2 en Martinique (Godefroy et al., 1991), pour une évaluation fiable de l'aléa (figures 3 et 4).

Figure 3
Représentation schématique des sources sismiques retenues pour l'évaluation de l'aléa régional en Guadeloupe

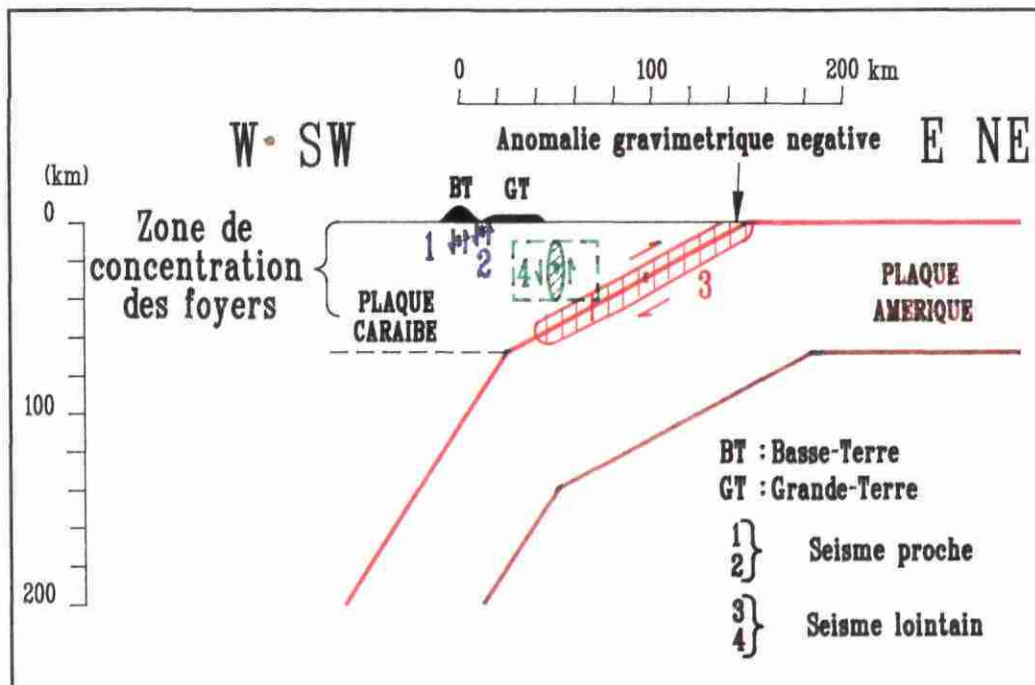
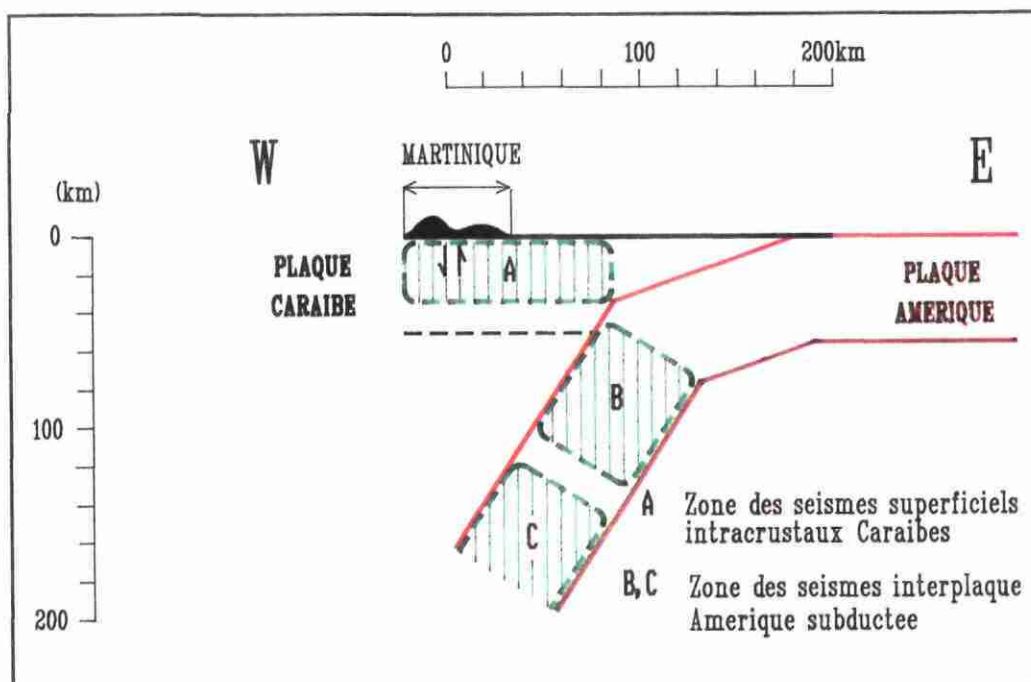


Figure - 4
Représentation schématique des sources sismiques retenues pour l'évaluation de l'aléa régional en Martinique



3.3. IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES SOURCES SISMQUES

Pour l'île de la Guadeloupe proprement dite (figures 1 et 3), les caractéristiques des différents types de sources sismiques sont présentées sur le tableau 1 ; et pour l'île de la Martinique (figures 1 et 4) sur le tableau 2.

	SOURCES "PROCHES"		SOURCES "LOINTAINES"	
SEISME DE REFERENCE	29 avril 1897	6 mai 1851	8 février 1843	8 octobre 1974
MAGNITUDE	5,5 ± 0,5	5,5 ± 0,5	7,5 à 8,0	7,5
PROFONDEUR FOCAL	5 km ± 3 km	10 km ± 5(*)	30 km (valeur moyenne par rapport à l'extension de la zone de rupture)	40 km (initialisation de la rupture). 25 km (au centre de la zone de rupture)
INTENSITE MAXIMALE ENVISAGEABLE EN GUADELOUPE (MSK)	VIII	VII(*)	IX	IX
MECANISME A LA SOURCE	faille normale	faille normale	faille inverse	faille normale
LOCALISATION ET ASSOCIATION POSSIBLE A UN ACCIDENT GEOLOGIQUE	Intraplaque caraïbe, faille de Gosier, extension NE des failles de Petit-Bourg, faille de Jarry	Intraplaque caraïbe, faille de Matélie-Capesterre, faille du banc Colombie	Chevauchement interplaques caraïbe/Amérique, entre les rides Barracuda et Tiburon	Intraplaque caraïbe sur le plongement de la ride de Tiburon subductée, Escarpement de Marie-Galante
DISTANCE FOCAL MINIMALE A LA GUADELOUPE	5 km	5 km	50 km	25 km
MOMENT SISMIQUE (dyne x cm)	5.10^{24} à 10^{25}	5.10^{24} à 10^{25}	10^{27} à 10^{28}	$2,5.10^{26}$ à 10^{27}
SURFACE DE RUPTURE	10 à 30 km ²	15 à 30 km ²	3 000 à 10 000 km ²	2 000 km ²
LONGUEUR MAXIMALE DE RUPTURE	5 à 8 km	5 à 8 km	80 à 140 km	0 km
DISLOCATION MOYENNE	15 à 70 cm	15 à 70 cm	2,5 à 10 m	1 à 4 m

(*) Une profondeur focale très faible (2 à 5 km) comme celle du séisme de 1897 doit aussi être considérée ; l'intensité maximale doit alors être portée à VIII.

Tableau 1 - Caractéristiques des sources sismiques retenues pour l'évaluation de l'aléa sismique en Guadeloupe (Basse-Terre, Grande-Terre, La Désirade, Marie-Galante et les Saintes)

	SOURCES "PROCHES"	SOURCES "LOINTAINES"	
SEISME DE REFERENCE	Pas d'exemple enregistré avec ce niveau de magnitude mais de nombreuses secousses de magnitude $\leq 4,5$	11 janvier 1839 21 mai 1946	8 février 1843
MAGNITUDE MAXIMALE	5,0 à 5,5	7,5	7,5 à 8
PROFONDEUR FOCALE	5 à 10 km	50 à 80 km	30 km (valeur moyenne par rapport à l'extension de la zone de rupture)
INTENSITE MAXIMALE ENVISAGEABLE EN MARTINIQUE	VII-VIII à VIII	VIII à VIII-IX	VII
MECANISME A LA SOURCE	faille normale	variable : faille normale ou décrochement	faille inverse
LOCALISATION	Intraplaque Caraïbes : failles actives majeures identifiées sur l'île et ses marges ex. : faille de Lamentin nord, Schoelcher, Trois Ilets, le Vauclin-le Marin, Morne Pitault-Morne Carrière, piton du Carbet, Bellefontaine, etc.	Intraplaque Amérique subductée au large des côtes orientales de la Martinique (en particulier : ENE de la Caravelle)	Intraplaques Caraïbes/Amérique entre les rides de Barracuda et Tiburon à l'ENE de Grande Terre
DISTANCE FOCALE MINIMALE A LA MARTINIQUE	5 km	60 km	200 km
MOMENT SISMIQUE (*)	5.10^{24} dyne-cm	$2,5.10^{26}$ dyne-cm	10^{27} à 10^{28} dyne-cm
SURFACE DE RUPTURE (*)	10 km ²	2 000 km ²	3 000 à 10 000 km ²
LONGUEUR MAXIMALE DE RUPTURE (*)	5 km	60 km	680 à 140 km
DISLOCATION MOYENNE (*)	15 cm	1 à 4 m	2,5 à 10 m

(*) Ordres de grandeur indicatifs

Tableau 2 - Caractéristiques des sources sismiques retenues pour l'évaluation de l'aléa sismique en Martinique

3.4. MOUVEMENTS SISMQUES DE REFERENCE AU ROCHER

L'évaluation de l'aléa sismique régional (GODEFROY et al., 1990 et 1991) a conduit à la définition de mouvements sismiques de référence, donnés sous la forme de spectres de réponse élastiques "au rocher horizontal affleurant" (amortissement : 5%). Ces derniers ne sont utilisables que pour le dimensionnement des ouvrages courants, dits à "risque normal".

Les trois types de spectres obtenus sont précisés sur la figure 5B (b et c), correspondant au (macro) zonage de la figure 5A (zones IIIa, IIIb et IIIc). A titre de comparaison est présenté également le spectre unique des recommandations AFPS 90.

Les spectres en source proches ont été évalués à partir des méthodes de JOYNER et FUMAL (1985), BERNARD (1987) et de LEVRET et MOHAMMADIOUN (1984). L'accélération maximale obtenue est de 0,35 g (figure 6a) pour les zones IIIb et IIIc et de 0,3 g pour la zone IIIa.

Les spectres en sources lointaines ont été évalués à partir des méthodes de CROUSE et al. (1988), BERNARD (1987) et de B. et G. MOHAMMADIOUN (1980). Par ailleurs, afin de préciser les accélérations horizontales, on a utilisé plusieurs lois et résultats disponibles, dont les données des séismes de subduction du Chili (1985), du Mexique (1985) et la loi de FUKUSHIMA et al. (1990). Les accélérations maximales ont été finalement prises égales à 0,30 g pour les zones IIIc, 0,20 g pour la zone IIIb et 0,1 g pour la zone IIIa, compte tenu de la distance plus grande de la zone de subduction.

Ce sont ces mouvements de référence au rocher qui seront utilisés pour la modélisation de la réponse dynamique des sols tenant compte des conditions particulières de site, au chapitre 6.2 et en particulier, les spectres de réponse élastique au rocher correspondant aux sources lointaines.

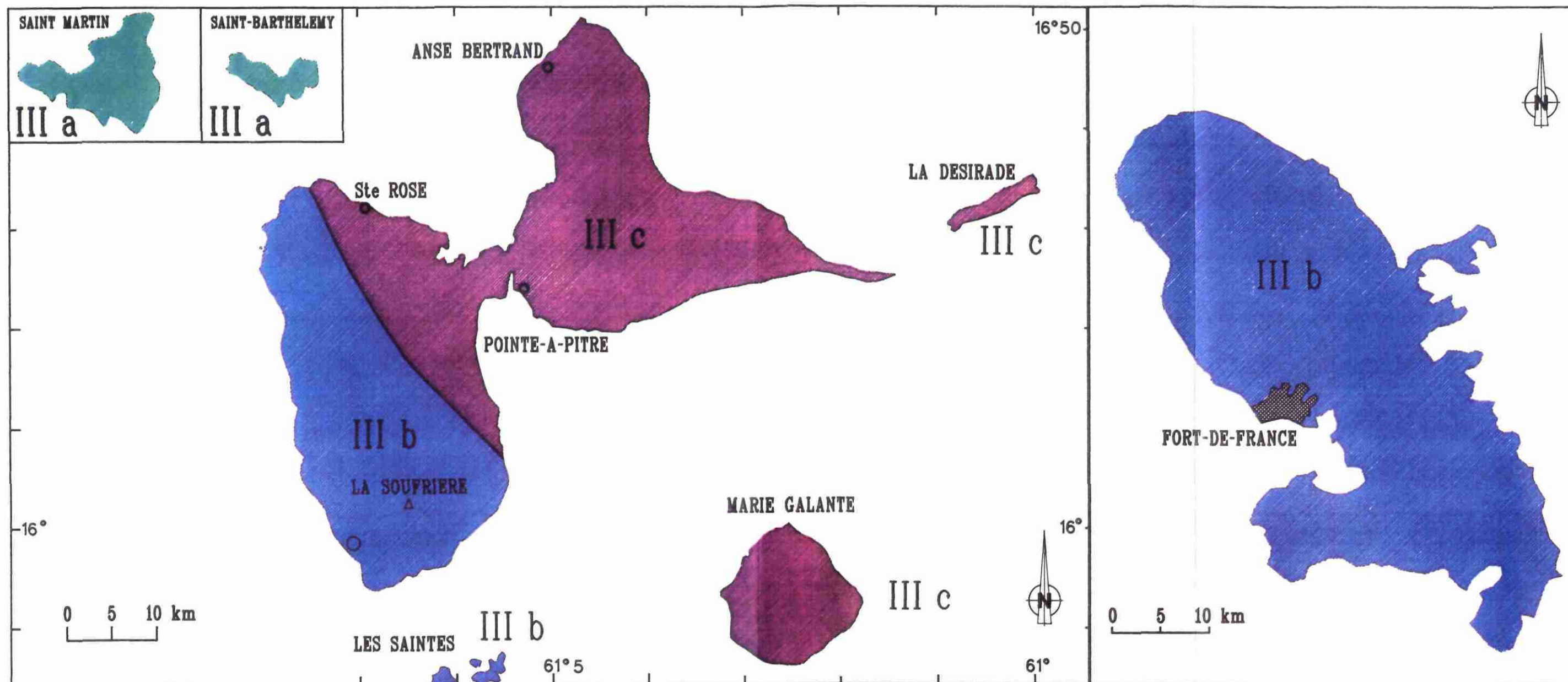


Figure 5A - Zonage sismique régional obtenu suivant une approche déterministe (Godefroy et al., 1990)

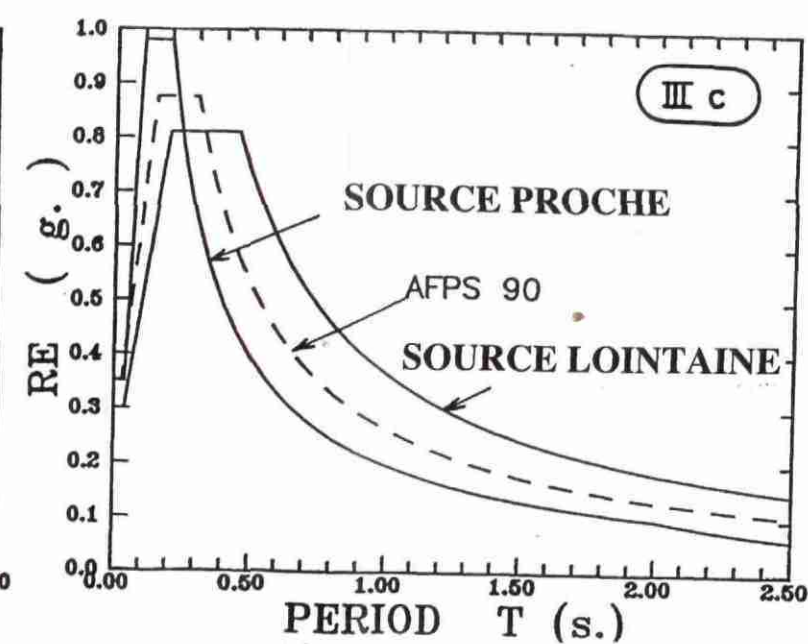
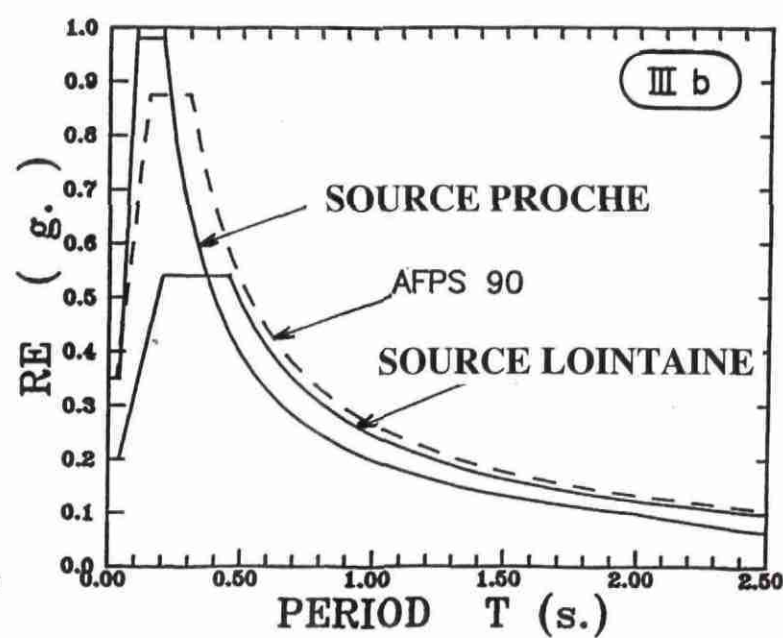
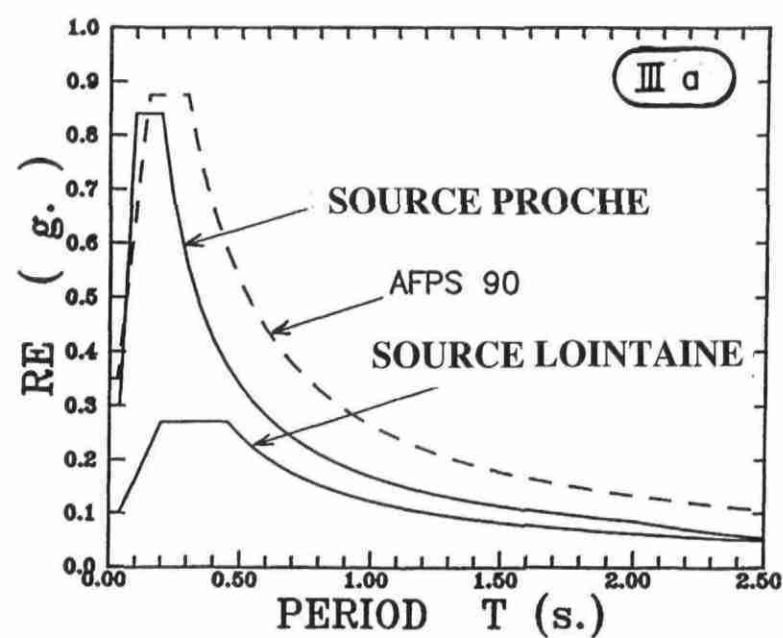


Figure 5B - Spectres de réponse élastiques horizontaux pour l'application des règles parasismique de construction des ouvrages courants (classe B)

La méthodologie que l'on se propose de développer s'insère dans le cadre d'une approche plus globale, **d'évaluation et de réduction du risque sismique**, seule capable d'orienter de manière efficace les mesures de prévention prioritaires, à adopter à l'échelle d'une grande agglomération.

Cette approche globale est détaillée figure 6. Elle repose sur **le parti pris d'utiliser, dès la phase d'acquisition des données de base, un système d'informations géographiques (SIG)**, présentant deux attraits fondamentaux :

- d'un point de vue opérationnel, celui de permettre une **interprétation automatisée, des données**, suivant des procédures testées et validées, et surtout une cartographie évolutive des cartes d'aléa, de vulnérabilité et de risque.
- d'un point de vue économique celui de **réduire considérablement les coûts, à moyen et long termes**, lorsqu'il s'agira d'intégrer de nouvelles données de base acquises dans les zones précédemment cartographiées.

Les différentes étapes représentées figure 6 peuvent être brièvement détaillées ci-dessous :

□ ACQUISITION ET VALIDATION DES DONNEES DE BASE

L'évaluation et la cartographie de l'aléa sismique repose sur une approche multidisciplinaire qui nécessite de combiner un très grand nombre de données de base. Leur compilation et sélection minutieuses, aussi fastidieuses soient-elles sont des étapes indispensables, préalables aux étapes de traitement, qui conditionnent la qualité et validité des résultats qu'on en attend.

Cette acquisition et compilation ont porté sur :

- les données sismologiques existantes ;
- les résultats des études antérieures d'évaluation des aléas, à l'échelle régionale et à l'échelle locale ;
- les **données géotechniques et géophysiques** comprenant les reconnaissances et tests in-situ et les essais de laboratoire ;
- les **données géologiques** (lithologie, stratigraphie, géologie structurale, tectonique et néotectonique) issues des études antérieures ;
- les **données pédologiques** relatives aux formations les plus superficielles ;
- les **données topographiques et géomorphologiques** ;
- les **données hydrogéologiques**.

□ STRUCTURATION INFORMATISEE DES DONNEES DE BASE

De manière générale :

- les **données de base ponctuelles**, données de sondages géotechniques par exemple, ont été saisies sous forme de fichiers ASCII importables facilement sous tableur (Excel par exemple) ou sous SIG (Synergis et Arc/Info) ;

- les **données surfaciques**, provenant le plus souvent des cartes thématiques réalisées lors des études antérieures, ont été digitalisées sous Intergraph/Microstation. Des programmes spécifiques ont été développés pour importer les fichiers digitalisés sous SIG ;
- les **données topographiques**, provenant des fonds stables de l'IGN, à l'échelle du 1:10000, ont été digitalisées, et restituées en modèles numériques de terrain.

□ EVALUATION ET CARTOGRAPHIE DE L'ALEA SISMIQUE

La nouvelle méthodologie d'évaluation et la cartographie de l'aléa sismique fait l'objet de la présente étude et est décrite dans les paragraphes 4.1 à 4.6.

□ EVALUATION ET CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE

Cette partie du programme pourra être développée à l'occasion de programmes ultérieurs (programme DPCN-Caraïbes, futurs contrats de plan état-région), conjointement par des ingénieurs du BRGM et des bureaux de contrôle spécialisés (VERITAS, SOCOTEC, ADUAG).

Elle portera sur les effets d'un séisme sur les biens et les personnes, à l'échelle des agglomérations : bâtiments, ouvrages, équipements et installations. Elle s'attachera d'abord aux conséquences directes de la sollicitation vibratoire sur les constructions, pour déterminer des fonctions de vulnérabilité "directe" (fonction de l'intensité et de la nature de cette sollicitation ou de valeurs spectrales, ces valeurs étant tirées directement de l'étude de l'aléa local). Elle tiendra compte ensuite d'une vulnérabilité "indirecte", résultant de l'exposition du parc bâti aux effets induits d'un tremblement de terre (liquéfaction, mouvements de terrain).

□ EVALUATION DU RISQUE

Cette phase essentielle, pourrait associer les équipes techniques intervenant dans le projet, et les différentes autorités concernées. Elle devra déboucher sur :

- une évaluation des pertes directes (dommages aux personnes et aux biens), des répercussions socio-économiques des pertes immobilières et de production, et des pertes indirectes (soit les conséquences des dommages subis par les ouvrages stratégiques et à risque spécial) ; celle-ci se fera d'une part sur la base d'une analyse multicritère, et d'autre part sous forme de scénarios de risque (simulation des effets de tremblements de terre comparables aux plus forts séismes ressentis historiquement à Fort de France) ;
- des propositions pratiques visant à réduire le risque.

Figure 6
Méthodologie globale d'évaluation du risque sismique

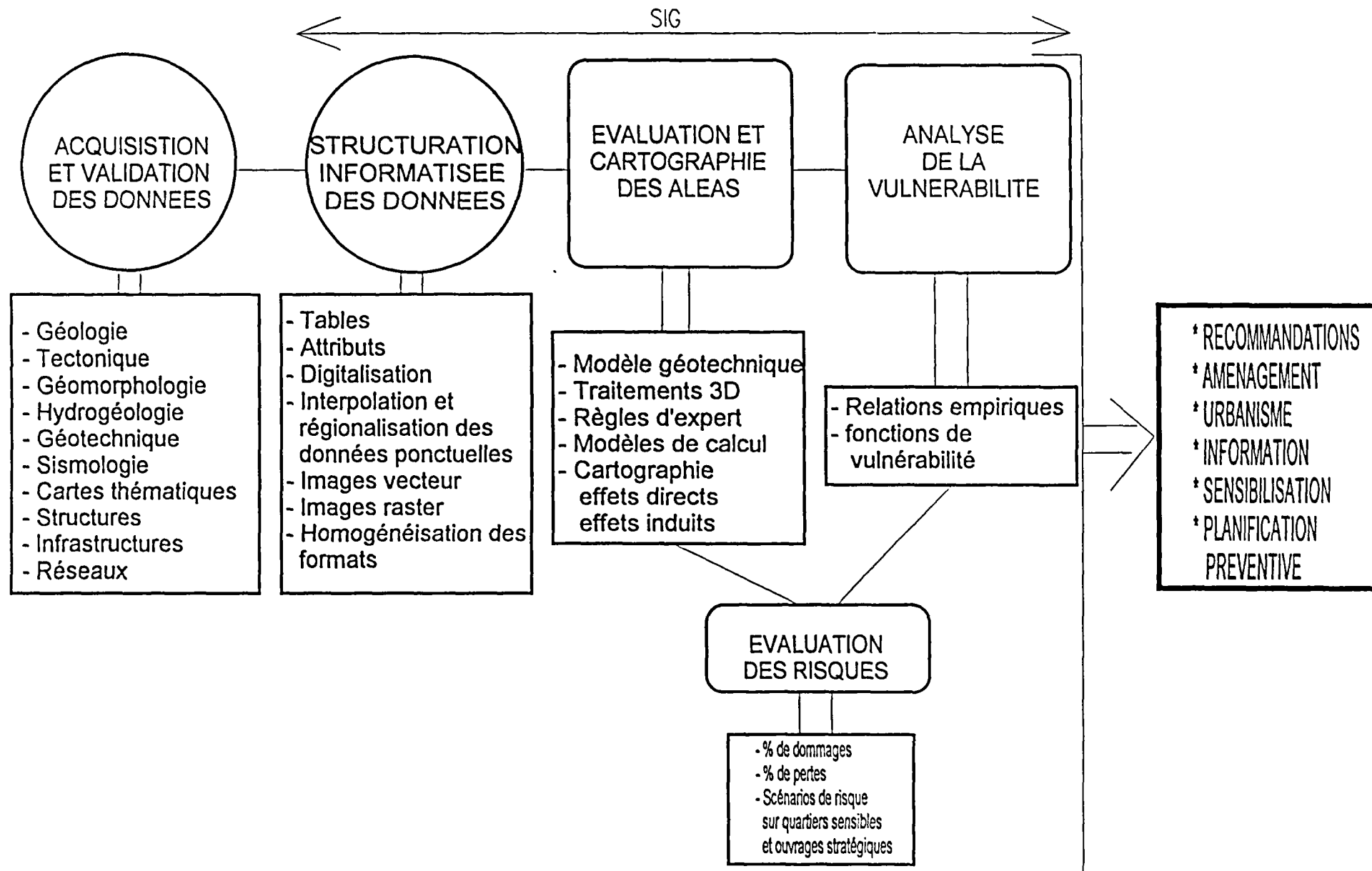
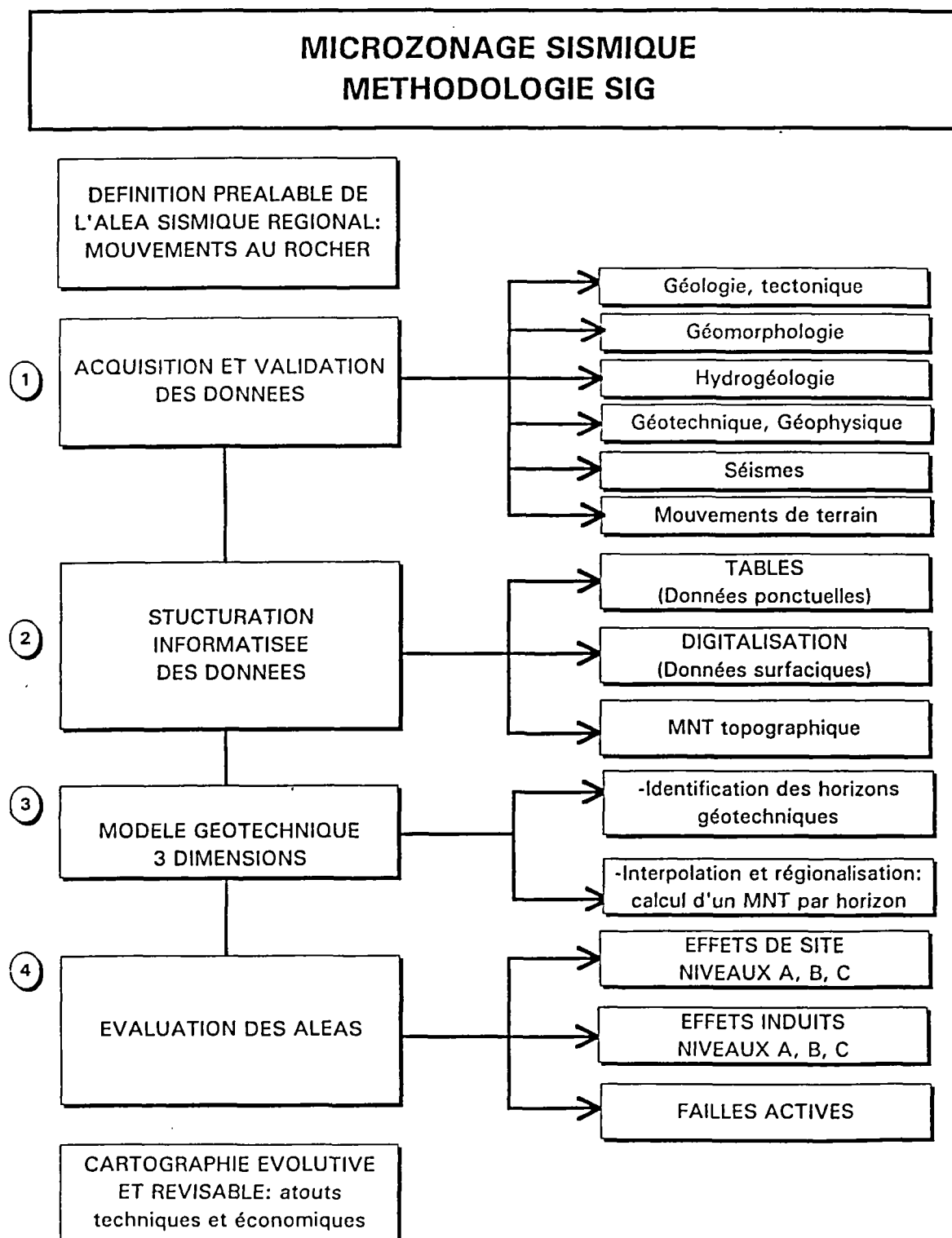


Figure 7 - Microzonage sismique - Méthodologie SIG



4. MÉTHODOLOGIE DÉVELOPPÉE

Elle est présentée de manière synthétique sur la figure 7, et détaillée dans les paragraphes suivants.

Elle a pour support une chaîne de calculs informatiques, qui permet de manipuler la topographie de la zone d'étude, la géologie de surface, les différents horizons géotechniques identifiés et la profondeur de la nappe, puis d'évaluer et de cartographier l'aléa sismique.

Elle fonctionne entièrement sur micro-ordinateur, sous un environnement MS-DOS. Certains modules proviennent ou ont été adoptés du logiciel GEOSURF (BOURROUSSE et SEDAN, 1992), les autres ayant été spécialement développés. Les données de base, les niveaux d'information et les cartes produites, tels qu'ils sont structurés, sont entièrement compatibles pour être intégrés à d'autres systèmes d'information géographique (ARC/INFO, SYNERGIS).

Elle permet notamment:

- la création d'un MNT topographique ;
- la création d'un modèle numérique de chaque interface géotechnique, chaque MNT étant stocké dans un niveau d'information spécifique ;
- la génération de coupes géotechniques et l'extraction des caractéristiques géomécaniques des différentes couches extraites du modèle 3D ;
- l'identification des zones présentant un comportement géomécanique homogène ;
- l'évaluation des effets de site suivant plusieurs approches possibles ;
- leur cartographie, la visualisation et l'impression des résultats.

4.1. PRINCIPES GÉNÉRAUX

Cette méthodologie fait appel aux principes qui ont été développés lors de la mise en oeuvre des Plans d'Exposition aux Risques, et présentés en particulier dans un document réalisé pour la Délégation aux Risques Majeurs, et tient compte des dernières évolutions de la réglementation.

Les PER ne concernant que les ouvrages courants, dits "à risque normal", le microzonage qui est proposé, s'appuie sur la future réglementation, en se plaçant dans le contexte des recommandations AFPS90 et des règles PS92, qui se substitueront dans un avenir proche aux règles PS 69 révisées 82.

Selon l'importance des données existantes ou issues de reconnaissances complémentaires, on a précisé (§ 2.1.) que trois niveaux d'étude sont classiquement distingués :

- Niveau A : le moins développé
- Niveau B : intermédiaire
- Niveau C : le plus détaillé

Dans le cadre de notre étude, on peut considérer que le niveau d'étude est compris entre B et C, en effet :

- un grand nombre de sondages ont été utilisés, même si aucune reconnaissance complémentaire n'a été réalisée,

- des modélisations numériques ont été effectuées et certaines devraient être validées (sur Fort-de-France) à partir des données expérimentales recueillies lors de l'expérimentation de 1992, réalisée en collaboration avec l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP).

Nous détaillons, dans les paragraphes suivants, la démarche séquentielle de la figure 7, conduisant à l'évaluation et la cartographie de l'aléa local et plus particulièrement à celle des effets de site, qui traduisent la modification du signal vibratoire lorsque, sur un même site, on passe de la configuration idéale au "rocher horizontal affleurant" à la configuration réelle (vallée à sols lâches, discontinuités, reliefs accentués, etc.). C'est la forme du spectre de réponse qui est directement influencée par ce phénomène, ce qui a bien sûr des conséquences sur la réponse des constructions.

Il est rappelé que le terme générique "**aléa sismique local**" regroupe trois types d'effet à prendre en compte dans le cadre de la réalisation des microzonages :

- les **effets de site**, qui concernent la modification du signal sismique défini au rocher, compte tenu des conditions de site géologiques et topographiques. Cette modification est observée ou évaluée soit en amplitude temporelle sur les accélérogrammes, soit en continu fréquentiel sur les spectres de réponse,
- les **effets induits**, qui correspondent aux grands déplacements du sol induits par les vibrations sismiques sur les formations superficielles (liquéfaction, mouvements de terrain),
- les **effets dus à une faille active sismogène** débouchant en surface qui correspondent à des déplacements différentiels de part et d'autre de la faille ainsi qu'à des mouvements vibratoires particuliers.

4.2. INVENTAIRE, VALIDATION ET SAISIE DES DONNEES DE BASE

La réalisation d'un microzonage nécessite la mise en oeuvre de moyens non spécifiques à l'étude proprement dite et de reconnaissances spécifiques. Ces dernières ne sont généralement mises en oeuvre que pour les études dites de niveau supérieur pour lesquels on dispose de moyens techniques et financiers importants.

Les données non spécifiques sont quant à elles obtenues par consultation de documents d'ordre général ou par consultations d'études géotechniques, géologiques ou hydrogéologiques, réalisées pour des ouvrages particuliers situés dans la zone à étudier.

Aucune reconnaissance spécifique n'a été mise en oeuvre dans le cadre de notre étude. Toutes les données ont été acquises en consultant la banque de données du sous-sol du BRGM Antilles, les rapports BRGM réalisés sur la zone d'étude ou ceux réalisés par d'autres bureaux d'étude.

Les données de base spécifiques à l'évaluation de l'aléa sismique local ont été inventoriées. Il s'agit :

- des données relatives à la définition de l'aléa sismique régional. Cette évaluation a fait l'objet de rapports récents (Godefroy et col., 1990 et 1991) et les résultats auxquels elle a abouti (définition des sources sismiques régionales et locales, mouvements sismiques de référence au rocher horizontal affleurant) sont intégrés tel que (cf. chapitre 3);
- de la géologie et de l'hydrogéologie ;
- des formations superficielles (nature, épaisseur, etc.) ;
- des données relatives à la localisation des failles actives ;
- des reconnaissances géotechniques in-situ, et des essais de laboratoire ;
- de la définition des caractéristiques géomécaniques pour chaque niveau géotechnique (densité, vitesse de propagation des ondes de cisaillement, amortissement matériel), et de leur épaisseur;

4.3. STRUCTURATION INFORMATISÉE DES DONNÉES

Cette structuration était nécessaire pour enregistrer les informations initiales et les organiser en une base informatisée exploitable dans le cadre du microzonage sismique.

Concernant l'acquisition informatique proprement dite trois techniques ont été mises en oeuvre :

- **l'entrée de données en mode manuel** (clavier), sous forme de tableaux de valeurs. Cela concerne en particulier **toutes les données de sondage** (coordonnées, altitude des couches, caractéristiques géomécaniques) ;
- la **digitalisation** qui permet de numériser dans un fichier, les points de la surface de la table, choisis par l'opérateur. Elle a concerné les courbes de niveaux IGN, pour la constitution des MNT topographiques, et certains contours de formations déjà cartographiées (géologie, pédologie) ;
- la **scannerisation** qui permet de restituer une image "papier" dans un fichier. Elle a été utilisée pour les fonds topographiques au 1/25 000 de l'IGN, comprenant les réseaux routiers et les principaux centres de vie, sur lesquels sont imprimés par la suite les résultats cartographiques du microzonage.

L'ensemble de ces données est **référéncé dans le système M.T.U.** (Mercator Transverse Universel) fuseau 20, utilisé pour toutes les cartes des Antilles Françaises de l'IGN. L'unité de longueur de référence est le kilomètre.

Le MNT topographique a dû être constitué à partir de la digitalisation des courbes de niveau et points cotés du fond topographique au 1/10 000 de l'IGN. La procédure complète de création du MNT est décrite au chapitre 5.1.

4.4. MODÈLE GÉOTECHNIQUE NUMÉRIQUE 3D

La prise en compte de la modification du signal vibratoire, qui passe par une évaluation des effets de site, nécessite **la connaissance préalable de la répartition spatiale des différents terrains, mais aussi de leurs caractéristiques mécaniques**. C'est la raison pour laquelle, la méthode s'appuie sur la constitution préalable d'un modèle géotechnique numérique tridimensionnel du sous-sol qui passe par les étapes successives décrites ci-dessous.

4.4.1. Identification d'un nombre fini d'unités ou niveaux géotechniques

La compilation et l'interprétation de toutes les données de base (géologie de surface, géotechnique) conduit dans un premier temps à **l'identification d'un nombre fini d'unités ou niveaux géotechniques**; chacun d'entre eux étant caractérisé par un comportement géomécanique homogène, et étant supposé comme suffisamment représentatif à l'échelle de la zone d'étude.

Cette étape réalisée par un géotechnicien, dynamique des sols, est souvent très délicate dans la mesure où la plupart des sondages existants (carottés), pour lesquels les formations sont décrites en termes de faciès géologiques, doivent être réinterprétés en termes de comportement géomécanique. Ceci suppose de disposer de suffisamment de sondages de type pénétromètre statique, pressiomètre pour apprécier les caractéristiques mécaniques de chacune des couches et leur variabilité dans l'espace.

En fonction de la complexité de la zone étudiée, on se ramène généralement à un nombre d'unités géotechniques compris entre 5 et 10 (à titre indicatif 6 unités sont retenues pour la zone du Lamentin).

Dans sa version actuelle, la méthode nécessite de **définir un ordre de superposition logique de ces différentes unités**, à savoir que l'unité 1 se situera toujours au dessus de l'unité 2, l'unité 2 au dessus de l'unité 3. En revanche, ceci n'impose pas que toutes les couches géotechniques soient représentées en chaque point du modèle. Pour un modèle à 6 couches, et sur un site où les formations 3 et 5 sont absentes, ceci signifie simplement que l'ordre d'apparition des formations, depuis la surface est le suivant: formation 1, formation 2, formation 4 et formation 6.

4.4.2. Saisie des données de base interprétées

En chaque point de sondage, référencé par son numéro et par ses coordonnées (X, Y, Z), **l'interprétation conduit à fixer l'épaisseur et les paramètres géomécaniques de chacune des unités géotechniques identifiées**.

Ces données sont alors saisies sous forme informatique, soit directement sous éditeur, soit sous tableur afin d'opérer des traitements statistiques ayant pour but d'apprécier la représentativité des unités à l'échelle de la zone d'étude (figure 8).

Dans certaines zones, comme c'était le cas par exemple de celle de Baie Mahault-Jarry en Guadeloupe, des cartes thématiques géotechniques peuvent déjà exister. Les contours de chaque formation peuvent alors être digitalisés sous Intergraph/Microstation, et les fichiers correspondants intégrés au SIG. Pour le microzonage du Lamentin en Martinique des profils géophysiques ont été intégrés de cette même manière.

Figure 8

Exemple de table de données géotechniques référencées :

num = numéro de sondage ; *X et Y* = coordonnées UTM en km ; *ALT* = niveau NGG ; AS, FC1, LAM1, FC2, LAM2, LAR, SF
altitude de la base de chaque formation géotechnique

NUM	X	Y	ALT	AS	FC1	LAM1	FC2	LAM2	LAR	SF
163										
1	716.4	1615	6.3	-0.7	-7.7	-23.7		-36.7	-93.7	
2	716.9	1616	10	4		-2	-3	-15	-33	-80
3	716.9	1616	10.6	8.6		-19.4			-37.4	-69.4
4	716.9	1617	10	1	-2	-13			-31	
5	716.2	1616	13.7	9.7		-22.3			-36.3	-71.3
6	717	1614	6.6	4.1	-4.9	-11.9			-23.4	-38.4
7	717	1614	7	4.5	-5.7	-13			-23	-38
8	717	1614	7	4.5	-8.5	-15.5			-23	-38
9	714.6	1614	1	0.01	-8	-16				
10	716.6	1617	14.2	7.2		-3.8			-17.8	-50.8
11	718	1617	11.7	3.7		-23.3				-35.3
12	717.2	1616	11.3	8.3	-3.7	-9.7			-29.7	-58.7
13	716.4	1616	12	4		-23				-68
14	716.4	1617	15	1		-15				-50
15	713.9	1614	2.5	1.5	-4.5	-17.5			-17.5	
17	714.6	1614	1	-2.5	-8.5	-14.5				
18	714.6	1614	0.9	-1.6	-8.6	-14.1				

4.4.3. Réalisation de coupes géotechniques : méthode des profils

Le plus souvent le nombre de sondages ponctuels, n'est pas suffisant pour interpoler les données de manière satisfaisante, sur l'ensemble de la zone d'étude. Aussi, pour enrichir les données de base relatives à chaque unité géotechnique, on réalise un certain nombre de profils à travers la zone d'étude, sur lesquels on effectue des coupes géotechniques, que l'on digitalise, puis que l'on restitue sous la forme d'un fichier de coordonnées x, y et z.

Par compilation des données de sondage, et de celles issues de ces coupes, on constitue ainsi un fichier de base référencé, pour chaque unité géotechnique, comprenant un nombre N de points, dits points de contrôle, définis par leurs coordonnées et par l'altitude de la base de chaque unité considérée.

4.4.4. Construction du modèle géotechnique 3D

Cette construction nécessite de créer un modèle numérique de terrain pour chacune des unités géotechniques identifiées.

La démarche globale est la suivante:

- saisies des données ponctuelles de sondage ;
- digitalisation des données surfaciques quand elles existent ;
- création des tables des caractéristiques géomécaniques de chaque unité ;
- réalisation (si nécessaire) des profils géotechniques et digitalisation ;
- discrétisation de la zone d'étude en un nombre fini de mailles ;
- création d'un fichier de données référencées en coordonnées X, Y et Z (Z étant l'altitude) pour un nombre N de points de contrôle, et ce, pour chaque unité géotechnique ;
- interpolation des modèles numériques géotechniques (un modèle par unité) ;
- calcul, par différentiel de tous les modèles numériques, du modèle géotechnique 3D final.

En chaque maille du modèle, référencée par ses coordonnées X et Y, il devient alors possible, en calculant la différence d'altitude entre chaque couche, de connaître la configuration et les propriétés du sous-sol (superposition des couches, épaisseur, en calculant la différence d'altitude entre chaque couche, et caractéristiques géomécaniques). Il est également possible d'extraire de ce modèle, la coupe géotechnique séparant deux mailles quelconques du modèle.

L'exploitation de ce modèle 3D permet en particulier, grâce à un traitement statistique approprié, d'identifier toutes les configurations géotechniques rencontrées (superpositions possibles des divers horizons géotechniques, épaisseurs et caractéristiques) et d'estimer leur représentativité sur le secteur étudié. Ceci est très important pour définir les configurations qui doivent faire l'objet d'un calcul de réponse à une sollicitation sismique.

4.5. EXPLOITATION DU MODÈLE: ÉVALUATION ET CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA SISMIQUE LOCAL

La méthode proposée permet d'identifier les zones présentant une réponse sismique homogène et de fournir pour chaque zone, des mouvements sismiques répondant aux exigences réglementaires.

En particulier, le microzonage sismique qui est proposé tient compte des dernières évolutions de la réglementation et se place volontairement dans le cadre des recommandations AFPS 90 et des nouvelles règles parasismiques de construction, dites PS 92.

La démarche séquentielle adoptée est la suivante :

- discrétisation de la zone d'étude en un nombre fini de mailles ;
- pour chaque maille du modèle, calcul des paramètres directement exploitables en génie parasismique (période propre de la colonne de sols, amplification, fonctions de transfert, spectres de réponse) suivant les approches de niveau A, B ou C décrites ci-dessous ;
- cartographie des zones présentant la même réponse sismique.

4.6. MÉTHODES RETENUES POUR LA QUANTIFICATION DES EFFETS DE SITE

Deux grandes catégories de méthodes peuvent être utilisées. Elles s'appuient au départ sur un examen détaillé des cartes géologiques et topographiques puis sur une bonne connaissance des caractéristiques géomécaniques et géométriques des sols :

- les méthodes instrumentales
- les méthodes numériques.

On présentera brièvement d'une part les méthodes que nous avons utilisées, et d'autre part, la manière dont les résultats obtenus peuvent être transcrits en termes réglementaires.

Le souci initial étant de pouvoir réaliser des études de tout niveau (A à C), les méthodes de calcul retenues sont soit simplifiées (de mise en oeuvre aisée et peu coûteuses, pour les niveaux A et B) soit plus complexes (aussi plus précises, mais plus coûteuses, pour le niveau C).

Toutes nécessitent que soient connues l'épaisseur (h) des formations superficielles et les principales caractéristiques des sols suivantes :

- la densité ;
- la vitesse des ondes de cisaillement V_s qu'il n'est pas toujours facile d'obtenir ;
- l'amortissement D.

Compte tenu de la superficie des zones étudiées (environ 30 km²), on conçoit très bien qu'il n'a pas été facile d'obtenir ces dernières valeurs sans reconnaissances spécifiques. Nous avons donc recouru à une analyse statistique des quelques valeurs mesurées ponctuellement en quelques points de la zone d'étude, et de celles mesurées dans des sols de caractéristiques similaires, pour finalement retenir celles caractérisant au mieux chacune des formations géotechniques retenues.

Il est par ailleurs, toujours souhaitable, d'indiquer la précision avec laquelle on connaît toutes ces valeurs "de base" et si possible d'en déduire l'incidence sur l'incertitude des résultats obtenus. C'est pour cette raison que les calculs réalisés dans le cadre de cette étude l'ont été sous forme paramétrique.

Chacune des méthodes suivantes, conduisant à une évaluation et une cartographie spécifique de l'aléa ont été mises en oeuvre.

4.6.1. Étude de niveau A : évaluation de l'aléa sismique pour l'application des recommandations AFPS 90 et des règles parasismiques PS92

Pour une étude de niveau A, nous nous sommes référés à la réglementation existante, régie par le décret du 14 mai 1991, qui, fait notamment bien la différence entre ouvrages à "risque normal" et ouvrages à "risque spécial".

Pour les premiers, il définit les 4 classes A, B, C et D de bâtiments, équipements et installations (pouvant être situés dans les 5 zones de sismicité croissante 0, Ia, Ib, II et III) du territoire français faisant l'objet de mesures préventives et notamment de règles de construction parasismique, et, renvoie à l'arrêté d'application du 16 juillet 1992 (J.O. du 6 août 1992), qui définit les règles de classification et de construction parasismique applicables à ces ouvrages courants.

L'article 4 précise notamment que les règles de construction à appliquer sont celles du document technique unifié "Règles parasismiques 1969 révisées 1982 et annexes", dit "Règles PS 69/82", avec la valeur du coefficient alpha (α) résultant à la fois de la situation du bâtiment au regard de la zone sismique et de la classe d'ouvrage, telles que définies dans le décret du 14 mai 1991.

Deux points sont à préciser :

- a) Le zonage sismique du décret (associé aux classes d'ouvrage) ne représente pas à proprement parler une carte de l'aléa sismique, mais plutôt la façon dont la Puissance Publique prend en compte les séismes pour la protection minimale requise pour les ouvrages courants.
En particulier, les constructeurs restent libres d'opter pour une protection supérieure à ce minimum requis.
- b) L'article 4 de l'arrêté du 16 juillet 1992 sera modifié, vraisemblablement en 1995, pour tenir compte des travaux des années 80 concernant la refonte complète des règles PS 69/82. Ces travaux ont en particulier abouti à la publication des "Recommandations AFPS 90", pour la rédaction de règles relatives aux ouvrages et installations à réaliser dans les régions sujettes aux séismes.

Ces recommandations, transformées actuellement en "règles PS 92", ne font plus intervenir le coefficient alpha (α) mais un paramètre plus physique, l'accélération nominale (a_n), qui cale des spectres élastiques ou de dimensionnement dépendant eux-mêmes des conditions de site.

C'est pour tenir compte de ces dernières évolutions de la réglementation, que la méthode d'évaluation retenue se place dans le cadre des règles PS 92, et non pas dans celui des PS 69 révisées 82.

A titre indicatif, la figure 9 présente l'équivalence entre les valeurs des coefficients α et a_N .

Figure 9
**APPLICATION DES REGLES PARASISMQUES
CLASSIFICATION DES BÂTIMENTS**

α : coefficient d'intensité sismique (PS 69/82)

a_n : accélération nominale (AFPS 90)

I_n : intensité nominale

Classes de constructions				
Zones	A	B	C	D
0	-	-	-	-
I _a	-	0,5 0,10 g VII	0,5 0,15 g VII	0,75 0,20 g VII-VIII
I _b	-	0,5 0,15 g VII	0,75 0,20 g VII-VIII	1,0 0,25 g VIII
II	-	1,0 0,25 g VIII	1,2 0,30 g VIII+	1,5 0,35 g VIII-IX
III	-	1,5 0,35 g VIII-IX	1,7 0,40 g IX-	2,0 0,45 g IX

Dans ces règles PS 92, le coefficient sismique horizontal est de la forme :

$$\sigma = a_N R(T) \cdot \tau \cdot H$$

- où a_N est l'**accélération nominale résultant de la réglementation** ou de l'étude de l'aléa sismique régional.
- $R(T)$ **réponse de la structure en fonction de sa période** ; l'ensemble des valeurs $R(T)$ pour une valeur donnée d'amortissement et pour T variable, constitue le spectre de réponse de la sollicitation sismique.
- τ **coefficient d'amplification topographique**
- H **ensemble de paramètres dépendant uniquement de la structure** (répartition des masses, ductilité, ...)

Le coefficient $R(T)$ dépend de la nature géotechnique du site. A cette fin, l'AFPS distingue quatre sites définis par :

- Site S0 : sol rocheux ou sol de bonne caractéristiques mécaniques sur une épaisseur inférieure à 15m,
- Site S1 : sol de bonne caractéristiques mécaniques en épaisseur supérieure à 15m ou sol de caractéristiques mécaniques moyenne en épaisseur inférieure à 15m,
- Site S2 : sol de caractéristiques mécaniques moyennes en épaisseur comprise entre 15m et 50m ou sols de caractéristiques médiocres en épaisseur inférieure à 10m,
- Site S3 : sol de caractéristiques mécaniques médiocres en épaisseur comprise entre 10m et 100m.

Les critères d'identification et de classification des sols sont précisés figure 10. Le paramètre le plus caractéristique du comportement mécanique du matériau, vis-à-vis du phénomène de modification du signal vibratoire, est la **vitesse de propagation des ondes de cisaillement V_s** . Malheureusement, ce paramètre n'est généralement pas mesuré, faute de moyens, en de nombreux points de la zone faisant l'objet du microzonage. Ce sont alors les mesures du module pressiométrique et de la pression limite, qui sont le plus couramment utilisées.

Les spectres de réponse réglementaires, normalisés, correspondant à chacun des quatre sites, sont présentés figure 11.

Figure 10

PARAMETRES D'IDENTIFICATION DES SOLS
(d'après recommandations AFPS 90)

TYPE DE SOL		Pénétrô- mètre Statique :	SPT Nombre de coups	Pressiomètre		Résis- tance	Densité relative	Indice de compres- sion	Vitesse des ondes de cisail- lement (m/s)	Vitesse des ondes longitudinales	
		résis- tance (Mpa)		Module (MPa)	Pression limite (MPa)	Compres- sion simple (MPa)	(%)	Cc		Sous la nappe (m/s)	Hors nappe (m/s)
ROCHERS	Rochers sains et craies dures			> 100	> 5	> 10			> 800		> 2500
a/ Sols de bonne à très bonnes résis- tance mécanique	Sols granulaires compacts	> 15	> 30	> 20	> 2		> 60		> 400	> 1800	> 800
	Sols cohérents (argi- les ou marnes dures)	> 5		> 25	> 2	> 0,4		< 0,02			> 1800
b/ Sols de résistance mécanique moyenne	Rocher altéré ou fracturé			50 à 100	2,5 à 5	1 à 10			300 à 800		400 à 2500
	Sols granulaires moyennement compacts	5 à 15	10 à 30	6 à 20	1 à 2		40 à 60		150 à 400	1500 à 1800	500 à 800
	Sols cohérents moyen- nement consistants et craies tendres	1,5 à 5		5 à 25	0,5 à 2	0,1 à 0,4		0,02 à 0,10			1000 à 1800
c/ Sols de faible résistance mécanique	Sols granulaires lâches	< 5	< 10	< 6	< 1		< 40		< 150	< 1500	< 500
	Sols cohérents mous (argiles molles ou vases) et craies altérées	< 1,5	< 2	< 5	< 0,5	< 0,1		> 0,10			

Le coefficient d'amplification topographique, défini dans les Recommandations AFPS90, est conventionnellement déterminé à partir des caractéristiques du profil en long de la ligne de plus grande pente. Il vaut (figure 12) :

$$\tau = 1 + 0.8 (I - i - 0.4) \text{ avec } 1.0 \leq \tau \leq 1.4$$

sur le tronçon BC du versant défini par la longueur $b = \text{minimum de } \left[2OI, \frac{H+10}{4} \right]$

où I et i sont respectivement les pentes aval et amont de la pente. Il se raccorde linéairement à la valeur 1 en A tel que $a = H/3$ et en D tel que $c = H/4$.

L'objectif du microzonage consiste alors à déterminer les paramètres $R(T)$ et τ qui ne dépendent que des données de site.

A cette fin, la méthode de niveau A d'évaluation et de cartographie de l'aléa que nous proposons ici, permet de définir, pour chaque maille du modèle numérique discrétisé, à quel type de site S0, S1, S2 ou S3 elle appartient.

Pour cela, on procède en chaque maille du modèle à un différentiel de tous les MNT géotechniques, qui permet d'extraire du modèle géotechnique 3D, la configuration géotechnique, à l'aplomb de chaque maille, caractérisée par le nombre et l'épaisseur des différentes couches ainsi que par les caractéristiques géomécaniques de chacune.

Par une succession de **tests logiques** (AND, OR, IF) sur l'épaisseur et sur les valeurs des caractéristiques géotechniques de chaque couche, conformément aux critères de classification des types de sol de l'AFPS (rocheuse, a, b ou c), on attribue à chaque maille une valeur de site S0 à S3, qu'il suffit ensuite de cartographier.

En fonction des sites identifiés, il faut finalement se référer aux PS92 ou recommandations AFPS90 pour choisir la forme du spectre de réponse correspondant (figure 12), utilisable pour le dimensionnement de nouvelles structures.

4.6.2. Étude de niveau B : Méthode simplifiée et cartographie de To et Ao

Il s'agit, dans ce cas, d'évaluer quantitativement, pour les configurations correspondant à des contrastes de rigidité verticaux, **les amplifications du mouvement sismique et la bande de fréquence qui leur est associée.**

Figure 11

Spectres de réponse élastiques des sites S0, S1, S2 et S3 (règles PS 92).

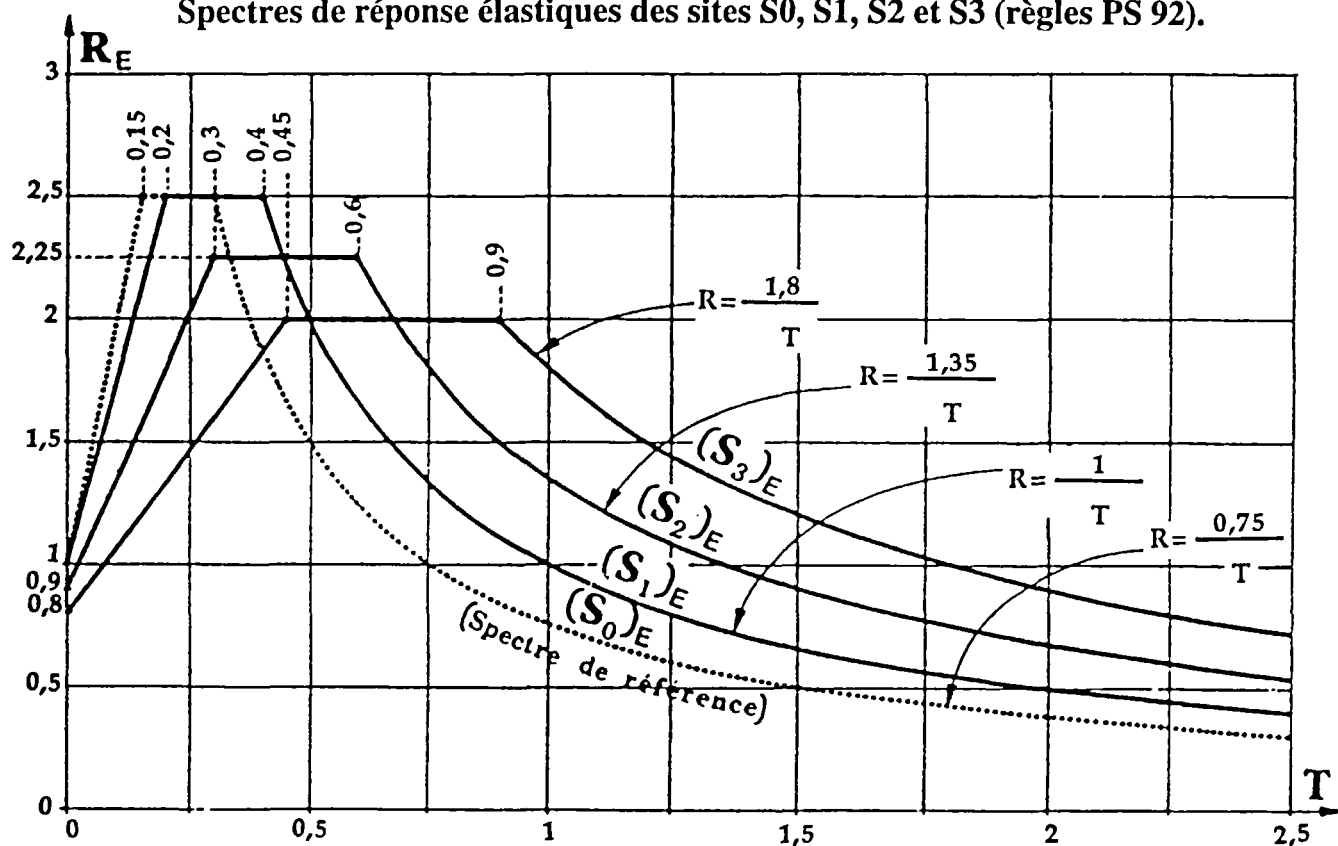
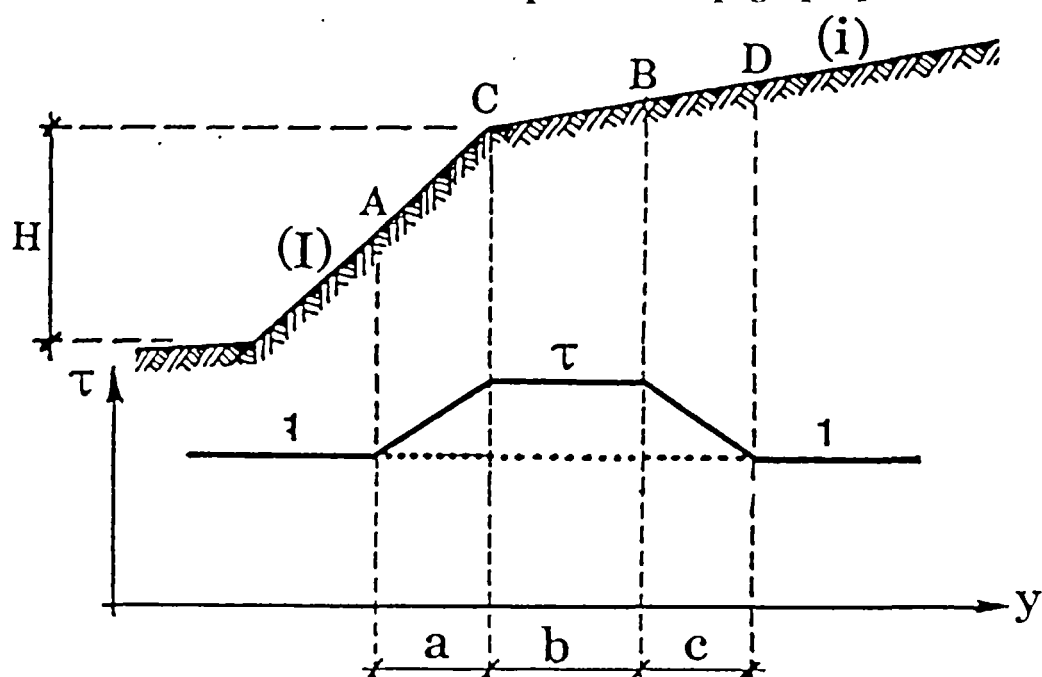


Figure 12

Détermination du coefficient d'amplification topographique (règles PS 92).



L'objet de la méthode est de déterminer la période propre T_0 de la couche de sol et l'amplification correspondante A_0 , puis de cartographier ces deux quantités. L'effet de l'amplification se traduit généralement par des résonances à certaines fréquences (fondamentales et harmoniques), associées à une fonction de transfert du type de celle représentée sur la figure 13.

La méthode simple proposée est fondée sur un modèle 1D, elle consiste à assimiler localement le sol à un milieu multicouche, en stratification plane.

Dans le cas d'une couche unique (figure 14) d'épaisseur H_1 , de masse volumique ρ_1 , de vitesse d'onde de cisaillement V_{s1} et d'amortissement β_1 surmontant un substratum de caractéristiques ρ_2 , V_{s2} , la période propre et l'amplification sont données par :

$$T_0 = 1/F_0 = \frac{4H_1}{V_{s1}}$$

$$A_0 = \frac{1}{q + \frac{\pi}{2}\beta_1} \quad \text{où} \quad q = \frac{\rho_1 V_{s1}}{\rho_2 V_{s2}}$$

Dans le cas d'un profil de sol stratifié à n couches, on a utilisé pour évaluer la période propre une moyenne pondérée des densités et rigidités de chaque couche :

$$T_0 = 4H \sqrt{\frac{\bar{\rho}}{\bar{G}}}$$

avec ; $\bar{G} = \sum_{i=1}^N G_i H_i / H$; $\bar{\rho} = \sum_{i=1}^N \rho_i H_i / H$

Cette méthode conduit à une très légère surestimation moyenne de 5% et une précision d'environ 30%.

Dans le cas du multicouche, il est en revanche plus délicat d'estimer simplement l'amplification A_0 . Un ordre de grandeur très approximatif est cependant obtenu en appliquant la formule valable pour le monocouche, et en prenant pour rapport d'impédance la valeur relative aux formations les plus superficielles vis-à-vis du substratum et une valeur moyenne de l'amortissement.

Toujours en procédant par différentiel de MNT et en appliquant, pour chaque maille, les formules ci-dessus, la mise en oeuvre de cette méthode conduit à la production de deux cartes: celle des fréquences propres (ou périodes propres) et celle des amplifications.

4.6.3. Étude de niveau C : Méthodes plus complexes : instrumentation et modélisation numérique

De telles méthodes plus coûteuses que les précédentes conduisent néanmoins à des résultats plus exacts : elles visent à estimer directement la fonction de transfert $H(f)$ (cf. fig. 13) du site, soit à partir d'expérimentations de terrain (étude du bruit de fond, enregistrements de la petite sismicité locale et régionale, enregistrements de mouvements forts), soit à partir de modèles théoriques ou numériques.

a) Approche expérimentale : application à l'agglomération de Fort-de-France

Au cours du printemps 1992, une expérimentation de terrain effectuée en collaboration avec l'Institut de Physique du Globe de Paris, a permis d'acquérir des enregistrements de séismes locaux et régionaux, en des sites choisis d'une part sur la base des résultats de 1991, du microzonage de l'agglomération de Fort-de-France, afin de caler les méthodes théoriques aux enregistrements réels, et d'autre part, sur d'autres sites présentant des particularités structurales ou topographiques, permettant ainsi d'étendre de façon plus large ce microzonage.

La méthode consistait à installer des sismomètres et accéléromètres en différents sites correspondant aux zones présentant une réponse sismique homogène, établies par le BRGM en 1991 (GODEFROY et al., 1991), et à étudier les rapports spectraux entre les enregistrements effectués en ces différents sites et ceux effectués sur deux sites, choisis comme référence (affleurement rocheux), afin d'estimer expérimentalement leurs fonctions de transferts respectives.

Cette méthode permet, outre une estimation quantitative directe de la période propre T_0 et de l'amplification A_0 , de caler les méthodes empiriques ou numériques utilisées classiquement. Elle supprime aussi un certain nombre de handicaps relatifs à l'emploi des méthodes plus simplistes, mais ne résout pas celui lié à la non-linéarité des sols, sauf lorsque l'on a la chance d'enregistrer des mouvements forts, ce qui n'a pas été le cas lors de la campagne de 1992.

Un des objectifs appliqués de la présente étude, était précisément d'exploiter ces enregistrements, afin d'améliorer l'évaluation de l'aléa sismique local en confrontant les résultats expérimentaux, à ceux des modélisations numériques. Malheureusement, si nous avons effectivement participé au choix des sites d'implantation des instruments et à leur installation sur le terrain, il ne nous a pas été possible d'exploiter, pour l'instant, les enregistrements en possession de l'IPGP.

Leur exploitation est donc différée et assujettie à la date de parution de la publication qu'effectuera prochainement l'équipe de l'IPGP.

b) Méthodes théoriques ou numériques

Lorsque les paramètres géométriques (c'est-à-dire la structure géologique) et mécaniques sont suffisamment bien connus, les calculs de propagation d'ondes en milieu complexe permettent de prédire de façon fiable la réponse sismique des différents sites.

Figure 13
Représentation schématique du calcul d'une fonction de transfert

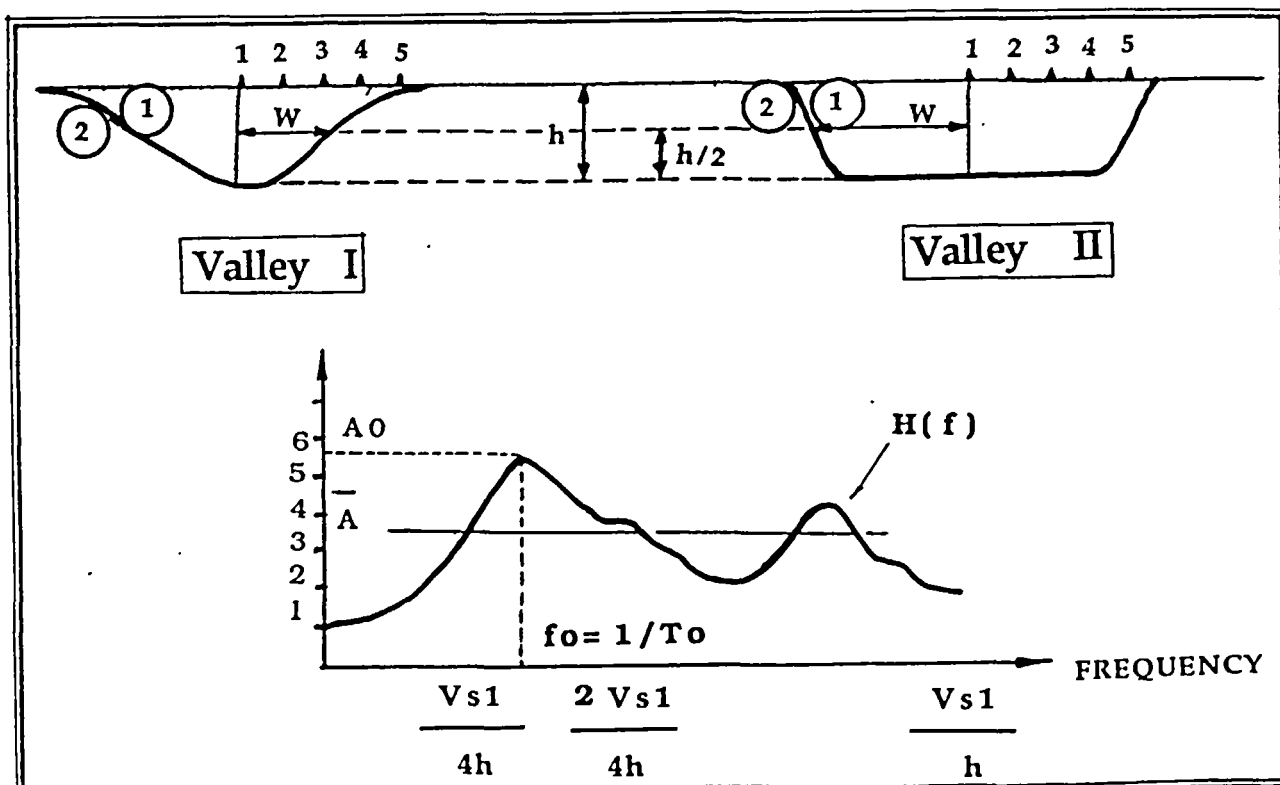
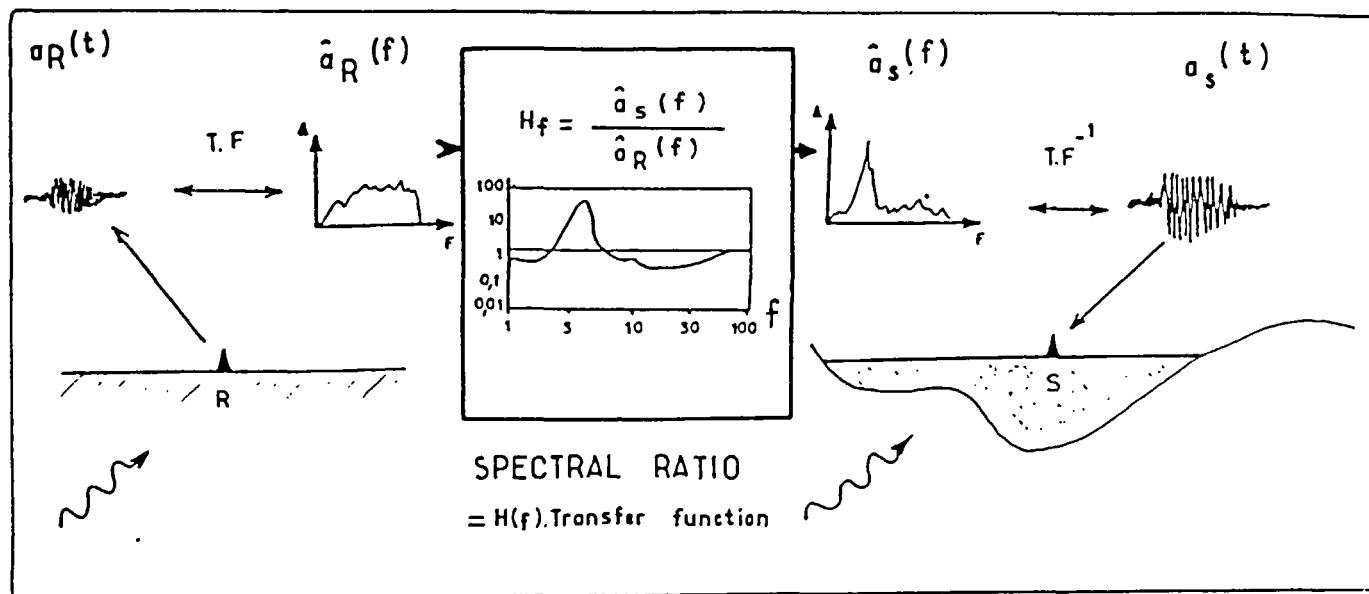
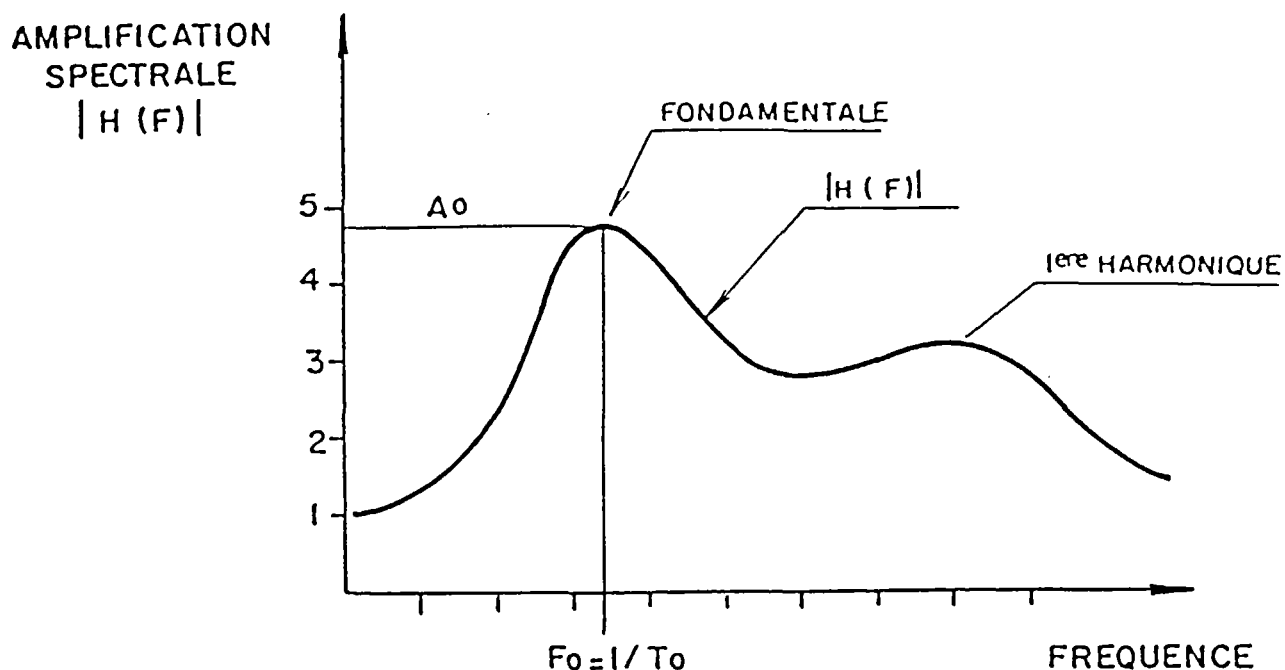
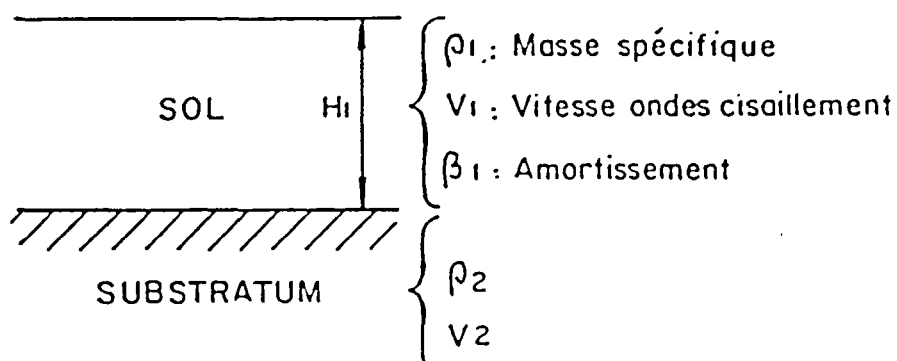


Figure 14 - Fonction de transfert

Représentation de la fonction de transfert d'un site monocouche.



Exemple : SITE MONOCOUCHE



$$T_0 = 1 / F_0 = \frac{4 H_1}{V_1}$$

$$A_0 = \frac{\rho_2 V_2}{\rho_1 V_1} \left(1 - \pi \times \beta_1 \times \frac{\rho_2 V_2}{\rho_1 V_1} \right)$$

Les modèles numériques permettent de calculer :

- la fonction de transfert locale $H(f)$ pour les modèles linéaires ;
- le spectre de réponse tenant compte des effets de site dès lors qu'on dispose d'accélérogrammes correspondant au spectre de référence au rocher.

Pour réaliser de tels calculs, on dispose du logiciel SHAKE (SCHNABEL et al., 1972) et de logiciels développés par le BRGM (GEFDYN, chaîne de calcul RNG).

Dans le cadre de cette étude, seuls des calculs 1D ont été réalisés : ils prennent en compte les caractéristiques de la colonne de sol au droit de chaque maille du modèle, et calculent la réponse sismique à une onde S d'incidence verticale. Les calculs ont été effectués en considérant d'une part un comportement des sols de type visco-élastique linéaire et d'autre part un comportement linéaire équivalent. Ils ont été mis en oeuvre, pour toutes les configurations géotechniques suffisamment représentatives du site.

Les fonctions de transfert et les spectres de réponse ainsi calculés ont alors été comparés, puis regroupés pour ne retenir finalement qu'un nombre limité de spectres présentant les mêmes caractéristiques fréquentielles, définissant ainsi un nombre limité de zones présentant une réponse sismique homogène, à l'intérieur desquelles les règles de construction sont identiques.

5. DEVELOPPEMENTS INFORMATIQUES

5.1. RAPPEL DES OBJECTIFS

La méthodologie développée vise:

- la **modélisation géotechnique tridimensionnelle du sous-sol** à partir de laquelle pourront être effectués des calculs forfaitaires ou théoriques des effets de site ;
- la mise au point d'une **méthode informatisée d'identification et de cartographie des zones présentant une réponse sismique homogène.**

La chaîne de calcul permet de manipuler la topographie de la zone d'étude et les différents horizons géotechniques du site.

Elle fonctionne entièrement sur micro-ordinateur avec un environnement MS-DOS et la plupart des programmes peuvent être manipulés par un utilisateur non averti: seule l'étape d'interprétation des sondages géotechniques nécessite l'intervention d'un géotechnicien spécialisé.

Elle permet notamment:

- la création d'un MNT topographique ;
- la création d'un modèle numérique des interfaces géotechniques ;
- la génération de coupes géotechniques et l'extraction des caractéristiques géomécaniques correspondantes ;
- l'évaluation des effets de site suivant les approches de niveau A, B ou C;
- la cartographie de l'aléa.

5.2. CONFIGURATION MATÉRIELLE ET LOGICIELS NÉCESSAIRES

Les programmes fonctionnent sur tout micro-ordinateur possédant au moins un microprocesseur i80386. L'adjonction d'un coprocesseur mathématique est obligatoire. Une carte graphique EGA, VGA ou compatible est nécessaire ainsi qu'une tablette à numériser. Le système d'exploitation doit être MS-DOS (la version 5.0 ou plus est recommandée). Il est aussi recommandé de disposer d'au moins 8 Mo de mémoire centrale et d'un disque dur de grande capacité.

Un certain nombre de modules sont issus du logiciel GEOSURF (BOURROUSSE et SEDAN, 1992). Par ailleurs, certains traitements nécessitent l'utilisation de logiciels commercialisés : WINDOWS, SURFER, INTERGRAPH/MICROSTATION et MAPVIEWER. Dans sa version actuelle, la chaîne de calcul ne nécessite pas obligatoirement d'avoir recours à des logiciels trop coûteux (ARCINFO, SYNERGIS), ni l'emploi d'une station de travail.

5.3. INSTALLATION DES LOGICIELS

L'installation se fait de façon automatique grâce au programme INSTALL.EXE situé sur la disquette PROGRAMME 1.

Procédure à suivre :

- vérifier que le disque dur où va se faire l'installation possède environ 1MO de place libre,
- insérer la disquette PROGRAMME 1 dans le lecteur A: puis taper

A:INSTALL *unité1 unité2*

unité1 sera par exemple le lecteur A, unité2 sera par exemple C:

Le répertoire \MZ (pour microzonage) sera créé sur la racine du disque dur destinataire et les fichiers nécessaires y seront copiés.

Le fichier de démarrage AUTOEXEC.BAT peut être modifié par l'ajout du répertoire MZ dans le "PATH" et par l'instruction APPEND unité:\MZ.

- pour finaliser l'installation il vous suffira d'installer les logiciels décrits en 5.2.

Pour les applications, il est conseillé de créer un répertoire de travail quelconque, plutôt que de travailler dans le répertoire \MZ où sont installés les programmes de base (tous les modules sont accessibles directement).

5.4. STRUCTURE ET CONSTRUCTION DU MODÈLE GÉOTECHNIQUE

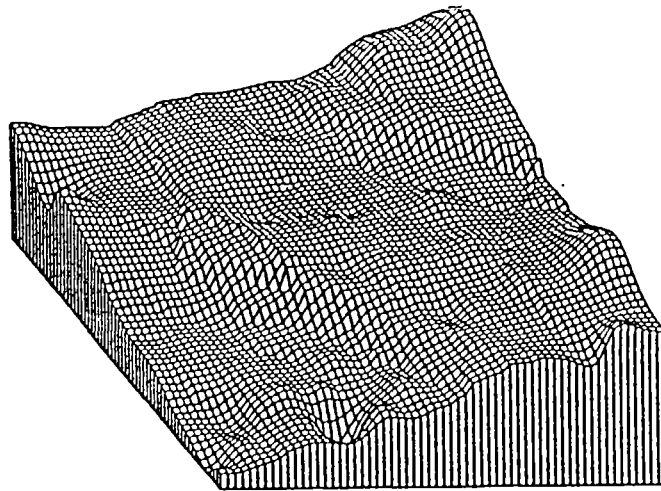
Avertissement: le modèle géotechnique 3D possède une structure maillée définie en chaque maille élémentaire. Il peut ainsi satisfaire à la modélisation de la plupart des structures géotechniques rencontrées dans le cadre des études de microzonage sismique. Cependant, la méthode peut encore poser certains problèmes dans les zones où les reliefs sont très tourmentés, ou pour les zones faillées.

On distingue:

(1) LE MODÈLE NUMÉRIQUE TOPOGRAPHIQUE

Le modèle numérique de terrain (MNT) topographique représente la surface altimétrique du sol (figure 15). Chaque point est identifié par ses coordonnées X et Y exprimées en kilomètres et son altitude Z exprimée en mètres.

Il correspond à une matrice de points cotés en XYZ. Cette matrice est souvent carrée (mais pas obligatoirement). Ses dimensions en X et Y permettent de calculer le nombre total de mailles. A titre d'exemple, sur une zone de 4 km par 5 km, il faut un modèle à 200000 mailles pour travailler à un pas de 10 m.

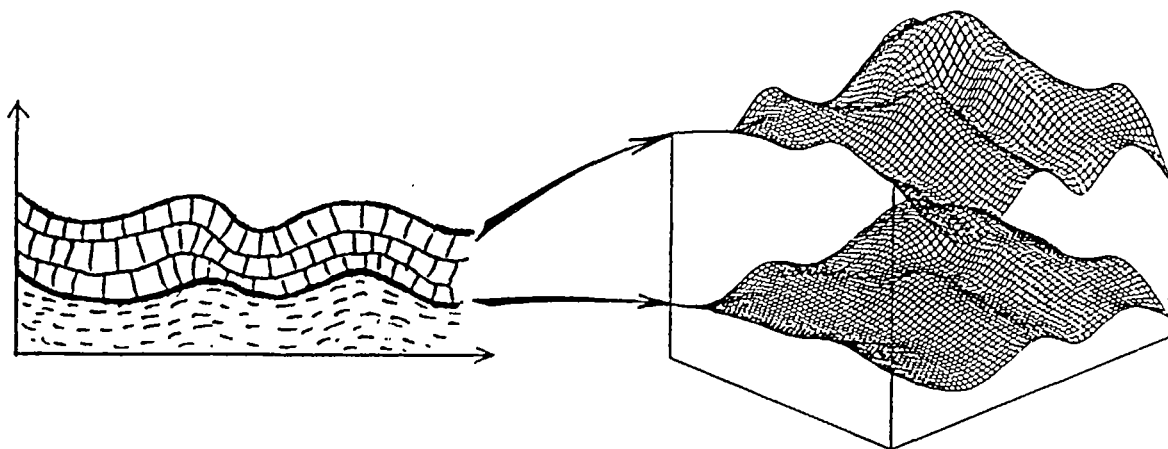


Modèle numérique topographique.

Figure 15 -

(2) LE MODÈLE NUMÉRIQUE GÉOTECHNIQUE

Dans le cas d'un modèle composé de plusieurs couches géotechniques, seules les interfaces séparant deux formations sont représentées (figure 16).



Coupe géotechnique

Modèle géotechnique

Figure 16

Modèle numérique géotechnique.

Ces différentes interfaces sont entièrement indépendantes les unes des autres et leur création aboutit à autant de matrices que d'interfaces géotechniques. Chaque matrice d'interface présente la même structure que celle qui modélise la topographie et chaque point d'interface est représenté par un triplet (X,Y,Z).

On imagine facilement la quantité de données manipulées par un modèle; ainsi pour un modèle comportant cinq couches différentes, quatre interfaces géotechniques seront nécessaires plus le niveau topographique supérieur, ce qui équivaut à 1 200 000 points cotés soit environ 4 Mo . L'importance des mémoires de masse des machines utilisées et l'optimisation des traitements sont primordiaux pour obtenir des temps de réponse corrects. A cette fin, nous avons volontairement utilisé une maille de 30 m de coté, qui, tout en optimisant les temps calcul, n'altérerait pas trop la précision des résultats, et restait de toute façon compatible avec le nombre et la nature des données de base disponibles.

5.4.1. Création du MNT topographique à partir d'un fond de l'IGN

Le MNT topographique peut provenir d'une source extérieure, comme ceux disponibles directement auprès de l'IGN. Très souvent cependant, l'utilisateur sera amené à digitaliser lui-même ses données pour restituer la surface topographique ou les interfaces géologiques. Après acquisition d'un fond topographique à l'échelle de travail voulue (1 : 10 000) et sur support stable, la création du MNT s'est faite de la manière suivante (figure 17):

5.4.1.1. Digitalisation sous intergraph

INTERGRAPH/MICROSTATION permet de digitaliser les données, le document de base étant une carte topographique. Il est ainsi possible de saisir des courbes avec identifiant (Z) ou des points cotés. Les données ainsi saisies seront stockées dans un fichier d'extension .DGN qui sera par la suite transformé en fichier ASCII.

La structure de ce fichier sera alors constitué d'une ligne par point saisi :

X	Y	Z	code
X	Y	Z	code
X	Y	Z	code
etc...			

code peut prendre la valeur:

Début d'une courbe de niveau :	1
Continuation de courbe de niveau :	2
Point coté :	4

Ce programme de digitalisation gère les tablettes à numériser de marque BENSON, OCE, SUMMAGRAPHICS, etc...

5.4.1.2. Procédure

Avant de se lancer dans la digitalisation, l'utilisateur devra installer les fichiers suivants sur le disque dur:

- fichier **Z.UCM** à installer dans **C:\USTATION\UCM** ; il s'agit d'une commande utilisateur permettant la saisie des courbes dans un fichier 3D;
- fichier **SDMAPM3D.DGN** à installer dans **C:\USTATION\DATA**; qui constitue le fichier intergraph 3D de référence.

Ces deux fichiers sont contenus dans la disquette PROGRAMME 1.

a) Pour lancer la digitalisation, taper :

MCE puis < entrée > qui lance le logiciel microstation

choisir :

Utilities

File Creation Utilities

Create 3D Design File

Metric Mapping Setup

b) Saisie des courbes de niveau

Digitalisation proprement dite :

- calage graphique, en tapant au clavier :

- Dig Par
- Dig Set
- Set def (entrer au minimum 4 points de coordonnées : cliquer le premier point, puis entrer au clavier xy = , etc.)
- Window center
- DP=-1000,1000

- digitalisation des courbes avec entrée manuelle du Z :

- taper la commande uc=z (retour c)
- entrer la valeur de l'altitude de la première courbe de niveau, digitaliser la courbe, puis répéter l'opération autant de fois qu'il y a de courbes ou de points cotés

Conseil pratique: pour les courbes de niveau fermées, veiller à bien fermer la courbe sur le point de départ. Par ailleurs éviter d'avoir recours à la commande modify element après digitalisation d'une courbe fermée. Pour visualiser les courbes digitalisées, se placer en view=top ou view=bottom, sous Intergraph.

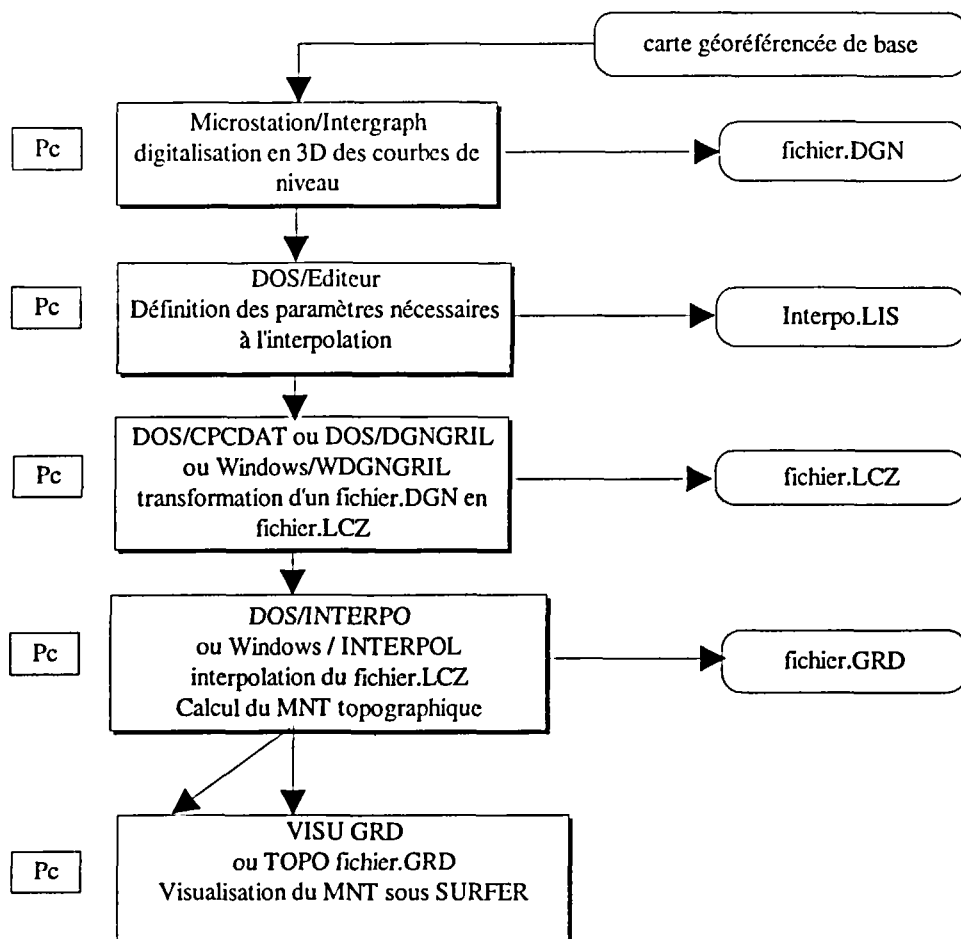


Figure 17 - Procédure de création d'un MNT topographique

5.4.1.3. Interpolation des données

Que ce soit pour la fabrication de la matrice (ou grille) "surface topographique" ou pour les matrices constituant les interfaces géotechniques, le principe est le même. On part d'un nombre N de points, dits de contrôle pour lesquels on connaît la valeur de l'altitude, et qui sont ensuite interpolés pour nourrir les mailles du modèle.

L'interpolation est un procédé qui à partir d'un semis de points répartis de façon discontinue réalise une série maillée continue. Le calcul d'une valeur se fait à partir des données disponibles en des points voisins.

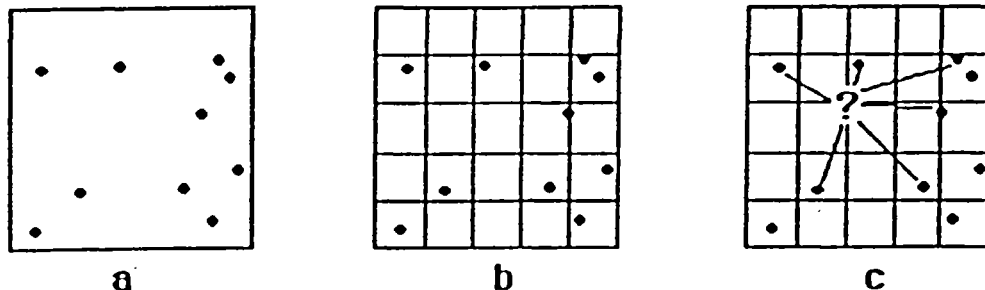


Figure 18

a = Points de contrôle.

b = Grille conceptuelle qui va servir de trame à l'interpolation.

c = Chaque noeud de la grille (intersection des lignes et des colonnes) est doté d'une cote basée sur la valeur d'un ou plusieurs points voisins.

Principe de l'interpolation.

Plus le nombre de points de contrôle est grand, plus la qualité du MNT interpolé sera bonne. **Il est donc essentiel d'avoir de bonnes données de base** et en nombre suffisant. A titre indicatif, les test effectués dans le cadre de cette étude, montrent qu'il faut au moins 8 % de mailles renseignées pour obtenir un résultat satisfaisant.

Les modules utilisés sont les suivants :

- DGNGRIL.EXE :

Ce module utilise en entrée le fichier de paramètre INTERPO.LIS dont la constitution est décrite plus loin et le fichier DGN3D et fabrique en sortie un fichier destiné à l'interpolation. Il remplit la même fonction que CPCDAT (sous DOS), mais présente l'avantage de tourner sous WINDOWS.

- CPCDAT.EXE :

CPCDAT permet de générer à partir des fichiers .DAT un fichier discrétisé pour l'interpolation; il distribue l'ensemble des points du fichier de base dans une matrice de taille donnée; le fichier INTERPO.LIS doit être mis à jour avant ce module. Après l'interpolation des données, un fichier grille GRD sera produit.

- INTERPO.EXE:

Ce module permet d'interpoler la grille et de créer le fichier MNT.GRD que l'on peut visualiser sous SURFER en lançant la commande TOPO MNT . Il existe également en version WINDOWS, qu'il est préférable d'utiliser lorsque le nombre de mailles excède 200 000. Le fichier GRD peut également être visualisé à l'écran avec le module VISUGRD.

5.4.1.3.1. Méthode d'interpolation par courbure minimale

La première étape consiste en l'identification des mailles qui contiennent un point de donnée original. Les valeurs initiales affectées à une maille ne seront jamais modifiées. Ensuite, la méthode applique un calcul itératif sur la surface maillée, l'objectif étant d'obtenir un lissage entre les points connus. Chaque segment est recalculé jusqu'à ce que la valeur des changements successifs soit inférieure à la valeur absolue de l'erreur maximale, ou que le nombre limite d'itérations soit atteint.

La valeur maximale de l'erreur ainsi que le nombre d'itérations sont fixés par l'utilisateur. Des valeurs raisonnables sont de l'ordre de 1% à 0,1% du relief total de l'échantillon. Un pourcentage plus petit donnera une surface très lisse mais demandera un nombre d'itérations très important. D'autres méthodes d'interpolation (celles du logiciel surfer, peuvent par ailleurs être utilisées.

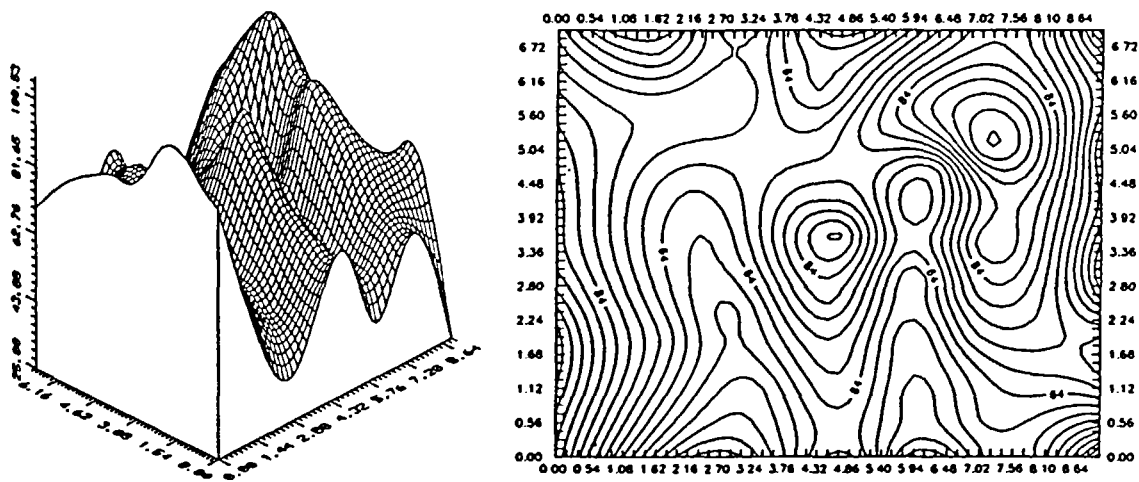


Figure 19 - Modèle interpolé - Digitalisation initiale

5.4.1.3.2. Interpolation des données via INTERPO

Le fichier INTERPO.LIS dirige l'interpolation, du type courbure minimale décrit ci-dessus. La première étape consiste à générer ce fichier dont la structure indique :

- nom du fichier contenant les points originaux (fichier .CPC issu des modules DGNGRIL ou CPCDAT)
- nom du fichier intermédiaire (points répartis dans la matrice d'interpolation: fichier .LCZ) ;
- nom du fichier grille résultat (fichier .GRD) ;
- Xmin Ymin Xmax Ymax ;
- Xmin Ymin Xmax Ymax ;
- Nombre de lignes Nombre de colonnes Nombre d'itérations Valeur moyenne.

Les coordonnées extrêmes sont répétées deux fois.

La valeur moyenne est une valeur qui permet d'accélérer les calculs lors de l'interpolation, en lui donnant la valeur de l'altitude moyenne estimée du MNT.

Exemple de fichier INTERPO.LIS ayant servi à l'intégration du jeu d'essai du LAMENTIN.

INTERPO.LIS

MZMQE.DGN			
MZMQE.LCZ			
MZMQE.GRD			
712.0	1612.0	722.0	1618.0
712.0	1612.0	722.0	1618.0
150	250	50	50

Après avoir lancé le module CPCDAT ou DGNGRIL, on a en sortie une série de mailles qui possèdent (ou non) une valeur Z. Le fichier obtenu (.LCZ) a le format suivant: n° de ligne, n° de colonne, valeur de Z. Il ne reste plus qu'à réaliser une interpolation grâce au module INTERPO pour affecter aux mailles non renseignées une valeur Z.

NB. L'interpolation doit être réalisée indépendamment pour chacune des interfaces du modèle.

5.4.2. Construction du modèle géotechnique 3D

La constitution d'un modèle géotechnique tridimensionnel nécessite de créer un modèle numérique de terrain pour chacune des interfaces géotechniques puis de travailler par différentiels de MNT.

L'enchaînement logique des opérations est le suivant (décrit figure 17) :

- saisie des données des sondages interprétés ;
- réalisation des profils topographiques à partir du MNT topographique ;
- réalisation des profils géotechniques ;
- digitalisation des profils géotechniques ;
- création des fichiers (.DAT) pour l'interpolation ;
- interpolation des MNT (un par interface) ;
- différentiel d'altitude des MNT : obtention du modèle 3D ;
- contrôle du modèle 3D ;
- exploitation du modèle 3D.

5.4.2.1. Acquisition de données supplémentaires: méthode des profils

On ne dispose généralement pas de suffisamment de sondages (qui le plus souvent ne sont pas uniformément répartis sur la zone d'étude), pour permettre une interpolation satisfaisante précise du MNT de l'interface géotechnique considérée.

Pour palier à ce problème, la méthode proposée est basée sur la réalisation d'une série de profils (ou coupes) à travers la zone considérée, sur lesquels seront réalisées de manière manuelle des coupes géotechniques. Le nombre de profils dépend d'une part de la complexité de la zone d'étude et d'autre part de la qualité ou précision de la restitution que l'on souhaite obtenir : plus la géométrie des formations est compliquée, plus le nombre de profils doit être élevé, pour espérer restituer numériquement un modèle proche de la réalité.

A titre d'exemple, lorsque qu'on travaille avec un maillage de 30 mètres de côté, un espacement de 200 à 250 mètres entre profils est suffisant. Il appartient à l'utilisateur, au vu des premiers résultats, de compléter éventuellement par d'autres profils dans les zones qui le nécessitent. Les profils peuvent tous être réalisés suivant la même direction. Il est cependant conseillé de réaliser quelques profils perpendiculaires à la direction principale en veillant à ce que la configuration géotechnique soit bien évidemment identique aux points d'intersection des profils.

Dans un premier temps, les profils topographiques sont générés automatiquement par le module PROFILSL.EXE.

Ce module utilise en entrée le fichier de paramètres PARAMCPE décrit ultérieurement, et en entrée le MNT topographique.

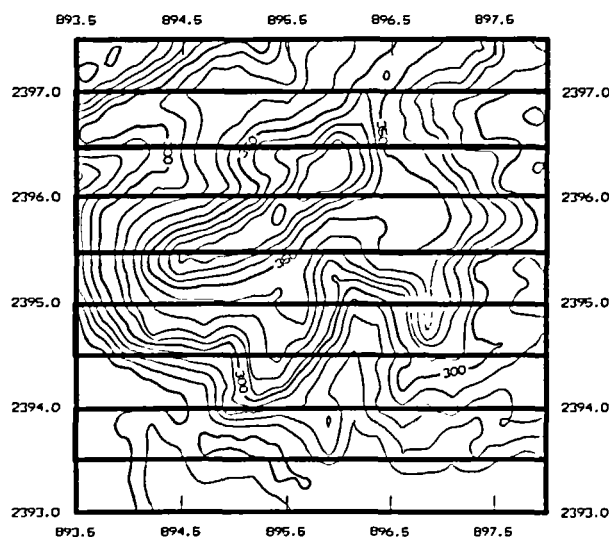


Figure 21
Génération des profils.

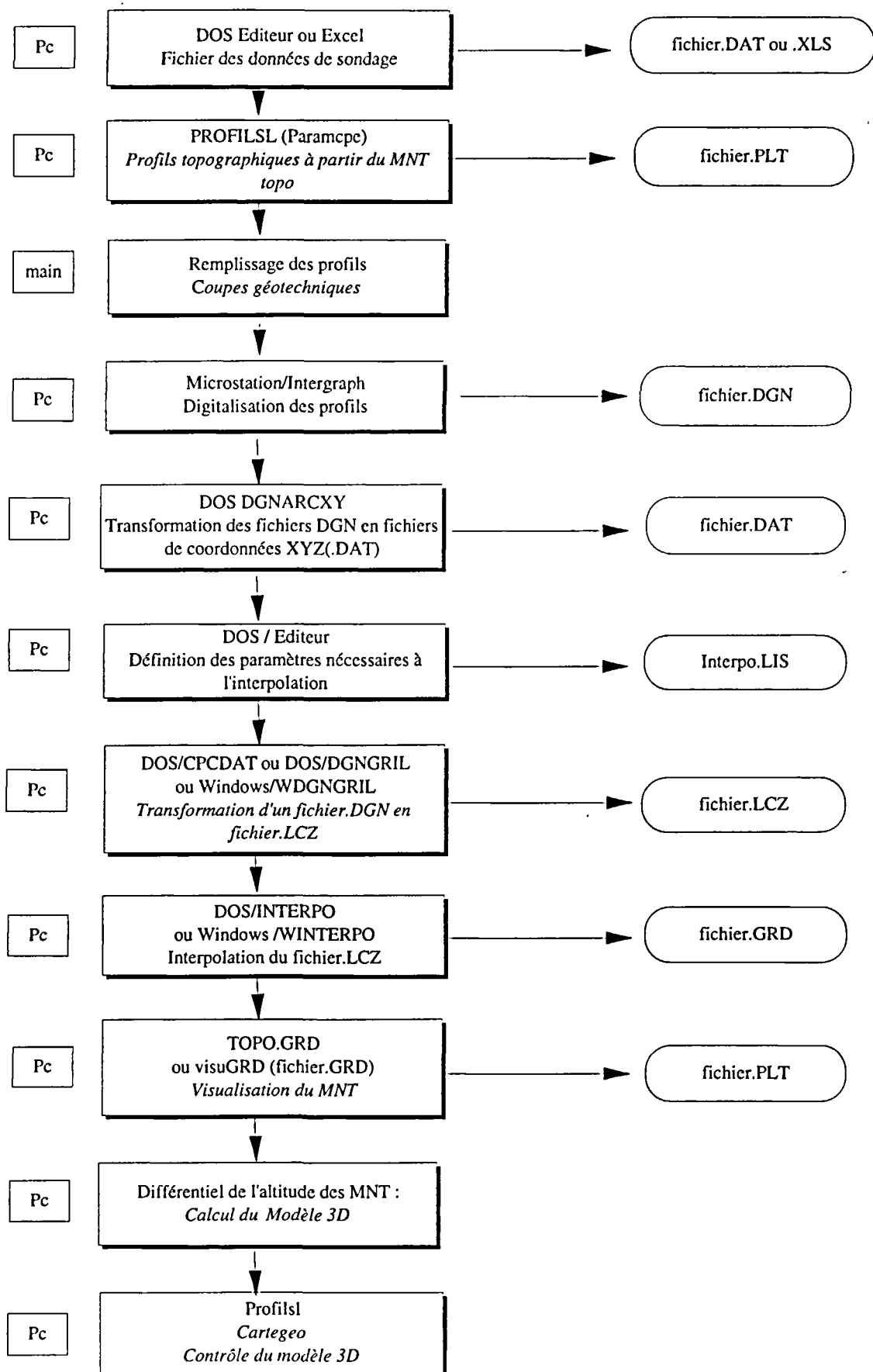


Figure 20 - Procédure de création du modèle géotechnique 3D

a) Habillage des profils

En s'aidant de l'interprétation préliminaire des informations de base, le géotechnicien habillera les différents profils en y reportant les formations géotechniques représentatives du site(cf 4.4.1):

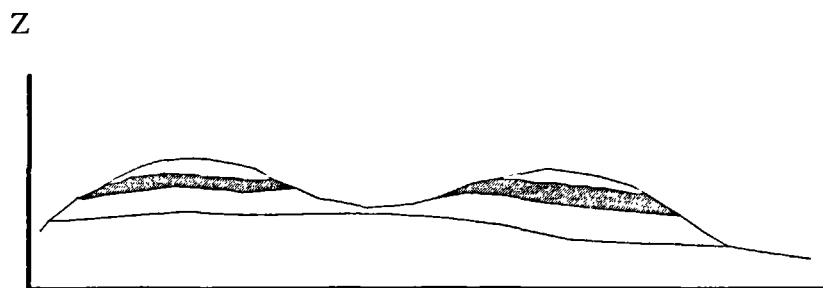


Figure 22 -
Coupe géotechnique.

Pour chaque limite de couche, il repérera un maximum de points d'iso-altitude. La base de chaque couche sera représentée par une ligne continue pour laquelle on peut lire les coordonnées X, Y et Z sur l'axe des abscisses et des coordonnées.

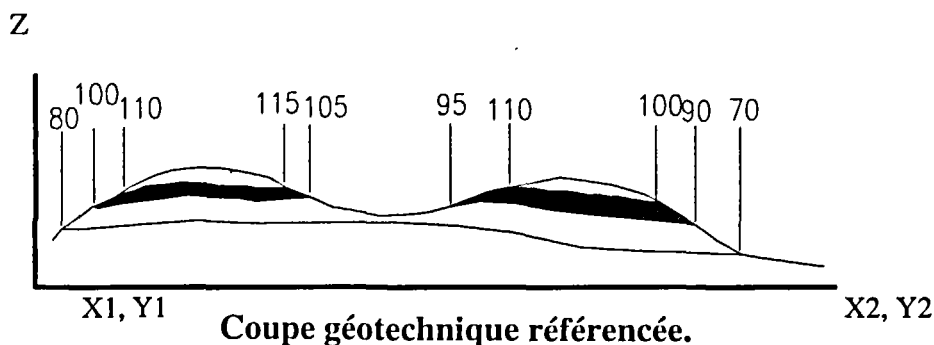


Figure 23 -

NB. Les profils peuvent être effectués le long des méridiens ou parallèles, aussi bien qu'entre 2 points quelconques du maillage.

b) Digitalisation des profils géotechniques

Cette étape consiste en la saisie des profils 2D sous Intergraph/microstation suivant la procédure :

- positionner le profil sur la table à digitaliser (profil1)
- copie matrice.dgn profil1.dgn. Le fichier matrice.dgn est contenu dans la disquette PROGRAMME 1, mais peut aussi bien être créé sous Intergraph (Create 2D design file).
- dig par

- dig set

- dans le cas où les profils sont des parallèles, entrer 4 points de coordonnées x,z, z étant l'altitude reportée sur les profils ;
- dans le cas où les profils sont des méridiens, entrer 4 points de coordonnées y,z, z étant toujours l'altitude ;
- se mettre dans le niveau correspondant à la base de l'unité géotechnique considérée: lv=1 (chaque interface doit être numérisée dans un niveau spécifique) ;
- place linestring ;
- digitaliser ainsi chaque interface géotechnique, en veillant à placer chacune d'elle dans un niveau différent.

NB. ① : toute couche géotechnique appartenant à la superposition logique des unités géotechniques doit toujours être digitalisée tout le long du profil, même si on ne la rencontre pas sur ce profil : en d'autres termes si une interface n'existe pas réellement, il faut malgré tout la digitaliser, en plaçant dans son niveau, la digitalisation de la couche immédiatement supérieure. Cette procédure est d'importance primordiale, pour le bon fonctionnement ultérieur des programmes d'exploitation du modèle ; ces derniers étant basés sur un différentiel des MNT entre chaque couche. En une maille donnée, pour laquelle la couche N serait absente, le différentiel d'altitude entre la couche N-1 et la couche N donnera la valeur 0 pour l'épaisseur de la couche N en ce point.

② : chaque coupe géotechnique est digitalisée dans le même fichier DGN, en plaçant chaque interface dans un niveau différent.

Cette étape doit être répétée autant de fois qu'il existe de coupes géotechniques.

c) Traitement des fichiers DGN

A la suite de la digitalisation des profils, on se ramène à un nombre de fichiers DGN équivalent au nombre de coupes réalisées. Chaque fichier .DGN contient par ailleurs autant de niveaux qu'il existe d'unités géotechniques sur la zone d'étude.

Il s'agit alors de constituer les fichiers ASCII d'extension.DAT contenant toutes les informations X Y et Z relatives à une même interface, soit à se ramener à un nombre de fichiers équivalent au nombre d'unités géotechniques identifiées.

- 1) pour une couche donnée, lancer la commande suivante autant de fois qu'il y a de fichiers. DGN :

DGNARCXY NOMF1 NOMC 100000 LVC1 VALEUR Y (ou X)

.

.

DGNARCXY NOMFN NOMC 100000 LVC1 VALEUR Y (ou X)

où : NOMFN : nom du fichier .DGN

NOMC : nom du fichier de sortie (ex: couche1) ; extension par défaut .DAT

100000 : facteur d'unité dépendant de la configuration de Microstation (à lire dans utils setdef)

LV : numéro du level contenant les informations de la couche

VALEUR: valeur de la constante à placer dans la variable X ou Y (pour un profil réalisé suivant un méridien, X prend la valeur, en km, de la coordonnée kilométrique du méridien suivant l'axe orthonormé (des abscisses de la carte pour un modèle à 4 couches, il existe 4 interfaces, donc 4 niveaux).

- Répéter cette opération autant de fois qu'il y a de couches.
- On obtient alors autant de fichiers .DAT qu'il y a d'interfaces.

Ces fichiers .DAT doivent finalement être concaténés avec les fichiers contenant les données ponctuelles initiales, issues directement des sondages.

5.4.2.2. Interpolation des fichiers

Pour chaque interface, l'interpolation se fait de la même manière que pour le .MNT topographique.

Les fichiers .DAT remplacent simplement les fichiers .DGN dans le fichier de paramètres INTERPO.LIS.

5.4.2.3. Vérification qualitative du MNT géotechnique

MODULE : **CARTEGEO.EXE**

Comme pour tout modèle, il convient de s'assurer, lorsque celui-ci est terminé, qu'il reflète bien la réalité. Aussi, le module CARTEGEO permet de recréer la carte des formations affleurantes, en combinant les différentes grilles qui composent le modèle numérique géologique. Le résultat de ce module donne une carte topographique (grille GRD compatible avec TOPO) où les affleurements sont codés de 1 à N. Il suffit alors de comparer visuellement avec la carte géologique établie puis d'effectuer les corrections qui peuvent être nécessaires. **Le fichier PARAMGEO qui décrit l'ordre de superposition des interfaces géologiques doit être présent dans le répertoire courant. Son format est le suivant :**

PARAMGEO

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">- Nombre n d'interfaces géologiques- N lignes désignant les noms des interfaces (fichiers ".GRD") du plus récent vers le plus ancien.- N+1 intitulés décrivant les formations rencontrées. |
|--|

Exemple: MNT géotechnique du LAMENTIN

PARAMGEO

7
as
fc1
lam1
fc2
lam2
lar
sf
Argile superficielle
Formations compressibles 1
Lave altérée 1
Formations compressibles 2
Lave altérée 2
Argile
Substratum fissuré
Substratum dur

5.4.3. Outils informatiques particuliers

5.4.3.1. Modification partielle d'une grille : mise à jour et correction de la géologie de surface

Il est apparu nécessaire d'avoir recours à des outils permettant de modifier la valeur d'une grille pour une zone donnée, dans deux cas de figures : soit pour corriger ponctuellement une valeur aberrante obtenue par interpolation ; soit pour imposer, sur certaines zones, la présence d'une formation donnée, sans possibilité d'y déroger.

Ces modifications peuvent se faire maille par maille dans le logiciel SURFER (TOPO-VIEW-GRID EDIT). Cette option sera à privilégier lorsque le nombre de mailles à modifier est inférieur à 20, ou lorsque ces mailles sont éparses dans le MNT.

Cependant, pour palier à certaines erreurs liées à l'interpolation, il est possible, lorsqu'on connaît avec précision les contours des formations superficielles, de masquer les zones où l'on est certain qu'elles n'apparaissent pas.

Exemple : Remplacement d'une partie des valeurs d'une grille par les valeurs de la même partie d'une autre grille. On utilise pour cela le module BLANKED.EXE de surfer.

Il convient alors de procéder de la façon suivante :

- a) Générer le polygone qui entoure la zone à modifier; on utilisera la procédure de digitalisation sous Intergraph par exemple en veillant à placer un polygone fermé par niveau (création d'un fichier.DGN) ;
- b) A partir du fichier.DGN, constituer, le fichier.BLN comprenant toutes les zones d'affleurement grâce au module HPBLN, ou DGNARC (voir description ci-après).

Sous éditeur de texte :

- dans le fichier.BLN ajouter le chiffre 0 ou 1 aux côtés du premier chiffre du fichier, qui indique le nombre de points constituant le polygone. 0 permet de blanchir à l'extérieur du polygone inversement, 1 blanchit toute la zone contenue à l'intérieur du polygone.
- effacer la notion de pente du contour pour ne conserver que les coordonnées X et Y.

- c) Utiliser le module GRID de SURFER option Modify-Blank :

- en entrée on donnera le nom du fichier grille à modifier, et le nom du fichier contour.BLN modifié sous éditeur de texte (output format = binary).
- en sortie, on obtient une nouvelle grille ou la zone du polygone est masquée (BLANKED AREA).

- d) Lancer le module BLANKED avec en paramètre:

- le nom de la grille d'où proviennent les nouvelles valeurs,
- le nom de la grille masquée,
- le nom de la nouvelle grille résultat.

5.4.3.2. Constitution des fichiers .BLN à partir des fichiers .DGN :

1) soit créer un fichier HPGL (.000) sous Intergraph puis lancer HPBLN

On digitalise normalement les différents contours ainsi que le texte éventuel en utilisant les mêmes systèmes de coordonnées que celui des grilles. Ensuite, on place une fenêtre de sélection ("fence block") autour de la partie que l'on veut exporter, puis on effectue une sortie ("plot") en HPGL de cette fenêtre, en prenant bien soin de noter les coordonnées inférieures gauche de la "fence" ainsi que le facteur d'échelle du dessin.

La seconde étape consiste à passer ce fichier dessin (d'extension .000) au module HPBLN. HPBLN a besoin de connaître quatre paramètres:

- le nom du fichier dessin Intergraph,
- le nom du fichier habillage qui va être créé,
- les coordonnées Xo et Yo (origines de la fenêtre extraite),
- le facteur d'échelle qui a été utilisé dans Intergraph.

Le fichier ainsi produit peut être directement intégré dans SURFER.

Cette méthode est la plus efficace, car elle permet de bénéficier de toutes les fonctions de dessin et d'écriture d'INTERGRAPH; l'habillage peut donc être très précis et très complet.

2) soit lancer DGNARC nomfic.DGN puis modifier sous éditeur le fichier .BLN en conservant en entête le nombre de points suivi du code 0= masque outside ou du code 1 = masque inside.

5.4.3.3. Réalisation automatique de coupes géotechniques entre deux mailles du modèle

A partir du modèle 3D, il s'avérera nécessaire pour contrôler d'une part la validité du modèle, puis de l'exploiter de disposer d'un programme permettant d'extraire des coupes géotechniques entre 2 points quelconques du modèle.

MODULE : **PROFILSL.EXE**

PRINCIPE : Réaliser une coupe consiste à tracer la courbe des altitudes en fonction de la distance cumulée entre les points extrêmes d'un profil.

Le module PROFILSL permet de réaliser des profils automatiquement; on peut y reporter :

- une topographie.
- des interfaces géotechniques
- des limites géologiques

Il est nécessaire de modifier chaque fois, le Fichier "**PARAMCPE**" qui répertorie les différents paramètres de la coupe, sous le format suivant :

PARAMCPE

- Nom du fichier .GRD	<i>il contient la topographie du Mnt.</i>
- Nombre N1 d'ouvrages	<i>fichiers ".GRD" à visualiser sur la coupe</i>
- N1 lignes désignant les noms des fichiers(.GRD).	
- Nombre N2 d'interfaces entre les couches géologiques.	
- N2 lignes avec les noms des fichiers (.GRD) interfaces.	
- Zmini	<i>cote de base du profil (en m)</i>
- Echelle	<i>1000 correspondra à 1/1000.</i>
- Facteur d'échelle Z/X	<i>il régit l'étirement du tracé (1=normal)</i>
- Pas selon l'axe X	<i>distance entre deux graduations (en km)</i>
- Pas selon l'axe Z	<i>distance entre deux graduations (en m)</i>

Exemple :

PARAMCPE

MZQE
0
5
r
fc
ar
t
ca
-30
10000
50
1
2

Les autres paramètres nécessaires au module PROFILSL sont: le nom de fichier dessin (.PLT), les deux couples de coordonnées fixant les bornes du profil et deux caractères O(ui) ou N(on) pour lui indiquer :

- si l'on désire la légende des couleurs utilisées
- si l'on souhaite voir le profil à l'écran.

5.4.3.4. Visualisation des MNT

MODULE : TOPO.EXE

Pour obtenir de façon exhaustive toutes les informations relative à la manipulation du module TOPO de SURFER, l'utilisateur se rapportera à la notice de ce logiciel.

L'exécution des cartes est rapide, et de bonne qualité graphique. Ce module permet générer des cartes topographiques (avec des courbes de niveaux); il permet notamment de figurer :

- des cotes orientées sur les courbes, avec choix de la couleur, de la police des caractères, de la taille, du format et de la précision.
- des lignes en trait continu, en tirets, épaisses ou fines et avec des hachures indiquant la pente.

- des courbes de couleurs différentes ou des zones de couleur.
- des contours lissés ou normaux (bruts).
- des intervalles de contours réguliers ou irréguliers.
- une mise à l'échelle indépendante pour X et pour Y.
- des positionnements, depuis plusieurs fichiers, de symboles fixes ou proportionnels avec des étiquettes numériques ou de type texte. Rotation individuelle des symboles.
- des bordures de carte avec des graduations optionnelles définies par l'utilisateur, incluant des annotations numériques et des titres pour les axes.
- des blocs de texte à n'importe quel angle, couleur, police de caractère et taille.
- une édition-modification des données de la grille, déplacement, mise à l'échelle et rotation du texte, le tout à l'écran.
- des zones masquées.
- un habillage complet issu d'une digitalisation externe.

Le résultat final est stocké dans un fichier dessin (.PLT) qui satisfait aux normes graphiques PLOTCALL de Golden Software. Il s'imprimera avec le module PLOT et se visualisera avec le module VIEW.

Après le dessin d'une carte topographique réalisée avec TOPO, il est possible de stocker l'ensemble des paramètres (échelle, contours, nom du fichier habillage ...) utilisés afin de les reprendre lors du tracé d'une autre carte ayant les mêmes caractéristiques générales. Ce stockage se fait dans un fichier dit de commande et ayant l'extension ".CMD".

Pour visualiser rapidement à l'écran les fichiers.GRD, il est par ailleurs possible d'utiliser le module visuGRD qui donne une représentation surface 2D de type bitmap, suivant une palette de couleurs standard.

5.4.3.5. Réalisation de blocs diagrammes

MODULE : *SURF.EXE*

Pour obtenir de façon exhaustive toutes les informations relatives à la manipulation du module SURF de SURFER, l'utilisateur se rapportera à la notice de ce programme.

L'exécution de ces blocs diagrammes est simple. Elle donne des vues 3D très pertinentes. La vue à l'écran du bloc diagramme se fait en appuyant sur une seule touche (F2) si l'on utilise les paramètres "par défaut" du module.

SURF crée des fichiers dessin (.PLT) avec :

- des surfaces de plusieurs couleurs.
- des projections orthographiques ou en perspective.
- gestion des surfaces cachées, rotation et basculement sous n'importe quel angle.
- plages de couleurs à intervalles altimétriques réguliers ou irréguliers.
- des positionnements depuis plusieurs fichiers, de symboles fixes ou proportionnels avec des étiquettes numériques ou de type texte. Rotation individuelle des symboles.
- axes 3D avec des graduations optionnelles définies par l'utilisateur, incluant des graduation numériques et des titres.
- une mise à l'échelle indépendante pour X , Y et Z.
- des blocs de texte à n'importe quel angle, couleur, police de caractères et taille.
- déplacement, mise à l'échelle et rotation du texte à l'écran de façon interactive.
- un habillage complet issu d'une digitalisation externe.
- possibilité de lissage des surfaces.

Le résultat final est stocké dans un fichier dessin (.PLT) qui satisfait aux normes graphiques PLOTCALL de Golden Software. Il s'imprimera avec le module PLOT et se visualisera avec le module VIEW.

Après le dessin d'un bloc diagramme réalisé avec SURF, il est possible de stocker l'ensemble des paramètres (échelle, type de projection, nom du fichier habillage ...) utilisés afin de les reprendre lors du tracé d'un autre bloc ayant les mêmes caractéristiques généraux. Ce stockage se fait dans un fichier dit de commande et ayant l'extension ".CMD".

PARTIE II

APPLICATION

6. APPLICATION AU MICROZONAGE DU LAMENTIN (MARTINIQUE).

Le choix de la zone d'étude test, pour la mise en oeuvre des méthodes précédentes, s'est portée sur la plaine du Lamentin et ses environs immédiats (figure 24). Cette zone d'environ **30 km²**, constitue une extension vers le Sud-Sud-Est du précédent microzonage réalisé lors de l'étude de prévention du risque sismique aux Petites Antilles (GODEFROY et al., 1991), suivant des méthodes plus conventionnelles. Elle présentait toutes les caractéristiques justifiant une évaluation détaillée de l'aléa local, tant au niveau des effets de site que des effets induits, et les données géotechniques paraissaient suffisamment nombreuses pour espérer un résultat satisfaisant de la mise en application des nouvelles méthodes.

6.1. CONSTRUCTION DU MODÈLE GÉOTECHNIQUE 3D.

6.1.1. Contextes géologique et hydrogéologique de la zone d'étude

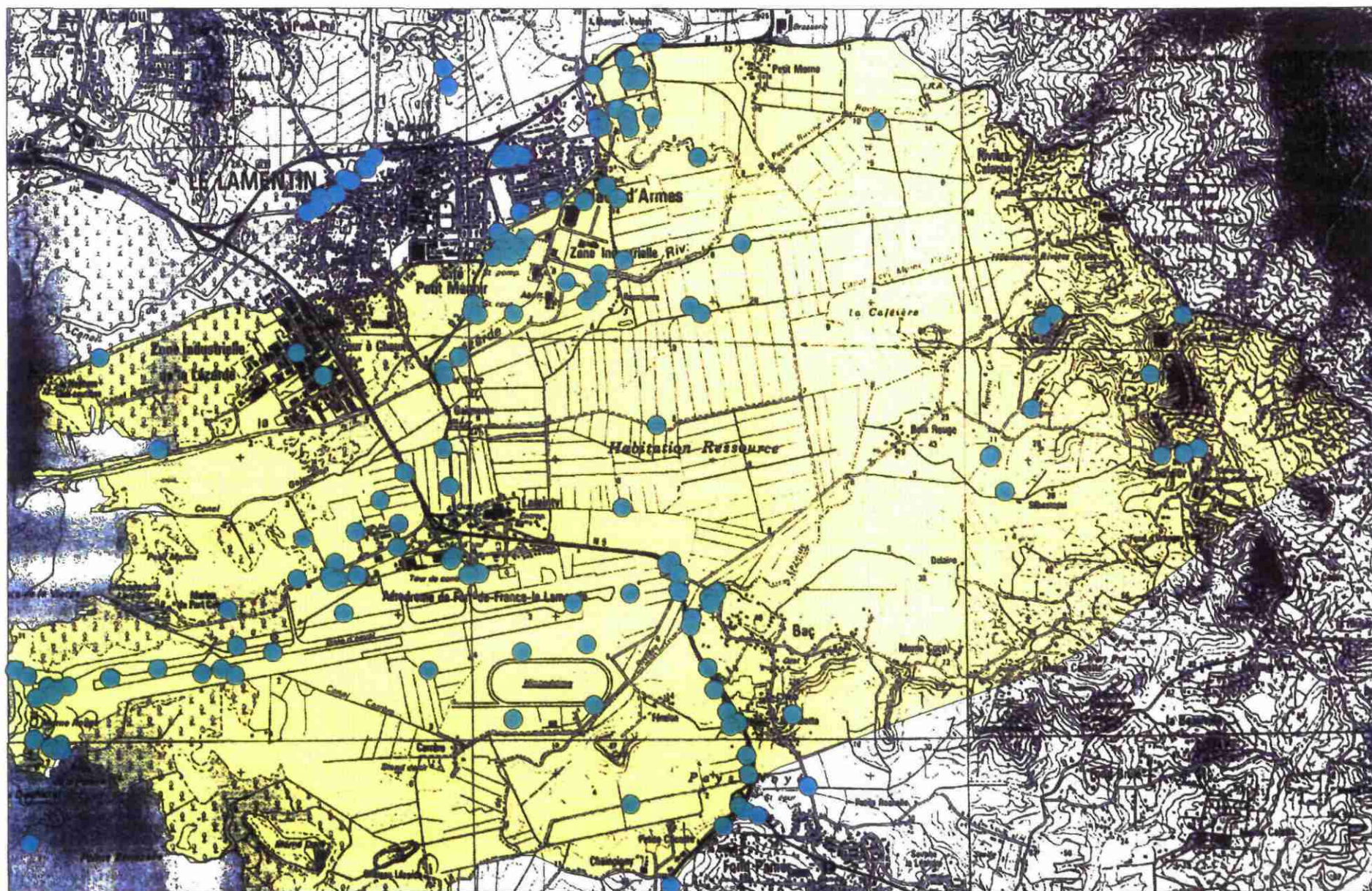
La plaine du Lamentin se situe au coeur d'une zone topographiquement déprimée, qui occupe d'ouest en est la partie centrale de l'île de la Martinique. Le territoire objet de l'étude est globalement à faible relief, excepté sa frange est/nord-est qui atteint environ +200m NGM ainsi que de petits mornes (Rouge, Doré...).

D'un point de vue géologique, le **substratum connu est constitué de formations d'origine volcanique** (ou volcano-sédimentaire) appartenant soit à la "chaîne volcanique sous-marine du Vauclin-Pitault", soit au "complexe volcanique des Carbets" ; il a une paléotopographie variée. Il peut s'agir de coulées de lave (andésite, dacite, basalte), de conglomérats, de tufs et de hyaloclastites. Ces formations sont très souvent altérées, argilisées, fissurées ou fracturées dans leur partie supérieure. Elles sont recouvertes par des zones de mangrove et des formations alluviales, à forte composante argileuse (voir tourbeuses) et compressibles.

D'un point de vue tectonique, la plaine du Lamentin constitue la zone centrale d'une structure appelée graben. Failles, activité sismique locale, manifestations hydrothermales marquées induisant une altération particulière, en sont les principales caractéristiques.

Au niveau hydrogéologique, le secteur constitue la basse vallée des plus importantes rivières de l'île (Lézarde, Blanche...). Dans sa partie ouest, il est soumis à une superposition de 2 phénomènes. Il est d'une part le siège d'une nappe libre, en relation avec la mer et soumise aux variations de la marée. Elle est proche de la surface du sol, au sein des formations superficielles alluviales et de type mangrove. Il possède d'autre part un aquifère captif dont l'exploitation pour l'alimentation en eau de Fort de France est envisagée. Cet aquifère, dont les eaux circulent au sein du substratum fracturé, est maintenu en charge par sa fraction argilisée et les niveaux superficiels, moins perméables. Dans le reste du secteur d'étude, les données hydrogéologiques sont beaucoup plus mal connues.

Figure 24 - Localisation de la zone d'étude et des données ponctuelles de sondages



6.1.2. Données de base et limites associées

Les données de base ont été mentionnées de manière générale dans les § 4.2 et 4.4. Afin de préciser le processus suivi en pratique pour leur analyse, leur structuration, ainsi que les difficultés rencontrées et les limites méthodologiques induites, l'ensemble du chapitre 6 est consacré aux résultats de la commune du Lamentin (MARTINIQUE).

Venant essentiellement de la banque de données du sous-sol et des archives documentaires du BRGM local, mais aussi de quelques renseignements supplémentaires issus de 2 autres bureaux d'études implantés localement, les informations suivantes ont été prises en compte :

- 220 sondages environ (figure 24) ;
- la synthèse géophysique de 1984 pour la recherche d'eau souterraine dans la plaine du Lamentin (profils de sismique-réfraction et électriques) ;
- 1 essai cross-hole ;
- quelques rapports d'études géotechniques.

Il apparaît rapidement que les sondages à disposition sont :

- anciens pour la plupart et donc très souvent à vocation de reconnaissance plutôt "géologique" ; de ce fait les coupes sont décrites selon une approche assez spécifique et le rattachement à des caractéristiques mécaniques classiques, disponibles en faible nombre, et plus encore à des paramètres géodynamiques, a été difficile. Ces dernières valeurs ont été calées grâce à l'unique cross-hole, qui a traversé seulement 4 des 6 unités géotechniques retenues, l'une des 4 n'ayant pu être caractérisée (difficulté de mesure dans des sols compressibles tourbeux sous nappe).
- insuffisamment profonds. Par exemple, l'épaisseur du substratum fissuré n'est renseignée que dans 20 des 220 sondages à disposition (soit 9% du total des informations) ; encore faut-il mentionner que dans la plupart de ces cas, les épaisseurs ont été trouvées non pas grâce à des sondages les donnant directement mais parce qu'ils étaient situés à proximité immédiate de profils de sismique réfraction qui eux avaient atteint une profondeur suffisante.
- souvent pas renseignés ou imprécis quant aux données de hauteur d'eau ; or ce paramètre est influent dans les calculs numériques que l'on effectue ensuite (cf. § 2.3.5.3). Dans le cas du Lamentin, on sait qu'une nappe est subaffleurante dans la plaine, en relation avec la mer, et les erreurs dans cette zone sont donc sans incidence importante. Par contre, au fur et à mesure que l'on s'en éloigne et qu'on s'approche des reliefs (globalement en suivant une direction nord-est), cette lacune est plus grave. Par ailleurs, les hauteurs d'eau en forage sont nécessaires pour l'appréciation précise des potentialités de liquéfaction.
- inégalement répartis sur l'ensemble de la zone d'étude ; les interpolations entre données de sondage en sont directement dépendantes.

Plus rarement, des incertitudes de coordonnées (X, Y ou Z) sont constatées.

Pour toutes ces raisons, l'interprétation des données de base a largement fait appel à l'expérience acquise localement et de nombreux paramètres ont dû être estimés, faute d'avoir pu être mesurés directement. Cette phase d'analyse géotechnique, essentielle, trouve ses limites dans la quantité et la qualité des données disponibles. C'est pourquoi, il faudra envisager périodiquement de la compléter à partir des nouvelles données recueillies ; l'informatisation des traitements de ces données constitue donc un avantage inhérent à la méthode nouvellement développée.

6.1.3. Structuration des données

A la lumière de la connaissance géologique et géotechnique locale, elle a été précédée par l'analyse générale des différentes données, de manière à se faire une idée globale du contexte correspondant, du mode de mise en place des formations, de leur répartition spatiale, de leurs caractéristiques...etc.

Dans cette première phase, les profils géophysiques ont été d'un apport important au sens où ils ont rapidement donné une vue synthétique, et suffisamment en profondeur, des niveaux en présence.

A partir de là, on est passé à une analyse détaillée de toutes les données à disposition qui ont été synthétisées et structurées dans un tableau récapitulatif qui donne successivement, par investigation : n° d'ordre, appellation de référence et type, coordonnées XYZ, niveau d'eau, coupe avec cotes de la base de chaque niveau géotechnique individualisé, caractéristiques mécaniques de tous types mesurées in situ et au laboratoire, remarques particulières éventuelles, dont l'indication des niveaux susceptibles de liquéfaction; les rubriques restantes sont le nom de l'unité géotechnique retenue et les caractéristiques géodynamiques qui lui sont affectées, à savoir : poids volumique, vitesse des ondes S, amortissement matériel. Ces dernières rubriques peuvent être remplies au fur et à mesure, ou une fois l'interprétation finie, selon la quantité et la qualité des mesures géodynamiques à disposition. Un souci d'homogénéisation impose en pratique d'y revenir à plusieurs reprises. A titre d'exemple, le tableau 3, présente un extrait du tableau global des données de base concernant l'altitude de chacune des interfaces géotechniques, pour des points de sondage référencés.

Tableau 3 - Extrait de la table des données de sondages sur l'altitude de chaque interface géotechnique

NUM	X	Y	ALT	AS	FC1	LAM1	FC2	LAM2	LAR	SF	CODE
19	717.020	1614.150	6.60	4.1	-4.9	-11.9			-23.4	-38.4	4
20	717.020	1614.150	7.00	4.5	-5.7	-13.0			-23.0	-38.0	4
21	717.020	1614.160	7.00	4.5	-8.5	-15.5			-23.0	-38.0	4
22	714.560	1614.240	1.00	0.01	-8.0	-16.0					4
29	716.610	1617.180	14.20	7.2		-3.8			-17.8	-50.8	4
30	718.040	1617.160	11.70	3.7		-23.3				-35.3	4
31	717.180	1616.370	11.30	8.3	-3.7	-9.7			-29.7	-58.7	4
32	716.430	1616.260	12.00	4		-23.0				-68.0	4
33	716.395	1616.660	15.00	1.0		-15.0				-50.0	4
103	714.350	1615.660	5.0			-23.0			-34.0		4
105	715.380	1615.640	3.0	1.0							4
106	713.475	1615.040	0.5	-0.5	-8.5	-24.5			-57.5	-57.5	4
107	713.100	1615.625	1.0	-7.0	-19.0	-29.0			-51.0	-51.0	4
108	714.515	1615.515	5.0	3.0		-21.0			-35.0		4
114	716.780	1614.156	6.5	4.5	-0.5	-13.5			-39.5	-53.5	4
115	716.773	1614.172	5.7	4.7	-4.3	-28.3			-40.3	-54.3	4
120	716.774	1614.267	7.4	5.4	-5.6	-28.6			-37.6	-44.6	4
125	716.730	1614.349	7.6	4.6	0.1						4
126	716.705	1614.331	6.9	5.9	-2.1						4
127	716.470	1617.110	10.0	5.0							4
128	716.450	1617.200	10.0	5.0		-10.0			-20.0	-60.0	4
178	716.420	1614.690	6.3	-0.7	-7.7	-23.7			-36.7	-93.7	4
179	716.920	1615.920	10.0	4.0		-2.0	-3.0	-15.0	-33.0	-80.0	4
180	716.850	1615.970	10.6	8.6		-19.4			-37.4	-69.4	4
181	716.905	1616.925	10.0	1.0	-2.0	-13.0			-31.0		4
182	716.190	1616.000	13.7	9.7		-22.3			-36.3	-71.3	4
183	716.260	1616.060	7.0	3.0		-34.0			-40.0		4
184	716.850	1613.940	5.0	1.4	0.01	-4.0	-12.0	-15.0			4
185	716.860	1613.990	5.0	2.0	-6.0	-15.0					4
186	716.960	1613.670	4.0	3.0	-1.0	-9.0					4
187	717.000	1613.530	4.5	2.0	0.5	-12.5	-15.5				4
188	717.080	1613.390	12.0	10.5							4
189	717.100	1613.300	11.8			-3.2					4
190	717.150	1613.320	12.2								4
191	716.980	1614.080	7.0	4.5	-19.0	-21.0					4
192	716.970	1614.120	9.0	3.0	-15.0	-20.0					4
193	719.980	1615.920	132.0			120.0					4
194	718.767	1615.029	9.0	8.0	3.0						4
195	718.755	1615.017	8.0	7.0	2.0						4
196	717.220	1613.000	2.0	-1.0		-21.0					4
197	717.210	1613.120	2.0	-1.0		-13.0					4
200	719.020	1615.320	18.0	12.0	8.0	-2.0			-12.0	-32.0	4
201	718.850	1614.800	9.0	0.5		-6.0			-22.5		4
.											

6.1.4. Unités géomécaniques retenues

Dans le cas de la zone du Lamentin, 6 unités géotechniques, représentatives de l'ensemble des couches constituant le sous-sol de la zone d'étude, ont finalement été retenues. Par ordre d'apparition en partant de la surface, (ordre fixé une fois pour toutes) ; les descriptions générales sont les suivantes, (un tableau récapitulatif avec les caractéristiques mécaniques jugées les plus représentatives est fourni ensuite).

Les formations superficielles (Fs) : cette appellation regroupe des argiles et limons correspondants, souvent légèrement surconsolidés, des remblais et terres végétales, ainsi que la partie superficielle des formations immédiatement inférieures, dont la réponse en terme de vitesse sismique est spécifique. La dominante est argilo-limoneuse mais des niveaux plus sableux peuvent être ponctuellement présents.

Les formations compressibles (Fc) : il s'agit des tourbes franches, argiles tourbeuses, argiles molles, vases, argiles limono-sableuses, limons argilo-sableux, les caractéristiques de portance sont faibles à très faibles et dont la compressibilité est élevée. Des niveaux sableux d'épaisseur variable sont également notés.

Les laves altérées moyennes (LAM) : les formations concernées sont hétérogènes et les caractéristiques mécaniques assez fortement variables (médiocres à moyennes) ; les paramètres géodynamiques retenus ont du tenir compte de l'étendue de ce domaine de variation ; ils doivent être considérées comme des valeurs moyennes. On y trouve des formations volcaniques altérées, souvent hydrothermalisées et argilisées sur de grandes épaisseurs, y sont assimilées aussi des alluvions plus ou moins sableuses ou argiles de meilleure qualité mécanique que les niveaux "Fc" précédemment cités (pas de caractère compressible marqué). En allant globalement vers le nord-est, (hormis présence de ravines ou rivières), on constate régulièrement une réduction et une disparition progressive des formations "Fc" au profit de ces alluvions ou argiles ; on passe alors géographiquement d'une catégorie géodynamique à une autre.

Les laves altérées raides (LAR) : sont comprises dans cette catégorie des formations volcaniques assez peu altérées, de caractéristiques mécaniques bonnes à excellentes. La transition entre "LAM" et "LAR" est en général progressive ; localement cependant, on peut constater une rupture assez franche dans les caractéristiques mécaniques et une épaisseur de laves altérées faible.

Le substratum fissuré (Sf) : il est bien mis en évidence par certains profils géophysiques ; géotechniquement parlant, c'est déjà un milieu rocheux, mais qui se distingue par son niveau de fracturation élevé. Il n'existe pas toujours (on peut passer directement de "LAR" au substratum sain) et sa répartition dans l'espace est une des données les plus mal connues ; par ailleurs des failles peuvent en faire varier brutalement la puissance.

Le substratum sain (S) : sa fracturation est nettement plus faible, ce qui se traduit géophysiquement par des vitesses d'ondes P supérieures. Il constitue le milieu de référence, semi-infini, pour les calculs de spectres sismiques.

Le tableau 4 synthétique suivant résume les caractéristiques géomécaniques jugées les plus représentatives, ainsi que les paramètres géodynamiques choisis pour les simulations numériques. On ne saurait trop insister sur la prudence avec laquelle on doit considérer ces valeurs, souvent très dispersées et dont la représentativité est variable en fonction du nombre de données à disposition et de la granulométrie des matériaux. En particulier, elle diminue généralement avec la profondeur ; le paragraphe 6.1.6. reviendra sur ce point.

Enfin, l'appellation utilisée dans les Recommandations AFPS est fournie en parallèle.

ZONE DU LAMENTIN (MARTINIQUE)				
Nom de l'unité	Caractéristiques géodynamiques choisies	Ordre de grandeur des caractéristiques mécaniques les plus représentatives	Epaisseurs moyenne, minimale et maximale constatées dans les seuls sondages	Catégorie AFPS 90
Fs	Poids volumique = 16 kN/m^3 Vitesse des ondes S = 180 m/s Amortissement = 8 %	Cohésion non drainée $C_{uu} = 10 \text{ à } 50 \text{ kPa}$, moyenne = 30 kPa (pour argiles) Pression limite au pressiomètre $P_l \leq 0.8 \text{ MPa}$	moyenne = 3 m mini = 0.5 m maxi = 14 m	c sol de faible résistance mécanique
Fc	Poids volumique = 11.5 kN/m^3 Vitesse des ondes S = 180 m/s Amortissement = 10 %	$C_{uu} = 10 \text{ à } 30 \text{ kPa}$, moyenne = 20 kPa (pour argiles) Coefficient de compressibilité C_c : $0.2 \leq C_c \leq 4.5$	moyenne = 5 m mini = 1.5 m maxi = 23.5 m	c sol de faible résistance mécanique
LAm	Poids volumique = 17 kN/m^3 Vitesse des ondes S = 500 m/s Amortissement = 6 %	C_{uu} : moyenne = 70 kPa à 100 kPa (pour argiles) $0.8 \text{ MPa} \leq P_l \leq 4 \text{ MPa}$, moyenne = 1.5 MPa Caractéristiques variant dans un large domaine	moyenne = 13 m mini = 0.5 m maxi = 37 m	b sol de résistance mécanique moyenne
LAr	Poids volumique = 18.5 kN/m^3 Vitesse des ondes S = 770 m/s Amortissement = 4 %	$P_l > 4 \text{ MPa}$	moyenne = 12 m mini = 2 m maxi = 33 m	a sol de bonne à très bonne résistance mécanique
Sf	Poids volumique = 19.5 kN/m^3 Vitesse des ondes S = 900 m/s Amortissement = 2 %	Vitesse d'ondes P en sismique réfraction = 2300 m/s	moyenne = 25 m mini = 8 m maxi = 57 m	R Rocher
S	Poids volumique = 21 kN/m^3 Vitesse des ondes S = 1300 m/s Amortissement = 1 %	Vitesse d'ondes P en sismique réfraction = 3500 m/s	Sans objet	R Rocher

Tableau 4 - Synthèse des caractéristiques géotechniques interprétées

6.1.5. Réalisation des coupes géotechniques (Profils) et vérifications associées

Comme évoqué au paragraphe 5.4.2.1., le géotechnicien va établir des coupes géotechniques interprétatives ou profils qui permettent, une fois numérisées, de compléter l'information de base nécessaire à la fabrication des M.N.T. géotechniques. Il s'appuiera pour cela sur les différentes données précédemment analysées (ici sondages et profils géophysiques), entre lesquelles il interpolera en tenant compte d'un certain nombre de facteurs comme la géologie, le mode de mise en place des formations (notamment selon des paléovallées dans le contexte volcanique martiniquais), la proximité des reliefs, la présence de ravines, l'expérience locale...etc. S'il est nécessaire d'avoir un nombre suffisant de profils pour les interpolations ultérieures, cette quantité doit également être en rapport avec la précision et la répartition des informations disponibles ; vouloir fournir une coupe à tout prix, à partir de points de référence trop éloignés, n'apporte pas de précision supplémentaire par rapport à l'interpolation "informatique" qui viendra ensuite. La localisation des profils réalisés est indiquée figure 25. La figure 26 présente un exemple de profil réalisé manuellement.

Dans le cas du Lamentin, les informations dites "de référence" sont donc constituées par :

- les sondages ponctuels, qui sont saisis numériquement ;
- les profils interprétés qui sont digitalisés ;
- une partie des profils de sismique-réfraction (interfaces LAr/Sf et Sf/S) également digitalisés.

C'est à partir de ces 3 éléments qu'est construit, pour chaque interface géotechnique, un fichier de référence (.DAT), contenant toutes les coordonnées X, Y, Z à partir desquelles on peut calculer chaque M.N.T. géotechnique. Ces données sont référencées sous forme de tableau ASCII, dont un exemple est donné dans le tableau 5.

Figure 25

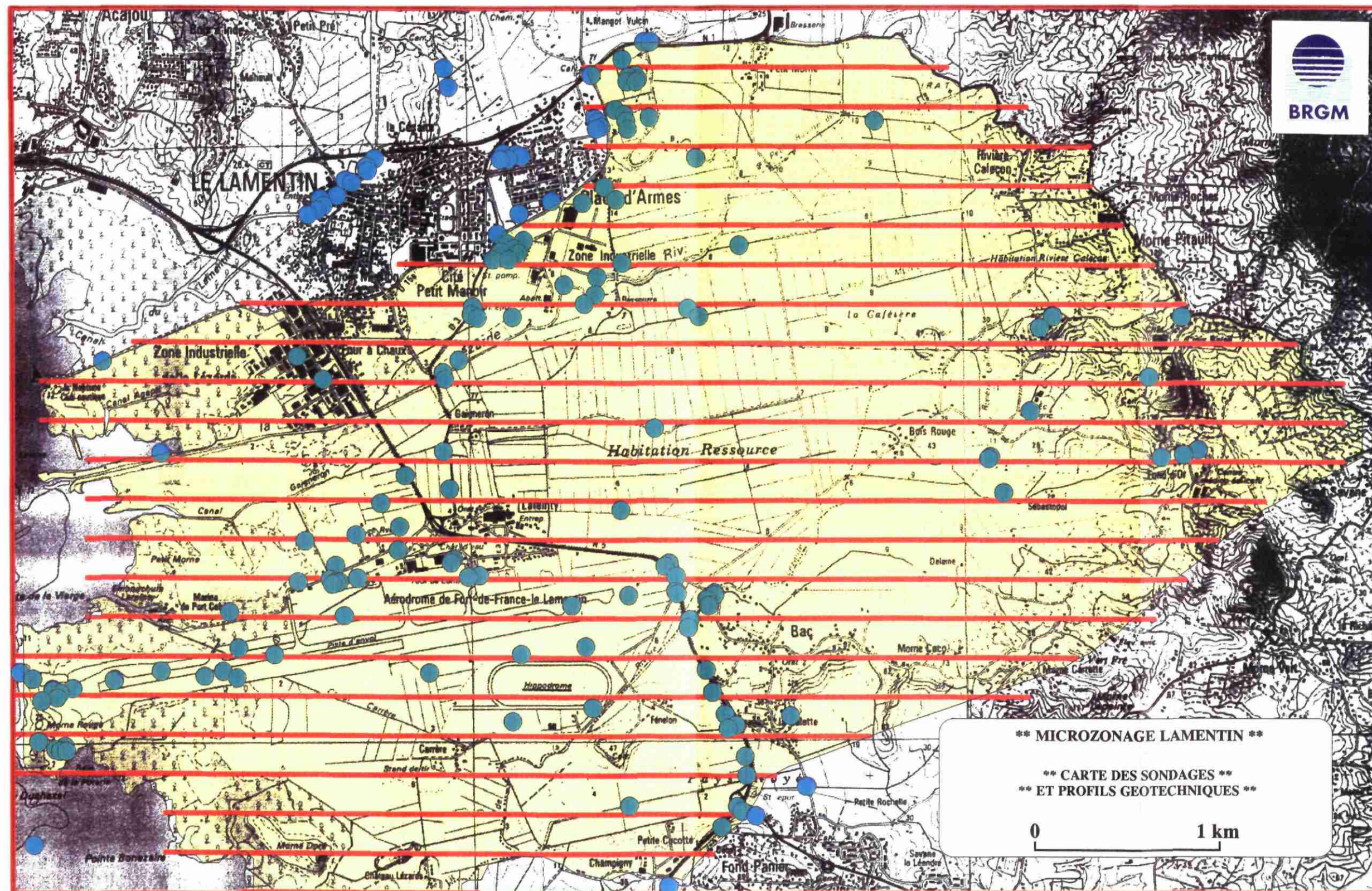


Figure 26 -
Exemple de coupe géotechnique interprétée

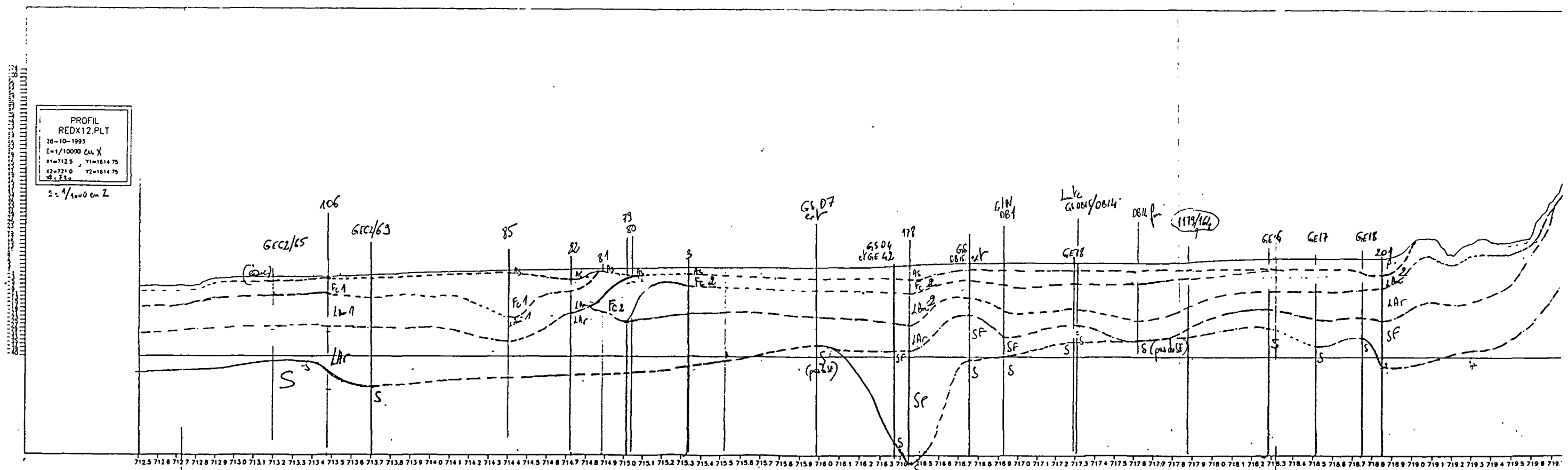


Tableau 5 - Extrait de la table du fichier de coordonnées X, Y, Z, utilisées pour le calcul du M.N.T. de la couche As

X (km)	Y (km)	Z (m)
713.0002	1612	-2.85
713.0093	1612	-2.96
713.0168	1612	-2.98
713.0234	1612	-2.94
713.0371	1612	-2.96
714.0399	1612.25	-2.98
714.0558	1612.25	-2.71
714.0666	1612.25	-2.51
714.0811	1612.25	-2.12
714.0952	1612.25	-1.83
714.1037	1612.25	-1.6
714.113	1612.25	-1.22
714.1217	1612.25	-1.02
714.1339	1612.25	-.82
714.1409	1612.25	-.66
714.1529	1612.25	-.32
714.1631	1612.25	-.24
714.1718	1612.25	-.06
714.1813	1612.25	-.01
714.1927	1612.25	.04
714.2037	1612.25	.09
714.2137	1612.25	.17
714.2243	1612.25	.12
714.2391	1612.25	.16
714.2498	1612.25	.21
713.6547	1612.5	-.35
713.6656	1612.5	-.25
713.6758	1612.5	-.2
713.6865	1612.5	-.2
713.6928	1612.5	-.2
713.6997	1612.5	-.23
713.7078	1612.5	-.25
713.7134	1612.5	-.18
713.7238	1612.5	-.2
713.7314	1612.5	-.15
713.1985	1612.75	-3.42
713.209	1612.75	-3.45
713.2203	1612.75	-3.48
713.2308	1612.75	-3.52
713.241	1612.75	-3.35
713.2513	1612.75	-3.31
713.2608	1612.75	-3.14
713.2714	1612.75	-3.22
713.2824	1612.75	-3
713.2916	1612.75	-2.91
713.3084	1612.75	-2.65
713.3214	1612.75	-2.38
713.3305	1612.75	-2.39
713.3438	1612.75	-2.12
713.3537	1612.75	-1.93
713.3618	1612.75	-1.84
713.3682	1612.75	-1.71

Cela impose une attention particulière aux points singuliers, c'est à dire dans les zones où se recoupent 2 informations de référence différentes : sondage à proximité d'un profil géophysique par exemple. Par ailleurs, les cotes de sondages étant considérées "absolues" (c'est à dire mesurées topographiquement), **un traitement systématique de toutes les altitudes des investigations de référence doit être fait afin d'assurer la cohérence avec les cotes du M.N.T. topographique** calculé, qui est par nature le résultat d'une interpolation. On remplace alors la cote réelle par celle du M.N.T. pour X et Y donnés ; ce qui se résout très simplement par informatique.

Une fois les vérifications faites et les artefacts correspondants supprimés, les fichiers .DAT constitués et les M.N.T. géotechniques calculés, la construction du modèle géotechnique 3D est obtenue par différentiel d'altitude des différents modèles numériques géotechniques. Il est alors possible, grâce à des programmes informatiques, d'interroger le modèle créé, pour extraire soit une colonne de sol référencée en X et Y, soit une coupe géotechnique, soit un bloc diagramme 3D.

6.1.6. Détermination des colonnes de sols et notions de représentativité

La phase ultime du microzonage consiste à cartographier les zones sismiquement homogènes pour une méthode donnée (AFPS 90, fréquence propre, instrumentation et méthode numérique...). Pour cela, il faut identifier les différentes colonnes de sols types représentatives du site étudié, résultant des sondages et des profils, puis calculer les réponses sismiques correspondantes.

En réalité, si 6 unités géodynamiques ont été retenues, les différentes successions possibles des formations en présence sont très nombreuses. En effet, certaines couches peuvent ne pas être présentes ; on peut retrouver localement des formations compressibles sous des formations de laves altérées par exemple ; cela conduit à un certain nombre de cas possibles. La démarche adoptée pour la détermination des colonnes types a pris en compte 5 facteurs principaux :

- 1 - Les différentes **configurations** (ou ordres constatés des couches) ;
- 2 - Leur **représentativité**, c'est à dire à combien de sondages ou profils correspondent-elles par rapport au nombre total de sondages disponibles ?
- 3 - A l'intérieur de chacune des configurations, quelles sont les **différentes épaisseurs** possibles de chacune des unités ? Sont-elles très **dispersées** ?
- 4 - Le **degré de renseignement concernant ces épaisseurs** (les sondages étant souvent insuffisamment profonds, les couches "basses" sont plus rarement renseignées) ;
- 5 - La **variabilité des caractéristiques géodynamiques des unités**.

Ce type d'analyse, qui nécessite un traitement statistique des données, peut être mis en oeuvre soit de manière "manuelle", soit en utilisant les fonctionnalités d'un tableur comme Excel.

Pour les points 1 et 2, en considérant à titre d'exemple les seuls sondages (les profils peuvent conduire à des configurations supplémentaires) et une analyse manuelle, on a abouti à 11 configurations différentes ; elles représentent en tenant compte des variations d'épaisseurs 26 colonnes de sol différentes. Les pourcentages de représentativité de ces 11 configurations sont très variables ; la plus commune représente 39% des sondages (soit 86), la seconde 21% (46 sondages) ; on passe ensuite à 8% puis 5% (11 sondages sur 220 au total) ; les 7 autres

configurations représentent chacune entre 1.5% et 0.5% (soit de 3 à 1 sondage!). En conséquence, on s'est attaché à ce que le nombre de colonnes de sols objets de calculs sismiques, par rapport au nombre total de colonnes identifiées, pour 1 configuration donnée, soit proche du pourcentage de représentativité de cette configuration. Ceci veut dire par exemple que la configuration représentative de 40% des sondages fera l'objet d'environ 40% des calculs sismiques.

L'analyse des points 3 et 4, (variations d'épaisseur et degré de renseignement concernant ces épaisseurs), permet de faire les remarques suivantes. Il y a une forte dispersion ; en conséquence, dans la définition des colonnes types, on a cherché à faire des tranches d'épaisseur telles que leurs moyennes correspondent aux épaisseurs moyennes constatées dans les sondages. Par ailleurs, afin de limiter le nombre de colonnes, on a fait varier les épaisseurs des seules couches superficielles ; pour les plus profondes, une seule tranche d'épaisseur est considérée dont la valeur moyenne est l'épaisseur moyenne trouvée en sondages.

Enfin, le tableau 6 ci-après met bien en évidence la décroissance du degré de renseignement avec la profondeur. Il s'agit, à titre d'exemple, de la configuration la plus communément constatée (dans 86 sondages sur un total de 220). Dès qu'on atteint l'unité "LAr", l'épaisseur n'est plus renseignée que dans 16 cas sur 86 (19%) ; quant à "Sf" les informations sont très peu nombreuses et indirectes, car venant en général de profils géophysiques proches.

Nom de l'unité	Nombre de sondages pour lesquels on a pu trouver l'épaisseur de la couche considérée	Epaisseur moyenne constatée	Epaisseurs minimale et maximale constatées dans les sondages	Ecart-type
Fs	86	3 m	0.5m / 9 m	2.2 m
Fc	82	8.5 m	1.5m / 23.5 m	4.8 m
LAm	57	9 m	0.5 m / 35 m	6.4 m
LAr	16	14 m	3.5 m / 33 m	8.5 m
Sf	10	23.5 m	12 m / 57 m	15 m
S	sans objet			

Tableau 6 - Statistiques sur l'épaisseur des couches géotechniques

Le facteur n°5 concerne la variabilité des caractéristiques mécaniques. On se reportera aux paragraphes 6.1.1. et 6.1.3 qui définissaient les difficultés rencontrées lors de l'analyse des données de base. **Il est donc important de prendre en compte l'imprécision liée au choix des paramètres géodynamiques**, en particulier l'influence de la variabilité des 2 principaux en terme de réponse sismique : l'épaisseur et la vitesse des ondes S. Nous avons déjà évoqué le premier ; pour ce qui concerne le second, quelques tests ont été réalisés en faisant varier la vitesse de l'unité "Fc", la plus pénalisante et la plus difficile à connaître, et celle de "LAm" car cette formation regroupe à la fois des laves altérées moyennes et des alluvions argileuses peu compressibles. Les spectres de réponse ont été très peu différents ; ces premiers résultats, associés à l'impossibilité de traiter manuellement un trop grand nombre de cas (effet multiplicateur de la prise en compte successive de chacun des paramètres) n'ont pu être approfondis.

Notons simplement qu'au total, 43 colonnes de sols ont été établies, et autant de calculs de spectres ont été effectués ; bien évidemment, ils ont été homogénéisés, en regroupant les formes spectrales équivalentes, ensuite pour arriver à des cartes facilement lisibles. A partir de ces 43 colonnes, des tests informatiques de reconnaissance ont été mis au point pour que chaque maille élémentaire du M.N.T. puisse se rattacher à l'une d'elles et au spectre correspondant.

6.1.7. Améliorations méthodologiques envisageables

Il apparaît que les axes de travail futurs doivent tendre vers une informatisation supplémentaire de la méthode. Cela concernera essentiellement la détermination des colonnes de sol pour laquelle, il s'agira d'approfondir et d'informatiser les traitements statistiques sur les données de sondage ; le but sera d'apprécier de manière automatique, au fur et à mesure de la saisie, la représentativité de telle ou telle configuration, les variations d'épaisseur et le degré de renseignement du paramètre épaisseur pour chaque unité. Cela constituera donc une aide au choix de colonnes de sols représentatives. Il faudra passer par des tests de reconnaissance,

6.2. EVALUATION ET CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITE A LA LIQUEFACTION

6.2.1. Identification des sols liquéfiables.

Selon les recommandations AFPS 90, les critères permettant à **priori de suspecter la liquéfaction** dans des sables reposent sur le degré de saturation et la granulométrie ; pour des formations argileuses, il s'agit de la teneur en eau, des limites d'Atterberg et également de la granulométrie. Ces valeurs peuvent être acquises grâce à des essais simples et peu coûteux.

Pour **quantifier** cette potentialité, différentes méthodes sont classiquement utilisées, suivant le niveau d'approche retenu (A, B ou C). Le niveau A, qualitatif, fait appel à l'exploitation des données géologiques (voir géotechniques, mais simples), hydrogéologiques et géomorphologiques. En particulier, on prend en compte la **profondeur de la nappe**, (ce qui revient à fixer l'épaisseur de sols non liquéfiables au dessus, et aussi à considérer le rôle de la contrainte verticale effective appliquée plus bas), et l'**épaisseur des formations liquéfiables** si on la connaît. Les niveaux B et C utilisent directement les caractéristiques mécaniques des sols adaptées au phénomène , c'est à dire issues de sondages S.P.T. et/ou au piézocône, tout en s'appuyant sur les critères précédemment cités, en particulier pour le niveau B dans lequel le volume de reconnaissance mis en jeu est moindre.

6.2.2. Données de base et limites associées.

Globalement, la zone d'étude comporte à la fois un niveau de nappe souvent proche de la surface topographique, baignant des formations à dominante argileuse mais comportant des niveaux silteux, (pouvant ou non liquéfier), à sableux (liquéfiabiles), d'extension et de puissance variables. A proximité des ravines ou rivières, la granulométrie peut tendre vers une dominante sablo-silteuse potentiellement liquéfiabie. On sait donc qu'à priori, hormis les mornes, reliefs ou les zones ponctuelles plus compactes mécaniquement, l'ensemble du secteur est potentiellement liquéfiabie.

L'analyse des seules descriptions des coupes des différents sondages à disposition permet de déceler, sur 27% d'entre eux, des lentilles à priori potentiellement liquéfiables, à des degrés

divers. 17% concernent soit des lentilles de faible épaisseur (≤ 1 mètre) et situées près de la surface, soit des niveaux d'une épaisseur moyenne de 8 mètres localisés à une profondeur moyenne de 9 mètres ; 10% sont des lentilles d'épaisseur moyenne de 5 mètres et reconnus à une profondeur moyenne de 3 mètres. 27% des sondages ne permettent pas de savoir s'il existe ou non des niveaux propices car, soit la description est trop imprécise, soit les sondages sont uniquement mécaniques (pas de visualisation possible des matériaux). Toujours à partir des seules descriptions, 46% du total des sondages ne mettent aucun niveau potentiellement liquéfiable en évidence. Enfin sur les 27% des sondages où des niveaux suspects sont identifiés, ceux-ci concernent dans une proportion équivalente, **3 des 6 unités géotechniques distinguées précédemment.**

Il s'agit de : **Fs** (Formations superficielles), **Fc** (formations compressibles), **Lam** (laves altérées moyennes qui regroupent également les alluvions silto-sableuses dans la moitié est/nord-est du secteur d'étude). Cela est normal, car les critères géotechniques utilisés en vue des traitements géodynamiques ne se superposent pas localement à ceux déterminant le potentiel de liquéfaction.

Il apparaît donc que :

- les données de base ne comportent aucun essai S.P.T. ni au Piézocone ; quant aux mesures de limites d'Atterberg ou granulométriques, elles sont en nombre insuffisant pour être représentatives. Enfin, rappelons que la démarche repose essentiellement sur des descriptions de coupes de sondages, informations par nature subjectives et hétérogènes (selon la discipline d'origine de l'interpréteur et la finalité du forage) ; par exemple, il y aura des différences notables entre le compte-rendu d'un géotechnicien suivant une campagne pour définir des conditions de construction et d'un hydrogéologue occupé à un forage profond pour évaluer des ressources en eau. Pour ces différentes raisons, **la prise en compte de la liquéfaction sur le Lamentin ne dépassera pas le niveau A.** C'est pourquoi tout ce qui suit se limitera à une **approche qualitative de la susceptibilité à la liquéfaction** ; ce qui veut dire que ni la prise en compte quantitative de l'agression sismique (par utilisation de l'accélération maximale en surface dans un calcul de contrainte de cisaillement cyclique), ni la probabilité d'occurrence (pour aboutir à un véritable aléa) ne sont abordées ;
- les zones identifiées apparaissent comme des **lentilles** d'extension et de puissance variables, mais en général localisées. Il **est donc impossible de régionaliser informatiquement ce type d'information** et donc d'avoir accès sur l'ensemble du secteur à l'épaisseur de sols liquéfiables ;
- l'élément principal auquel on a accès reste la profondeur de la nappe. Celle-ci est précise sur environ un tiers du secteur total (là où de nombreuses mesures et reconnaissances ont été faites pour l'alimentation en eau de la ville de Fort de France) ; on peut l'estimer avec quelques mètres de variation sur un autre tiers ; elle est très peu précise sur le tiers restant.

6.2.3. Méthodologie développée.

Au vu de la précision des données de base précédentes et en conséquence **en termes de précision des résultats**, l'intérêt d'un développement méthodologique pour le zonage de niveau A, de la susceptibilité à la liquéfaction, n'était pas évident a priori, par rapport à une approche traditionnelle, naturaliste. La combinaison des 2 est souhaitable. Cependant, un tel développement paraissait nécessaire, dans le cadre de cette étude, pour 3 raisons essentielles :

- il permet d'informatiser certaines données et donc d'alléger, dans une certaine mesure, le côté manuel ou interprétatif de l'approche traditionnelle ;

- cette informatisation est de toutes façons nécessaire pour produire un document cartographique révisable et actualisable ;
- les tests classiquement utilisés, (portant sur la profondeur de la nappe, l'épaisseur de sols liquéfiables...etc.) sont très propices à être calculés informatiquement une fois les informations régionalisées.

Il faut également bien voir que si dans le secteur d'étude, les tests sont relativement simplistes (la seule information régionalisée étant la profondeur de la nappe), ils pourront à l'avenir être très facilement adaptés à de nouvelles données de base plus précises.

La procédure a donc été la suivante :

- tracé manuel interprétatif des isopièzes de la nappe sur l'ensemble de la zone où une susceptibilité à la liquéfaction est envisageable ; n'y sont donc pas compris tous les secteurs à fort relief ;
- digitalisation de ces courbes et régionalisation par interpolation informatique ;
- écriture des tests informatiques permettant, pour chaque maille élémentaire, d'évaluer la différence entre l'altitude du lieu et la cote du toit de la nappe. Si cette différence est faible, la maille sera le siège d'une susceptibilité grande à la liquéfaction ; inversement, si cette différence est grande, la maille aura une susceptibilité faible ; sinon elle sera qualifiée de moyenne.

Cartographiquement, cela se traduit par 3 couleurs différentes, correspondant à chacun de ces niveaux, plus une quatrième caractéristique des zones où il n'y a pas de potentialité de liquéfaction. **Ce résultat, à caractère uniquement méthodologique**, constitue la figure n° 27. Par ailleurs, la figure 28 récapitule tous les points de reconnaissance où des niveaux ont été identifiés, d'après leur description, comme potentiellement liquéfiables. Ils doivent être considérés, à l'échelle du document, comme autant d'alarmes **supplémentaires** invitant le futur constructeur à porter une attention particulière à la caractérisation du potentiel réel de liquéfaction au droit de son site.

6.2.4. Conclusion.

La quasi totalité du secteur d'étude est à des degrés divers, du plus fort au plus faible, potentiellement liquéfiable de par la présence de lentilles ou niveaux sablo-silteux d'épaisseur et d'extension variables. **L'intérêt méthodologique du développement précédent ne doit pas masquer la fiabilité, incertaine encore, de la représentation cartographique de ces degrés.** Elle est liée à la fiabilité et à la représentativité des données de bases actuelles. Les 2 figures précédemment citées ne doivent en aucun cas être considérées comme suffisantes pour prendre en compte la localisation précise du potentiel de liquéfaction, encore moins son intensité.

A l'heure actuelle et dans ce secteur, **on ne saurait trop conseiller**, dans tout acte de construction ou de réhabilitation de l'existant, de **réaliser une évaluation précise de la susceptibilité à la liquéfaction. Cela passe par des reconnaissances et essais adaptés**, qui ne sont pas forcément très coûteux.

Figure 27

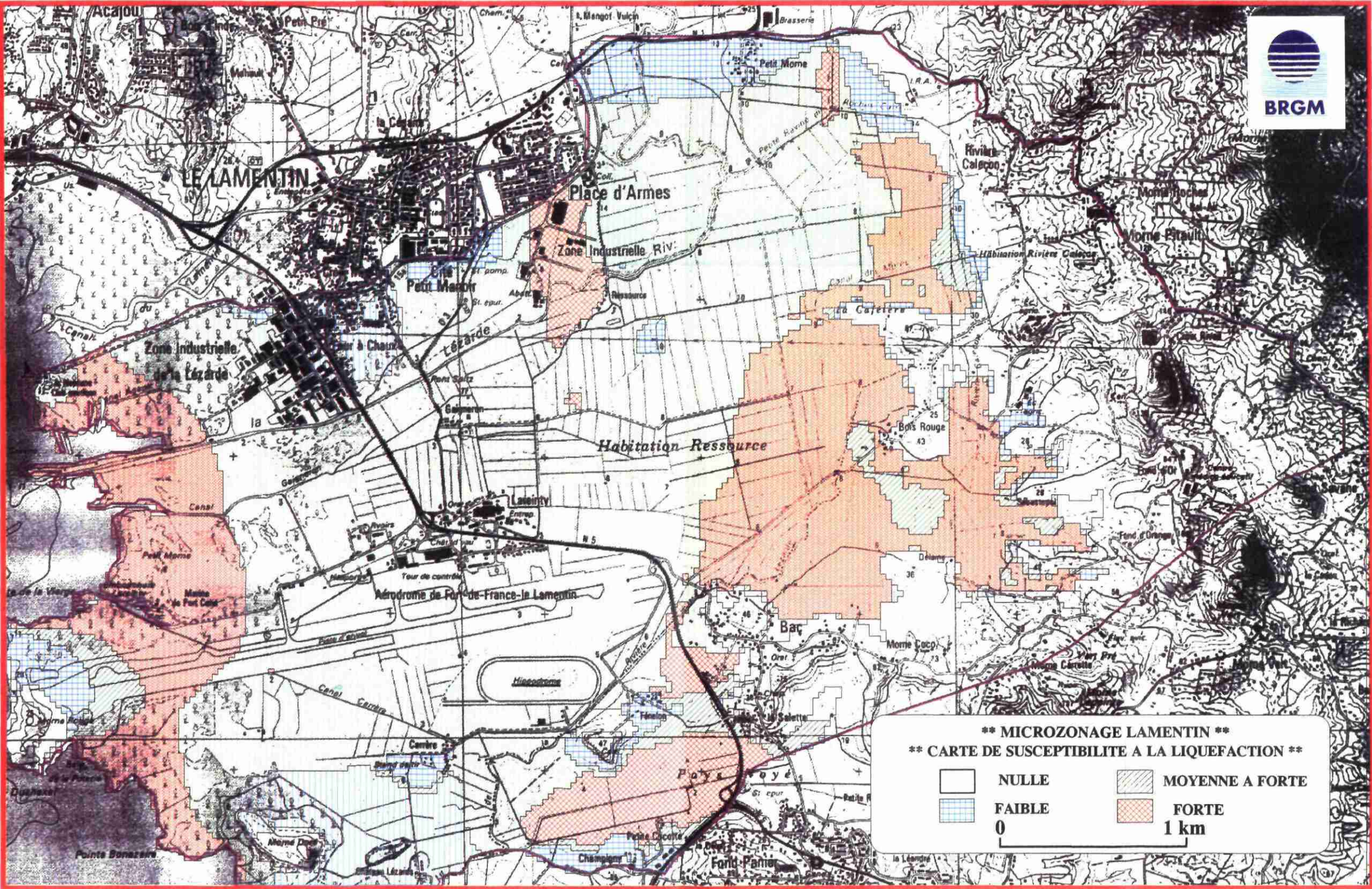
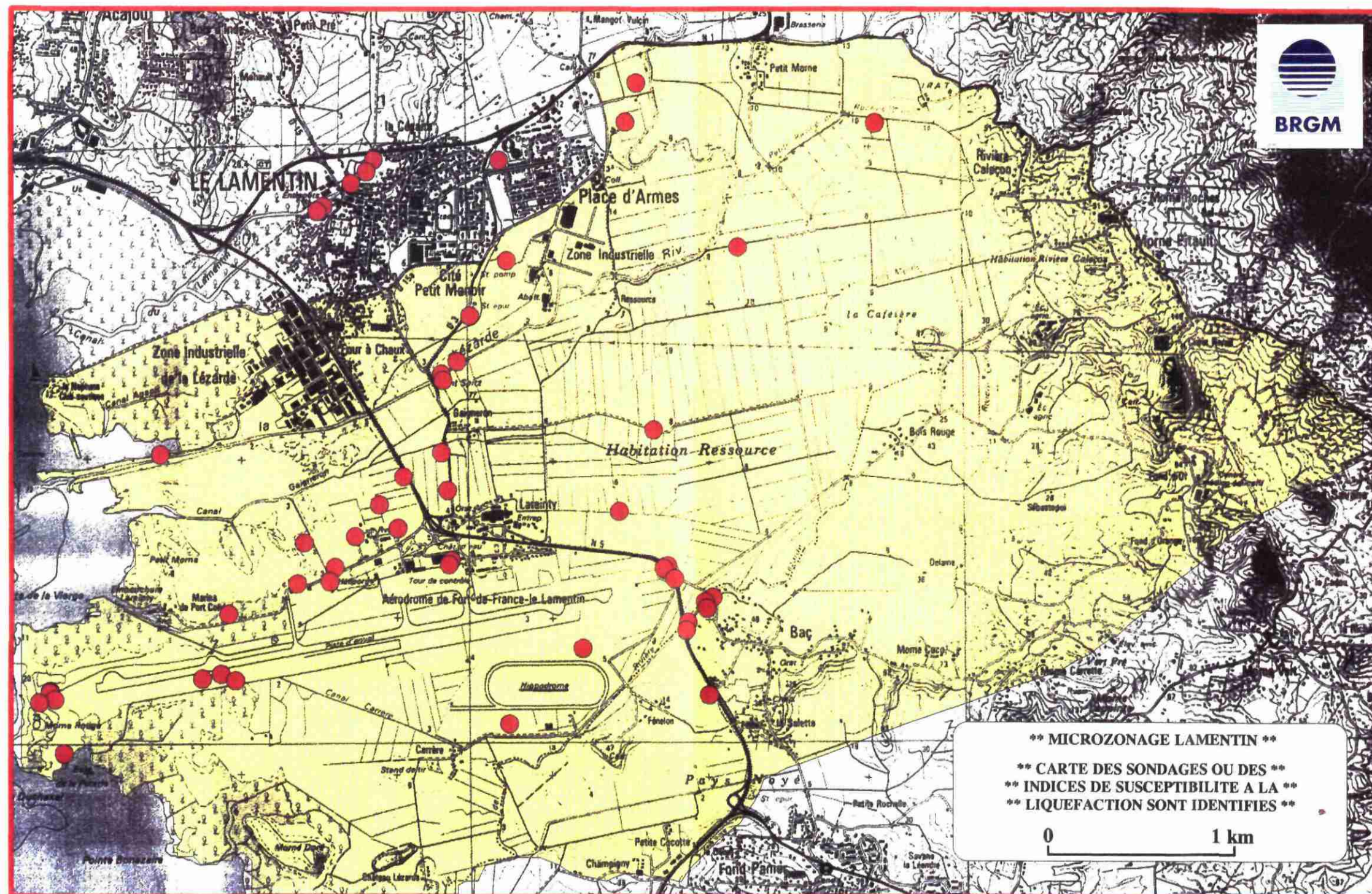


Figure 28



procédures un peu lourdes à écrire, mais évitant de tomber sur une configuration non détectée manuellement.

Enfin, mentionnons un point technique particulier ; il a été constaté des artefacts dans les interpolations, qui entraînaient localement l'apparition de couches superficielles en réalité inexistantes, essentiellement observé à proximité des forts reliefs. Ceci provient de la non coïncidence entre des cotes issues de 2 interpolations successives : celle inhérente au M.N.T. topographique, et celle liée aux interpolations entre profils. Cette difficulté a été contournée par des tests sur l'altitude ; il conviendrait d'approfondir la compréhension de ces conditions d'occurrence et d'améliorer les moyens de la supprimer.

6.3. EVALUATION ET CARTOGRAPHIE DES EFFETS DE SITE

Afin de produire des documents aussi lisibles que possible, le parti a été pris de restituer les résultats du microzonage sismique sur les fonds cartographiques de l'IGN préalablement scannés. Cette solution présente l'avantage de superposer les cartes d'aléa sur un support présentant aussi bien les reliefs topographiques, que les zones urbanisées.

La procédure de superposition des différents niveaux d'information est décrite en annexe 2. Elle peut être appliquée à tout document d'urbanisme existant, si ces derniers sont disponibles sur fond stable.

6.3.1. Microzonage sismique de niveau A

La procédure a été largement décrite au paragraphe 4.6.1. Elle conduit, pour chaque maille du modèle géotechnique, à définir le type de site S_0 , S_1 , S_2 ou S_3 qui peut lui être associé. Les spectres de réponse à retenir pour l'application des règles de construction parasismique sont ceux fournis par les recommandations AFPS 90 ou les nouvelles règles PS 92, présentés figure 11. Ils doivent être calés à l'accélération nominale correspondant à chacune des classes de bâtiment, pour une zone III de sismicité (voir figure 19).

La cartographie obtenue pour la zone du Lamentin est présentée figure 29.

6.3.2. Microzonage sismique de niveau B

La procédure est décrite au paragraphe 4.6.2. Elle permet d'évaluer quantitativement les amplifications du mouvement sismique et la bande de fréquence qui leur est associée à partir d'une méthode simplifiée basée sur les contrastes d'impédance d'un modèle multicouche plan.

Les résultats cartographiques sont présentés figure 30.

Figure 29

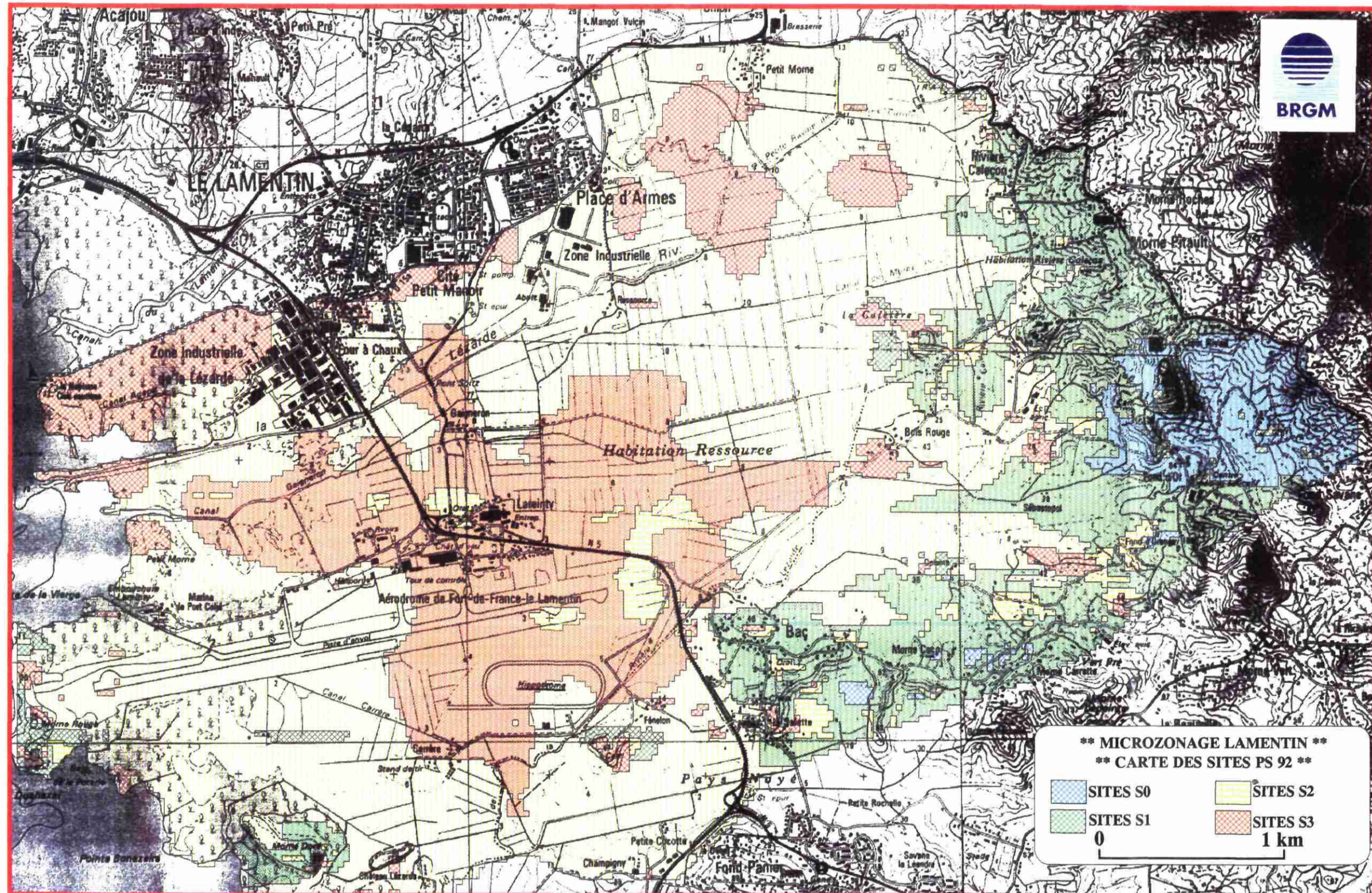
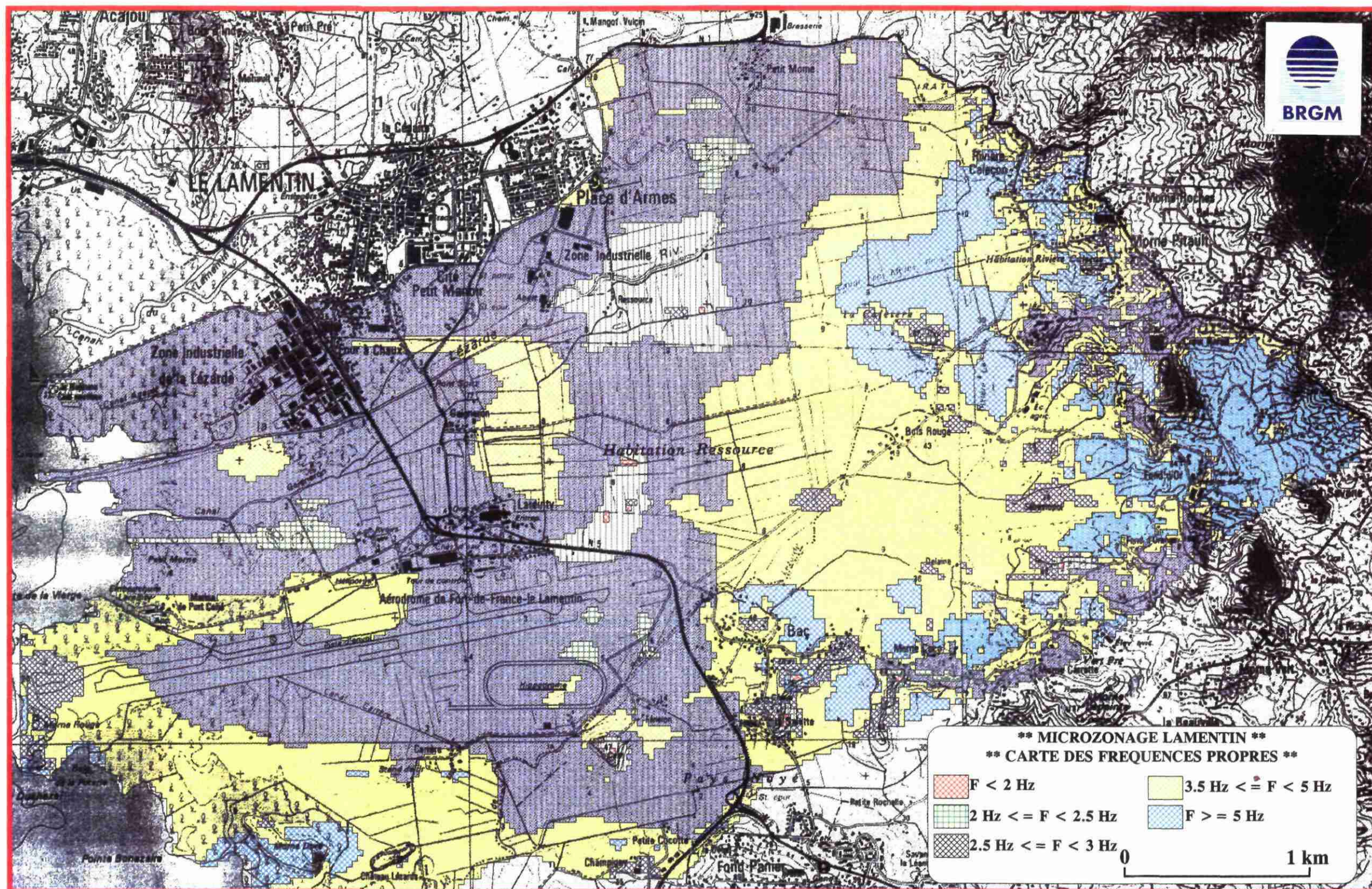


Figure 30



6.3.3. MICROZONAGE DE NIVEAU C - Calcul des spectres de réponse élastique tenant compte du site

Cette partie de l'étude consiste, une fois identifiées les sources sismiques devant être retenues en Martinique, à calculer les mouvements du sol pouvant leur être associés.

Ces mouvements de référence, représentatifs de la spécificité des sources, sont, dans un premier temps, définis pour une condition standard de sol, au "rocher horizontal affleurant". Ils sont ensuite modulés pour tenir compte de la réponse propre à chacune des configurations géotechniques établies en 6.1.6..

6.3.3.1. Caractéristiques des sources sismiques retenues

La définition des caractéristiques des sources sismiques retenues pour l'île de la Martinique s'est appuyée sur l'analyse sismotectonique régionale des Petites Antilles menée récemment par le BRGM entre 1986 et 1991 (GODEFROY et al., 1991).

Les principales sources sismiques discutées par ailleurs au chapitre 3, sont les suivantes :

■ Sources proches

Ces sources, à foyer superficiel, peuvent être situées à la verticale de tout point de l'île. Par souci d'homogénéité avec l'île de la Guadeloupe (sensu stricto) et même si les séismes du type 1851 ou 1897 ne se sont pas produits historiquement sur l'île de la Martinique, des caractéristiques identiques des sources proches ont été retenues sur les deux îles :

- magnitude : 5,8 ;
- distance focale : 5 km.

en envisageant une intensité épacentrale de l'ordre de VIII.

Un accident comme la faille du Lamentin nord pourrait engendrer ce type de séisme.

■ Sources lointaines

Elles proviennent essentiellement de la zone de subduction. Par ailleurs, une première analyse montre qu'un séisme du type de 1843, localisé à 200 km environ de la zone la plus proche de la Martinique, engendre des mouvements sismiques inférieurs à ceux produits par un séisme de type intraplaque Amérique subductée, comme ceux de 1839 ou 1946, quel que soit le domaine de fréquence.

Pour ces derniers séismes-types, on a alors retenu les caractéristiques suivantes :

- magnitude : 7,5 ;
- distance focale moyenne : 60 km.

6.3.3.2. Mouvement sismique de référence au rocher

Les spectres de réponse associés aux sources sismiques décrites en 6.2.1, sont ceux calculés par le BRGM dans le cadre de l'évaluation et la prévention du risque sismique aux Petites Antilles (Godefroy et al., 1991), et présentés figure 3. Nous en rappelons ici les principales caractéristiques.

■ Source proche

Le spectre en source proche "au rocher horizontal" a été évalué à partir de la comparaison de plusieurs méthodes dont la méthode spectrale de P. Bernard (1987) et celle de la Règle RFS n° I.2.c.

L'accélération maximale obtenue est égale à **0.35 g**.

■ Sources lointaines

Le spectre en source lointaine au "rocher horizontal" a été évalué à partir de la comparaison de plusieurs méthodes dont la méthode spectrale de P. Bernard (1987), celle de B. et G. MOHAMMADIOUN (1980) et celle de PETROVSKI (1986), ainsi que de spectres réels calculés à partir de l'enregistrement de séismes de subduction.

Le spectre de réponse correspondant à un amortissement de 5% est représenté sur la figure 31.

L'accélération maximale correspondante est égale à **0,20 g**.

Le spectre caractéristique de cette source lointaine est reporté, en coordonnées quadrilogarithmiques, sur la figure 32.

C'est à partir du spectre élastique horizontal de la source lointaine (amortissement 5%) calé à une accélération nominale de 0,2 g qu'ont été calculés les spectres de réponse tenant compte des conditions de site pour les différentes configurations de sols.

6.3.3.3. Méthodes numériques d'évaluation des effets de site

Nous avons vu au chapitre 4.6 que le contenu fréquentiel du spectre de réponse au rocher, peut être modifié et amplifié de façon notable par les conditions de site.

Ce sont ces modifications que l'on doit quantifier, dans toute étude de microzonage.

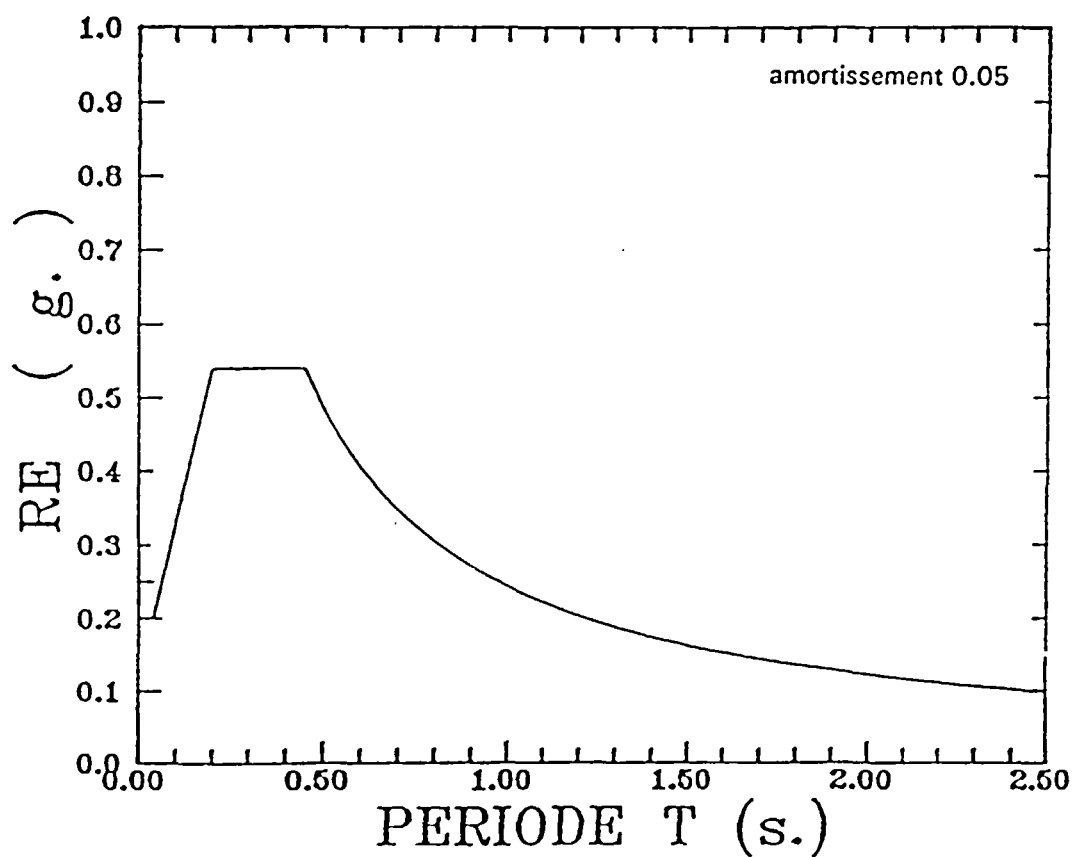


Figure 31 - Spectre de réponse élastique horizontal au rocher horizontal affleurant
Séisme lointain - Amortissement : 5 %

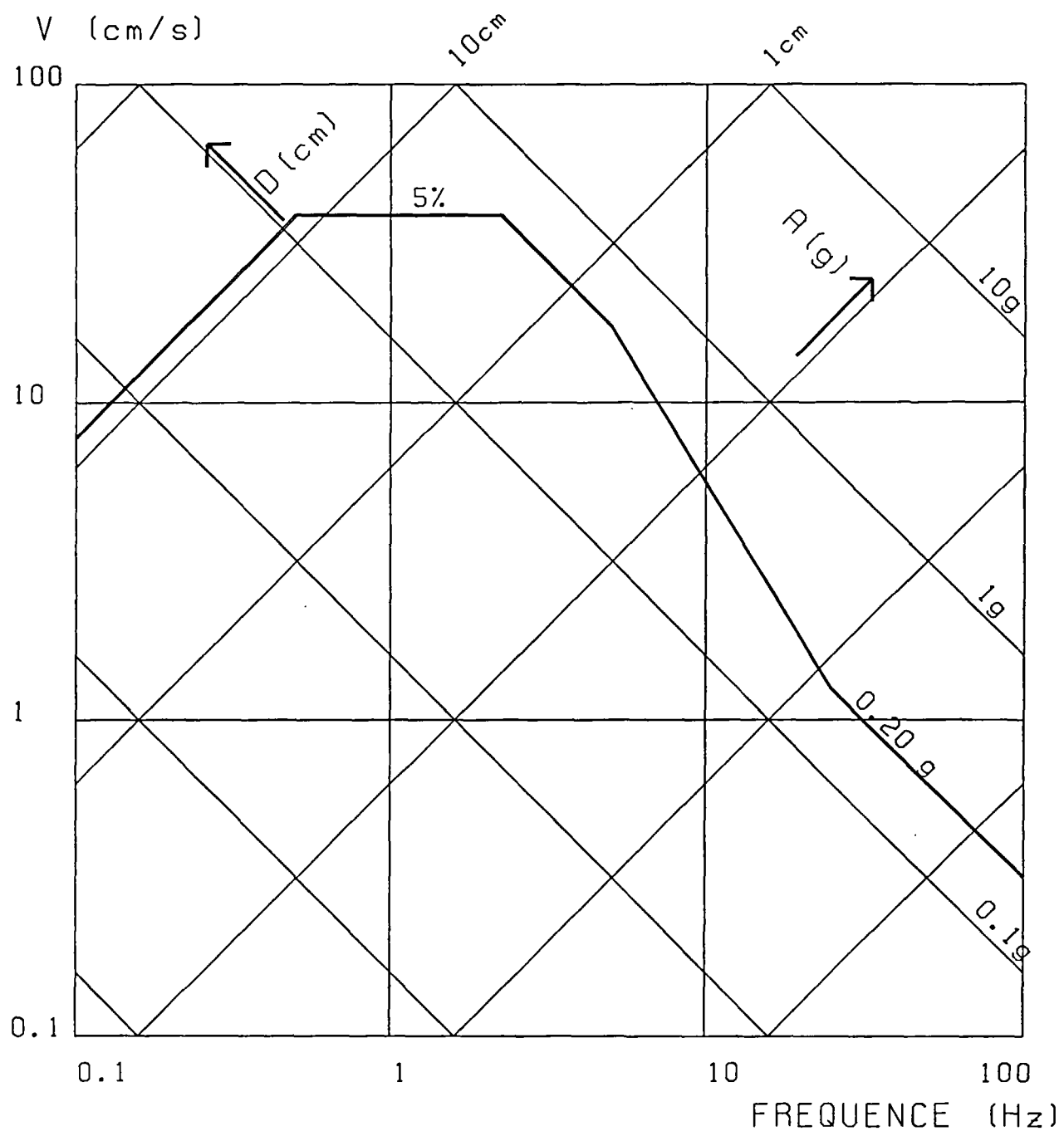


Figure 32 - Spectre de réponse élastique horizontal au rocher horizontal affleurant
Coordonnées quadrilogarithmiques - Séisme lointain - Amortissement : 5 %

6.3.3.3.1. Programme de calcul SHAKE

Pour quantifier et tenir compte de ce phénomène, nous avons utilisé le code de calcul SHAKE (SCHNABEL et al., 1972), développé à l'Université de Californie à Berkeley, qui permet de calculer la réponse sismique d'un profil de sols constitué de couches horizontales infinies, présentant un comportement viscoélastique linéaire ou linéaire équivalent, et reposant sur un substratum élastique.

Chacune des couches est supposée constituée d'un matériau homogène et isotrope et est caractérisée par son épaisseur (h), sa masse volumique (ρ), son module de cisaillement (G) et son coefficient d'amortissement critique (D). Ces variables sont supposées être indépendantes de la fréquence.

Le programme SHAKE nécessite, en amont, la génération d'un ou plusieurs accélérogrammes d'entrée, représentatifs du spectre de réponse au rocher horizontal. Ce calcul est effectué par le code SIMQKE. A titre d'exemple, la figure 33 représente un accélérogramme synthétique, au rocher horizontal affleurant, représentatif du spectre de réponse élastique correspondant à la source lointaine (figure 32). L'expérience montre qu'il est nécessaire d'utiliser plusieurs accélérogrammes au rocher. A cette fin, nous avons utilisé 3 accélérogrammes synthétiques, et trois accélérogrammes réels, de séismes dont les caractéristiques sont proches de celles du séisme de référence.

Ensuite, la réponse de la colonne de sol soumis à ces accélérogrammes de base, s'effectue par SHAKE.

L'excitation sismique imposée au niveau du substratum rocheux est une onde de cisaillement horizontale se propageant verticalement vers la surface.

La figure 34 schématise le système monodimensionnel ainsi décrit.

Le code de calcul est basé sur la continuité de l'équation d'onde. La méthode d'intégration est une méthode fréquentielle utilisant les algorithmes de transformées de Fourier.

Principe de calcul : "Intégration dans le domaine fréquentiel"

Le chargement (mouvement de référence) est exprimé sous la forme d'une série d'harmoniques. La réponse est évaluée pour chacune d'entre elles et les résultats individuels sont superposés pour obtenir la réponse globale. ce type de solution ne peut évidemment être appliqué qu'aux matériaux dont les propriétés sont invariables avec la déformation.

Le mouvement de référence s'écrit :

$$(1) \quad y(t) = \text{Re} \sum_{i=0}^{N/2} y_j e^{i w_j t}$$

où

w_j	$= \frac{2\pi j}{T}$
i^2	$= -1$
Re	$=$ partie réelle
T	$=$ période du signal
N	$=$ nombre de points de la transformée de Fourier (nécessairement de la forme 2^n)
y_j	$=$ amplitude de l'harmonique j

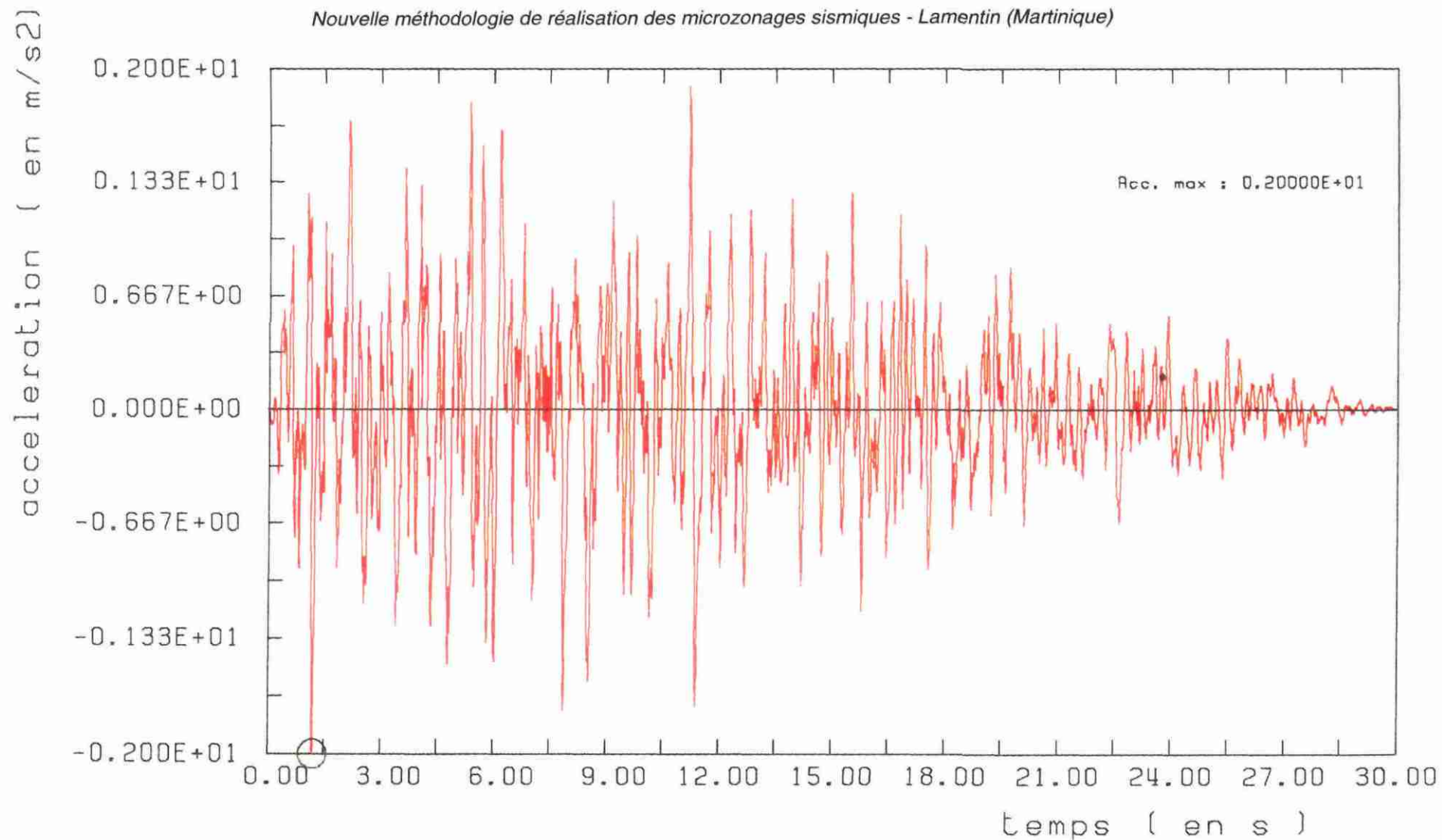


Figure 33 - Exemple d'accélérogramme synthétique au rocher horizontal affleurant représentatif du spectre de réponse élastique au rocher horizontal affleurant de la source lointaine

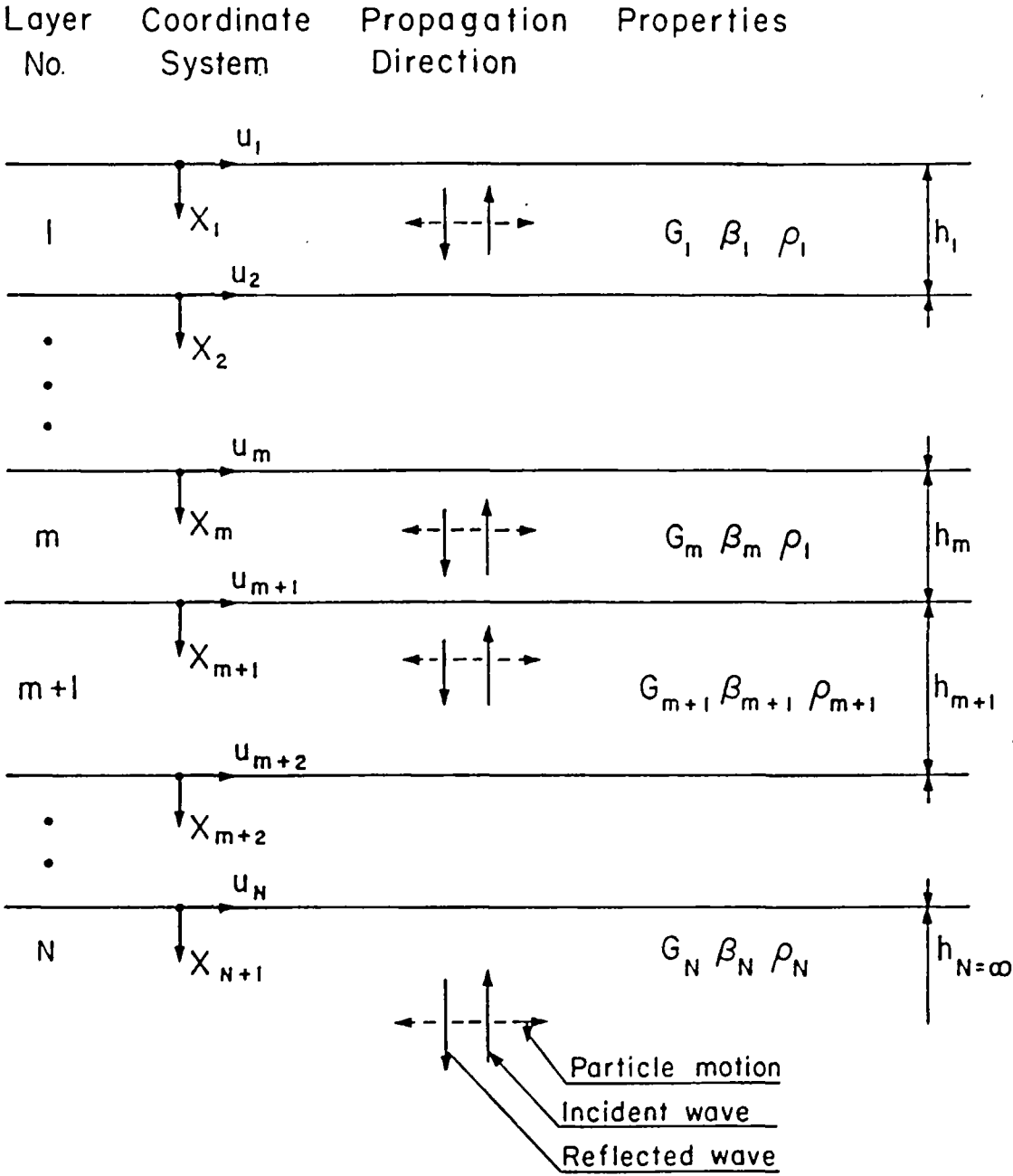


Figure 34 - Propagation verticale des ondes de cisaillement à travers un système monodimensionnel

La solution de $y(t)$ est de la forme :

$$(2) \quad u(t, Z) = \operatorname{Re} \sum_{i=0}^{N/2} u_i(Z) e^{i w_i t}$$

où les inconnues sont les amplitudes u_i correspondantes aux harmoniques w_i .

En ramenant l'équation 2 dans l'équation du mouvement ci-dessous :

$$(3) \quad \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau}{\partial z}$$

et en tenant compte de la loi de comportement des sols on obtient la solution

$$(4) \quad u_j = E_j e^{i k_j z} + F_j e^{i k_j z}$$

$$\text{avec } k_j = w_j \sqrt{\frac{\rho}{G^*}} = \text{nombre d'onde}$$

Le premier terme $E_j e^{i k_j z}$ correspond à une onde incidente et le second $F_j e^{i k_j z}$ à une onde réfléchie.

Les constantes d'intégration E_j et F_j sont obtenues par les conditions aux limites suivantes :

Contrainte de cisaillement en surface :

$$(5) \quad \tau(t)|_{z=0} = 0$$

Contrainte de cisaillement à la base de la couche d'épaisseur H

$$(6) \quad \tau(t)|_{Z=H} = \rho_R V_R \dot{y}(t) - \rho_R V_R \dot{u}(t, Z=H)$$

ρ_R et V_R : masse volumique et vitesse de propagation des ondes

$\dot{y}(t)$: vitesse connue du mouvement de référence à l'affleurement rocheux

$\dot{u}(t, Z=H)$: vitesse inconnue à la base de la colonne de sols.

Dans le cas d'un profil de sols, composé de n couches ayant des propriétés géomécaniques distinctes, il est facile d'obtenir, en écrivant la continuité du déplacement et de la contrainte de cisaillement à l'interface, les relations entre les constantes E_j et F_j de la couche m et celle de la couche $m+1$.

La non linéarité du module de cisaillement G et du coefficient d'amortissement D peut être prise en compte en utilisant des propriétés de sol linéaire équivalent (SEED et IDRIS, 1968 ; IDRIS et SEED, 1970) (figure 35).

Cette méthode consiste en l'utilisation d'une procédure itérative pour obtenir des valeurs de G et β compatibles avec la contrainte effective moyenne de chaque couche de sol.

Cette méthode itérative est basée sur les relations ci-dessous correspondants au trois types de sols suivants :

- sables $G_S = K_S \cdot 1000 \cdot (\sigma'_m)^{1/2} \cdot F_S$

- argiles $G_C = K_C \cdot F_C$

- roches $G_R = K_R \cdot \rho \cdot (1000 \cdot F_R)^2 / 2000$.

où G représente le module de cisaillement de la couche i

K représente la loi de variation de G en fonction de la distorsion γ

$$\text{pour les sables } K_s(\gamma) = \frac{G_s(\gamma)}{1000 \cdot (\sigma'_m)^{1/2}}$$

$$\text{pour les argiles } K_c(g) = \frac{G_c(g)}{S_u}$$

$$\text{pour les roches } K_r(\gamma) = \frac{G(\gamma) \cdot 2000}{G(\gamma \cdot 10^{-4})}$$

6.3.3.2. Approche paramétrique retenue pour tenir compte de la variabilité des données géomécaniques

Les résultats obtenus dépendent étroitement du type de comportement pris en compte pour le sol :

- comportement linéaire (élastique ou visco-élastique)
- comportement non linéaire (linéaire équivalent, élasto-plastique).

Cette différence de comportement est d'autant plus marquée que l'amplitude des mouvements sismiques est importante. Ainsi, à partir d'un certain seuil de déformation, le comportement du sol peut entrer dans le domaine plastique, ce qui entraîne une modification de l'amplitude des mouvements du sol par rapport à une réponse purement élastique.

Etant donné le type de source sismique et le niveau élevé des spectres de réponse élastique au "rocher horizontal affleurant" préconisés dans la zone du Lamentin en Martinique, le comportement de type linéaire équivalent a finalement été retenu pour le calcul des spectres de réponse élastique tenant compte des conditions de site.

Les paramètres de caractérisation des sols, pour chacune des colonnes types représentatives de la zone du Lamentin, sont : le nombre de couches, leur type associé (argile, sable ou roche), leur épaisseur, leur module de cisaillement ($G_{\max} = \rho \cdot V_s^2$) calculé à partir de la masse spécifique (ρ) et de la vitesse des ondes de cisaillement V_s associées, l'amortissement (D) et la cohésion non drainée (C_{uu}), lorsqu'il s'agit d'argiles. Le modèle permet d'obtenir numériquement une fonction de transfert multicouches de la colonne de sols, permettant le passage des conditions "rocher horizontal affleurant" aux "conditions particulières de site" et donc leur prise en compte effective.

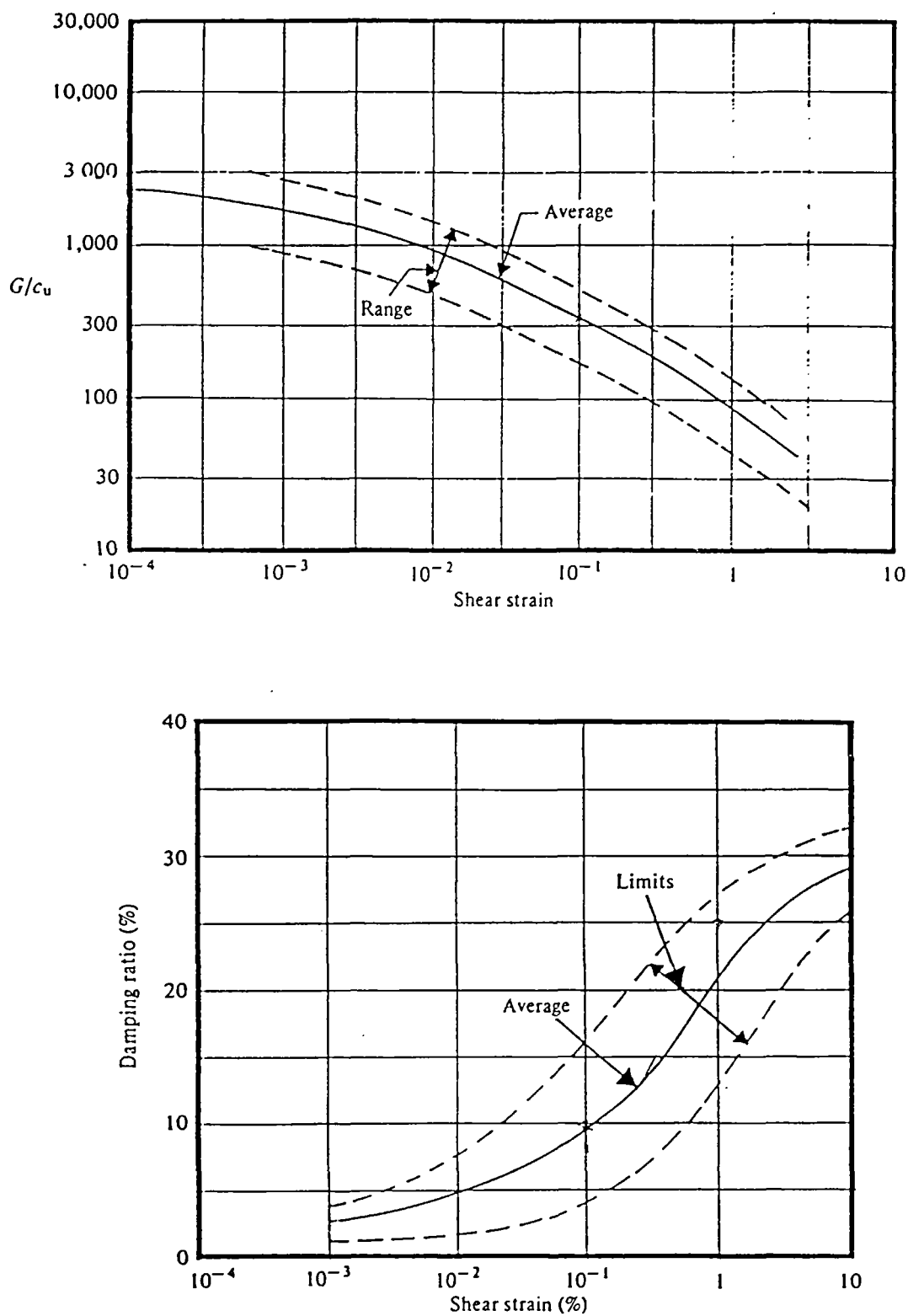


Figure 35 : Module de cisaillement et coefficient d'amortissement en fonction du taux de déformation - (d'après Seed H.B. et Idriss I.M., 1970)

Nous avons effectué des essais pour valider et tester l'influence des différents paramètres sur la réponse sismique obtenue en tête de colonne. Les paramètres caractéristiques testés pour les différentes colonnes de sol sont les suivants :

- l'épaisseur des différentes couches,
- le niveau de la nappe,
- la valeur de la cohésion non drainée,
- la vitesse des ondes S, au sein des couches et du substratum.

6.3.3.4. Calcul effectif des spectres

6.3.3.4.1. Sélection d'un nombre fini de colonnes de sol - Rappel

Comme cela était indiqué au § 6.1.6, nous avons établi un inventaire des configurations géotechniques typiques rencontrées dans la zone du Lamentin. 43 colonnes type de sol ont ainsi été extraites à partir des configurations issues de l'interprétation des données de forage, des profils géophysiques (sismiques) et des coupes géotechniques.

Nous avons ensuite procédé au calcul systématique de la réponse sismique de colonnes soumises à leur base aux accélérogrammes correspondant à la source lointaine, par l'intermédiaire du code de calcul SHAKE.

6.3.3.4.2. Tests sur l'influence des principaux paramètres

L'objectif étant de se ramener à un nombre limité de spectres moyens, nous avons procédé, pour chaque colonne de sols, à plusieurs passages de SHAKE, en testant l'influence respective des paramètres géomécaniques des horizons géotechniques. Les tests comparatifs réalisés ont abouti aux résultats suivants :

- La profondeur du substratum est le paramètre le plus influant sur la réponse dynamique des sols. Il est donc nécessaire, dans le cadre de tout microzonage d'établir une carte du toit du substratum avec le plus de précision possible.
- La cohésion non drainée des différentes couches joue un rôle prédominant quant à la réponse spectrale de la colonne lorsqu'on considère un comportement non linéaire des sols. Elle influe aussi bien sur la forme du spectre - décalage conséquent de la fréquence de résonance de la colonne - que sur les niveaux d'amplification de l'accélération maximale.
- Aucune différence n'est réellement significative entre les calculs effectués avec les valeurs extrêmes des épaisseurs des différentes couches, et ceux effectués pour une épaisseur moyenne, lorsque l'écart type est inférieur à 10 m. En revanche, des différences notables apparaissent lorsque l'écart type est supérieur. La prise en compte de la variabilité de l'épaisseur des couches du modèle est donc indispensable.
- La prise en compte à la base de la colonne du substratum rocheux fissuré au lieu du substratum rocheux sain diminue la réponse spectrale surtout à partir de 2 Hz. Ce résultat est logique dans la mesure où le contraste d'impédance entre le substratum et les couches superficielles est beaucoup moins élevé lorsqu'on prend pour référence le substratum rocheux fissuré. La connaissance des caractéristiques géomécaniques et géodynamiques du substratum constitue un point clé des études de microzonage.

- Le niveau de la nappe et la vitesse des ondes S ne semblent jouer qu'un rôle négligeable comparé aux paramètres précédents. Pour la vitesse des ondes S, en particulier, les variations cumulées des vitesses dans les formations compressibles (Fc) de ± 50 m/s et de ± 150 m/s dans la lave altérée moyenne (LAM) ne modifient pratiquement pas les spectres résultants.

6.3.3.4.3. Spectres finalement retenus

Pour chacune des 43 colonnes, nous avons établi le spectre de réponse élastique moyen tenant compte des conditions de site. L'accélération maximale du sol (accélération correspondant à une fréquence de 25 Hz) reste comprise entre 0,20 g et 0,60 g, ce qui correspond à une amplification de 1 à 3 par rapport au niveau des spectres de réponse élastique au rocher horizontal affleurant.

Pour nous ramener à un nombre limité de spectres utilisables en génie parasismique, nous avons procédé à une comparaison de l'ensemble des formes spectrales correspondant aux colonnes types testées.

Cette comparaison, basée sur la forme générale des spectres de réponse - niveaux semblables d'amplification dans la même gamme de fréquence, conduit à identifier six classes de spectres, représentatives de l'ensemble des configurations géotechniques observables sur la zone du Lamentin, définies dans le tableau suivant.

	N° de figure du spectre	N° de tableau du spectre	Accélération maximale du sol (période nulle)
Zone R1	32 (rocher)	-	0,2 g
Zone R2	36	7	0,3 g
Zone R3	37	8	0,44 g
Zone R4	38	9	0,3 g
Zone R5	39	10	0,34 g
Zone R6	40	11	0,44 g

Les valeurs en déplacement vitesse et accélération sont précisées sur les tableaux 7 à 11.

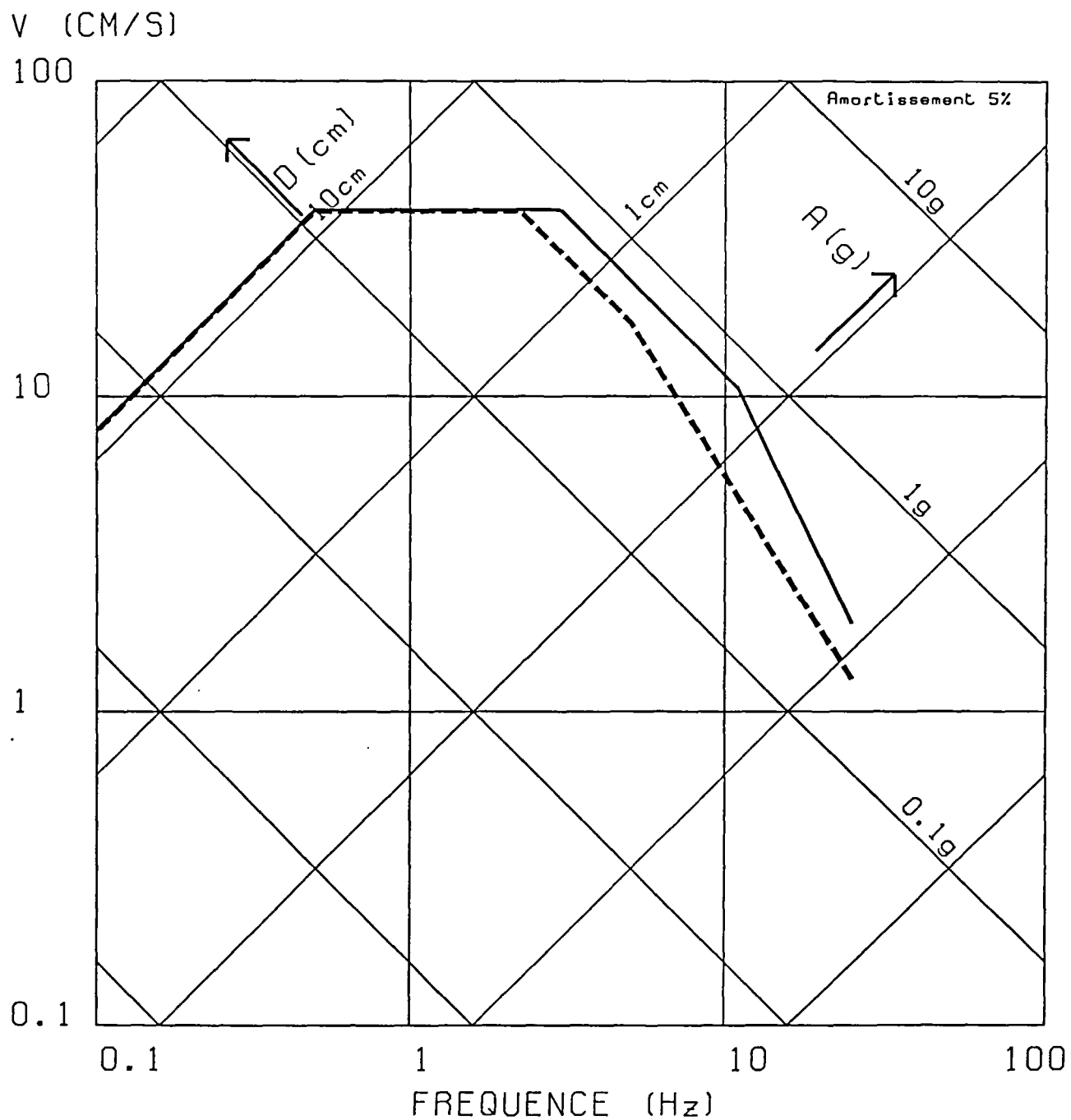


Figure 36 - Spectre de réponse élastique de la zone R2 comparé au spectre de référence au rocher - Amortissement 5‰

PROFIL (Figure 32)	F (Hz)	AMORTISSEMENT (ksi %)	A (g)	V (cm/s)	D (cm)
(1)	0.10	2	0.00488	7.76	12.36
(1)	0.10	5	0.00488	7.76	12.36
(1)	0.10	10	0.00488	7.76	12.36
(1)	0.10	20	0.00488	7.76	12.36
(2)	0.50	2	0.12205	38.85	12.37
(2)	0.50	5	0.12205	38.85	12.37
(2)	0.50	10	0.12205	38.85	12.37
(2)	0.50	20	0.12205	38.85	12.37
(3)	3.00	2	0.73230	38.85	2.06
(3)	3.00	5	0.73230	38.85	2.06
(3)	3.00	10	0.73230	38.85	2.06
(3)	3.00	20	0.73230	38.85	2.06
(4)	11.00	2	0.73230	10.60	0.15
(4)	11.00	5	0.73230	10.60	0.15
(4)	11.00	10	0.73230	10.60	0.15
(4)	11.00	20	0.73230	10.60	0.15
(5)	25.00	V ksi	0.30000	1.91	0.01

Tableau 7
Zone R2 - Valeurs en accélération, vitesse et déplacement en chaque noeud du spectre

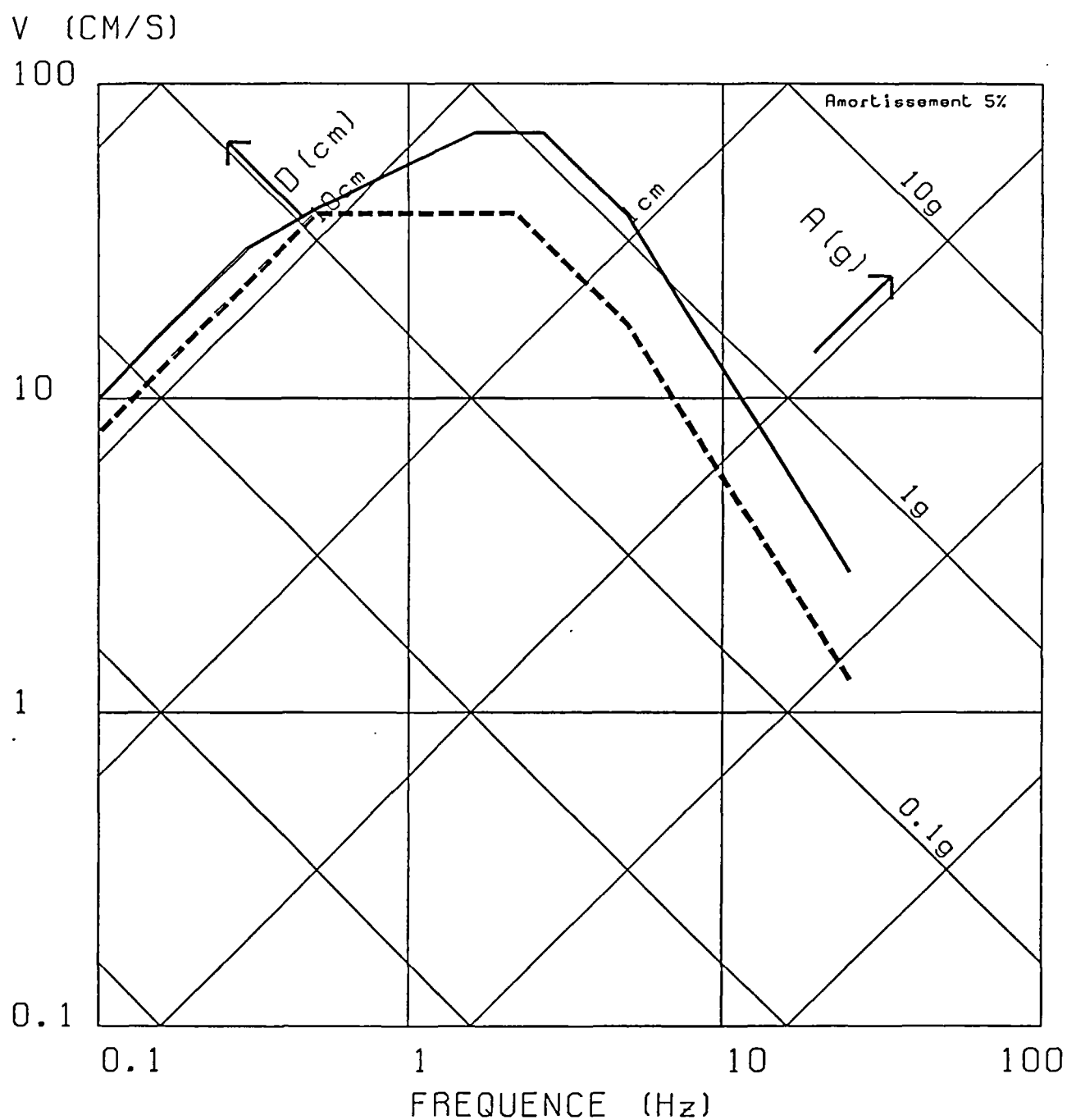


Figure 37
Spectre de réponse élastique de la zone R3 comparé au spectre de référence au rocher -
Amortissement 5‰

PROFIL (Figure 33)	F (Hz)	AMORTISSEMENT (ksi %)	A (g)	V (cm/s)	D (cm)
(1)	0.10	2	0.00628	10.00	15.92
(1)	0.10	5	0.00628	10.00	15.92
(1)	0.10	10	0.00628	10.00	15.92
(1)	0.10	20	0.00628	10.00	15.92
(2)	0.30	2	0.05655	30.00	15.92
(2)	0.30	5	0.05655	30.00	15.92
(2)	0.30	10	0.05655	30.00	15.92
(2)	0.30	20	0.05655	30.00	15.92
(3)	0.50	2	0.12566	40.00	12.73
(3)	0.50	5	0.12566	40.00	12.73
(3)	0.50	10	0.12566	40.00	12.73
(3)	0.50	20	0.12566	40.00	12.73
(4)	1.65	2	0.72571	70.00	6.75
(4)	1.65	5	0.72571	70.00	6.75
(4)	1.65	10	0.72571	70.00	6.75
(4)	1.65	20	0.72571	70.00	6.75
(5)	2.72	2	1.19632	70.00	4.10
(5)	2.72	5	1.19632	70.00	4.10
(5)	2.72	10	1.19632	70.00	4.10
(5)	2.72	20	1.19632	70.00	4.10
(6)	5.00	2	1.19632	38.08	1.21
(6)	5.00	5	1.19632	38.08	1.21
(6)	5.00	10	1.19632	38.08	1.21
(6)	5.00	20	1.19632	38.08	1.21
(7)	25.00	V ksi	0.44000	2.80	0.02

Tableau 8
Zone R3 - Valeurs en accélération, vitesse et déplacement en chaque noeud du spectre

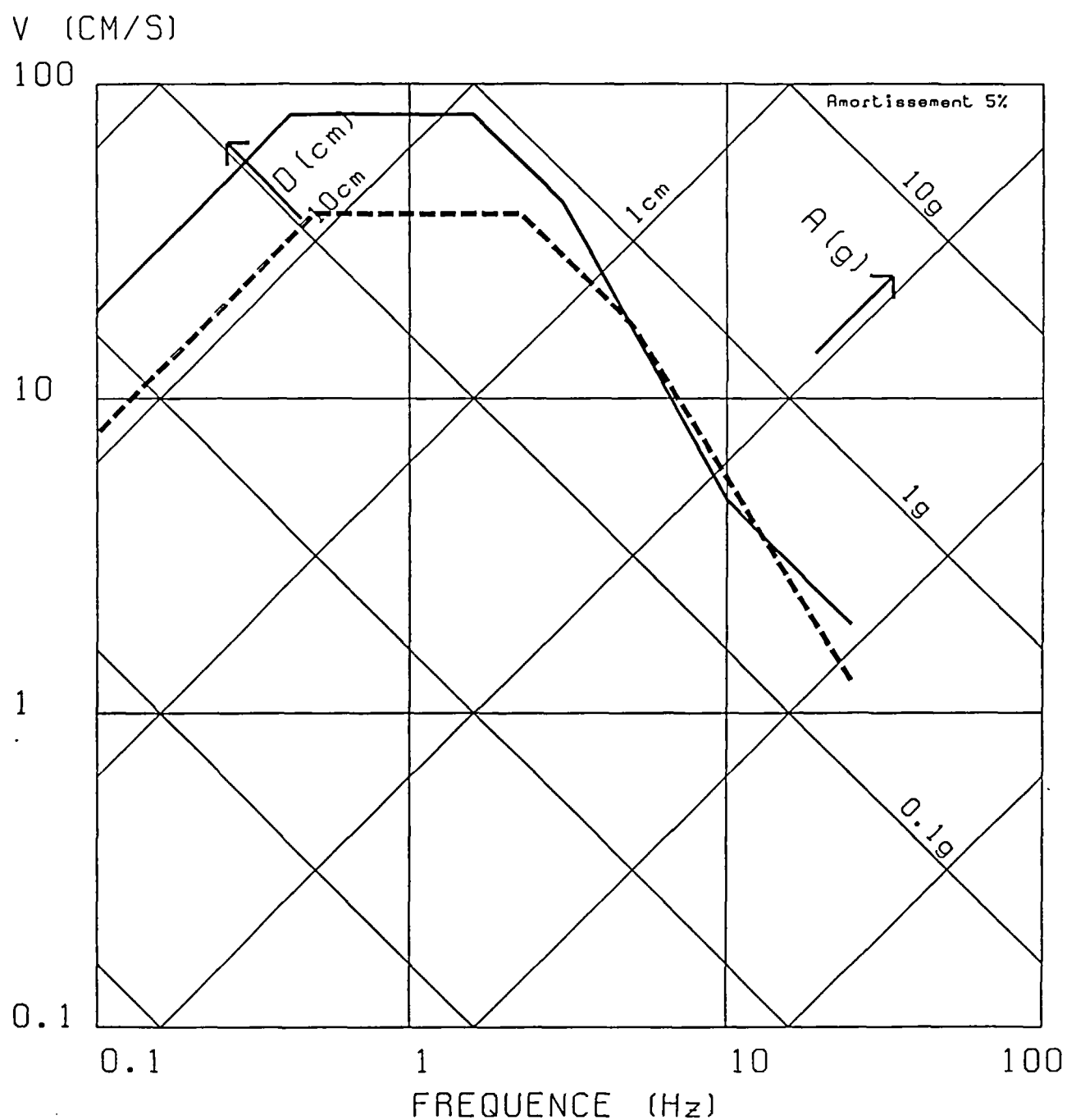


Figure 38
Spectre de réponse élastique de la zone R4 comparé au spectre de référence au rocher -
Amortissement 5%

PROFIL (Figure 31)	F (Hz)	AMORTISSEMENT (ksi %)	A (g)	V (cm/s)	D (cm)
(1)	0.10	2	0.01184	18.85	30.00
(1)	0.10	5	0.01184	18.85	30.00
(1)	0.10	10	0.01184	18.85	30.00
(1)	0.10	20	0.01184	18.85	30.00

(2)	0.42	2	0.21112	80.00	30.32
(2)	0.42	5	0.21112	80.00	30.32
(2)	0.42	10	0.21112	80.00	30.32
(2)	0.42	20	0.21112	80.00	30.32

(3)	1.59	2	0.79922	80.00	8.01
(3)	1.59	5	0.79922	80.00	8.01
(3)	1.59	10	0.79922	80.00	8.01
(3)	1.59	20	0.79922	80.00	8.01

(4)	3.00	2	0.80000	42.44	2.25
(4)	3.00	5	0.80000	42.44	2.25
(4)	3.00	10	0.80000	42.44	2.25
(4)	3.00	20	0.80000	42.44	2.25

(5)	10.00	2	0.30000	4.77	0.08
(5)	10.00	5	0.30000	4.77	0.08
(5)	10.00	10	0.30000	4.77	0.08
(5)	10.00	20	0.30000	4.77	0.08

(6)	25.00	V ksi	0.30000	1.91	0.01

Tableau 9
Zone R4 - Valeurs en accélération, vitesse et déplacement en chaque nœud du spectre

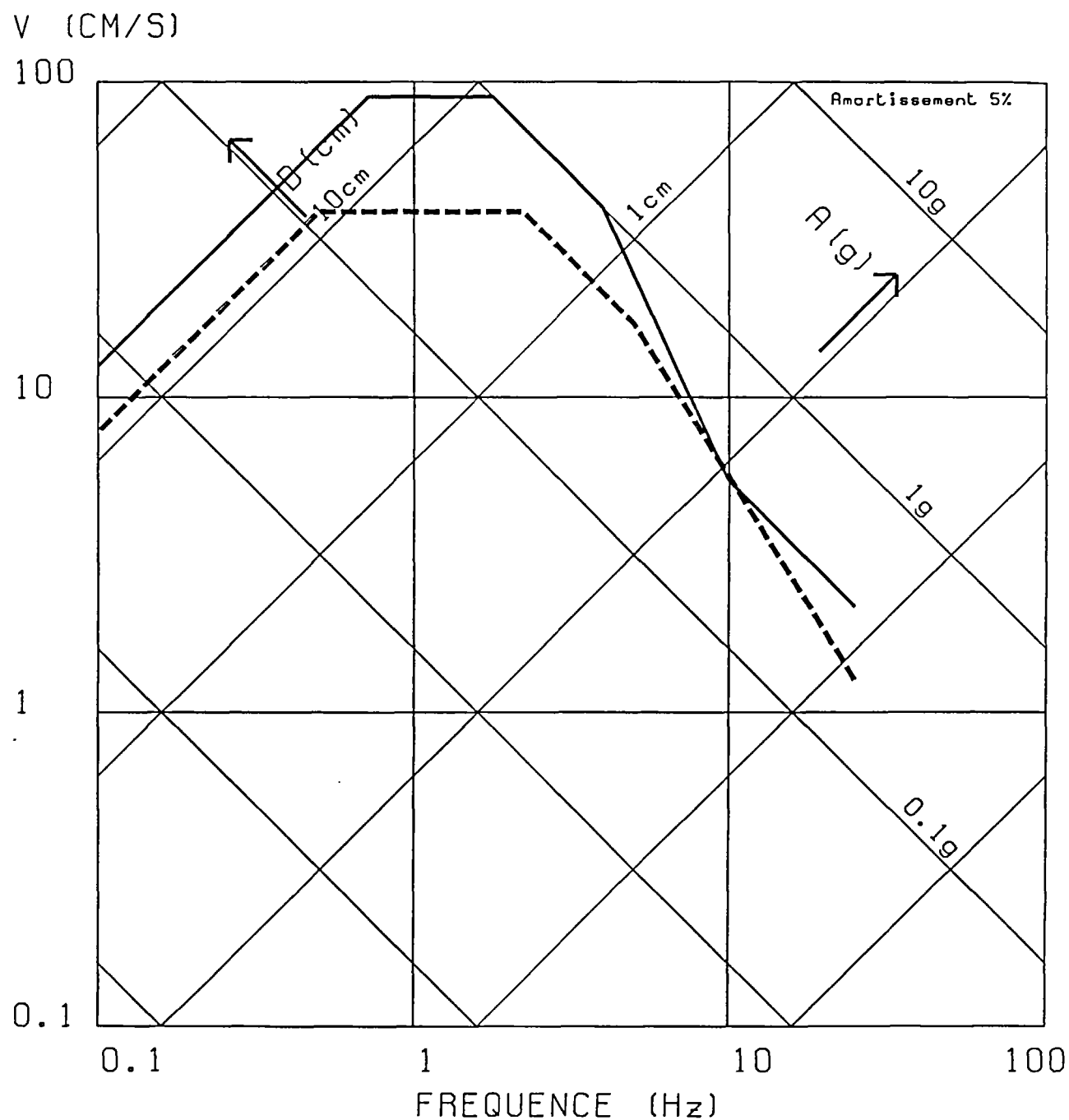


Figure 39
Spectre de réponse élastique de la zone R5 comparé au spectre de référence au rocher -
Amortissement 5‰

PROFIL (Figure 30)	F (Hz)	AMORTISSEMENT (ksi %)	A (g)	V (cm/s)	D (cm)
(1)	0.10	2	0.00790	12.57	20.00
(1)	0.10	5	0.00790	12.57	20.00
(1)	0.10	10	0.00790	12.57	20.00
(1)	0.10	20	0.00790	12.57	20.00

(2)	0.72	2	0.40715	90.00	19.89
(2)	0.72	5	0.40715	90.00	19.89
(2)	0.72	10	0.40715	90.00	19.89
(2)	0.72	20	0.40715	90.00	19.89

(3)	1.77	2	1.00091	90.00	8.09
(3)	1.77	5	1.00091	90.00	8.09
(3)	1.77	10	1.00091	90.00	8.09
(3)	1.77	20	1.00091	90.00	8.09

(4)	4.00	2	1.00531	40.00	1.59
(4)	4.00	5	1.00531	40.00	1.59
(4)	4.00	10	1.00531	40.00	1.59
(4)	4.00	20	1.00531	40.00	1.59

(5)	10.00	2	0.34000	5.41	0.09
(5)	10.00	5	0.34000	5.41	0.09
(5)	10.00	10	0.34000	5.41	0.09
(5)	10.00	20	0.34000	5.41	0.09

(6)	25.00	V ksi	0.34000	2.16	0.01

Tableau 10
Zone R5 - Valeurs en accélération, vitesse et déplacement en chaque noeud du spectre

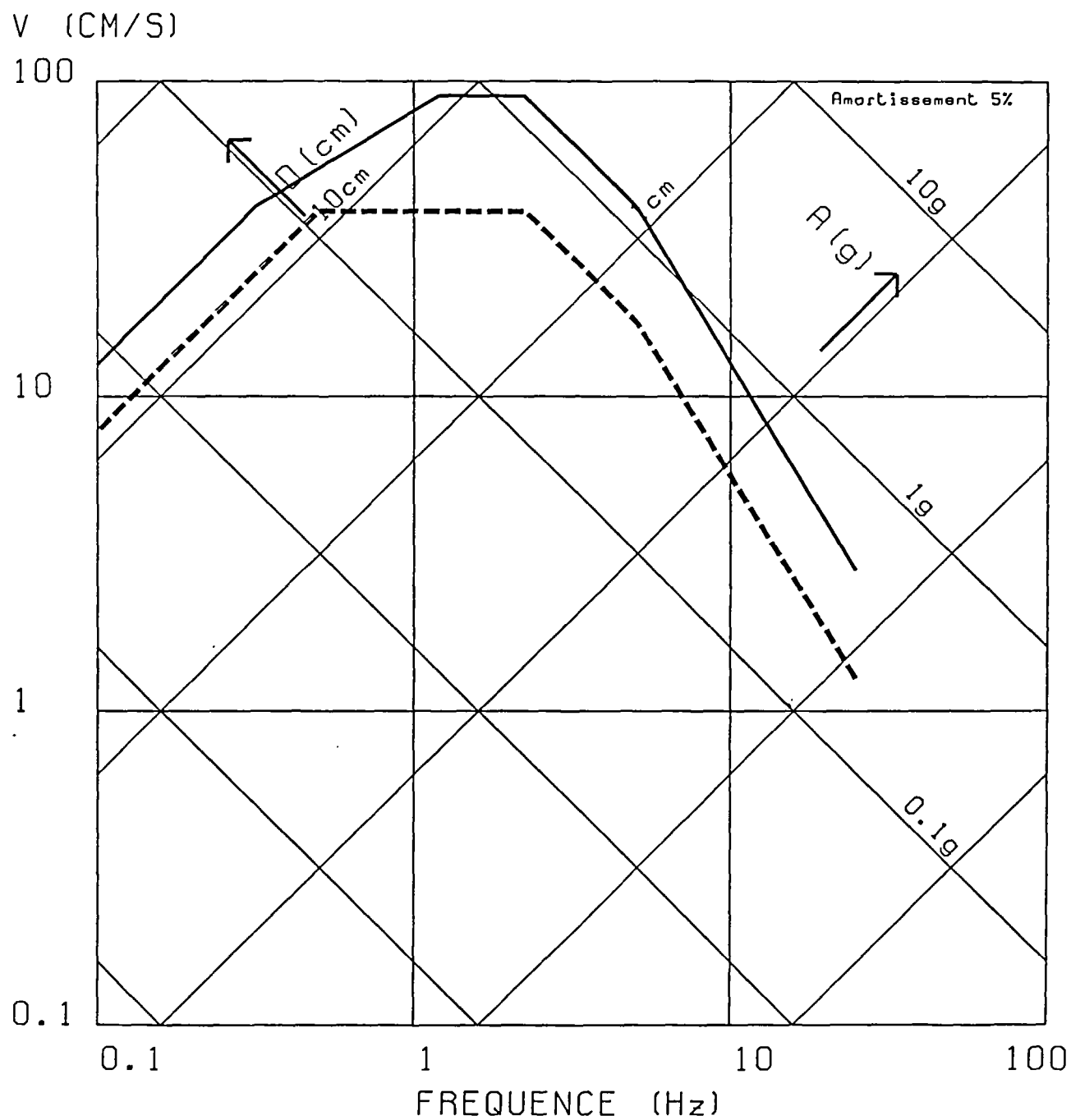


Figure 40
Spectre de réponse élastique de la zone R6 comparé au spectre de référence au rocher -
Amortissement 5‰

PROFIL (Figure 29)	F (Hz)	AMORTISSEMENT (ksi %)	A (g)	V (cm/s)	D (cm)
(1)	0.10	2	0.00790	12.57	20.00
(1)	0.10	5	0.00790	12.57	20.00
(1)	0.10	10	0.00790	12.57	20.00
(1)	0.10	20	0.00790	12.57	20.00
(2)	0.32	2	0.08085	40.21	20.00
(2)	0.32	5	0.08085	40.21	20.00
(2)	0.32	10	0.08085	40.21	20.00
(2)	0.32	20	0.08085	40.21	20.00
(3)	1.20	2	0.67858	90.00	11.94
(3)	1.20	5	0.67858	90.00	11.94
(3)	1.20	10	0.67858	90.00	11.94
(3)	1.20	20	0.67858	90.00	11.94
(4)	2.20	2	1.24407	90.00	6.51
(4)	2.20	5	1.24407	90.00	6.51
(4)	2.20	10	1.24407	90.00	6.51
(4)	2.20	20	1.24407	90.00	6.51
(5)	5.00	2	1.25664	40.00	1.27
(5)	5.00	5	1.25664	40.00	1.27
(5)	5.00	10	1.25664	40.00	1.27
(5)	5.00	20	1.25664	40.00	1.27
(6)	25.00	V ksi	0.44000	2.80	0.02

Tableau 11
Zone R6 - Valeurs en accélération, vitesse et déplacement en chaque noeud du spectre

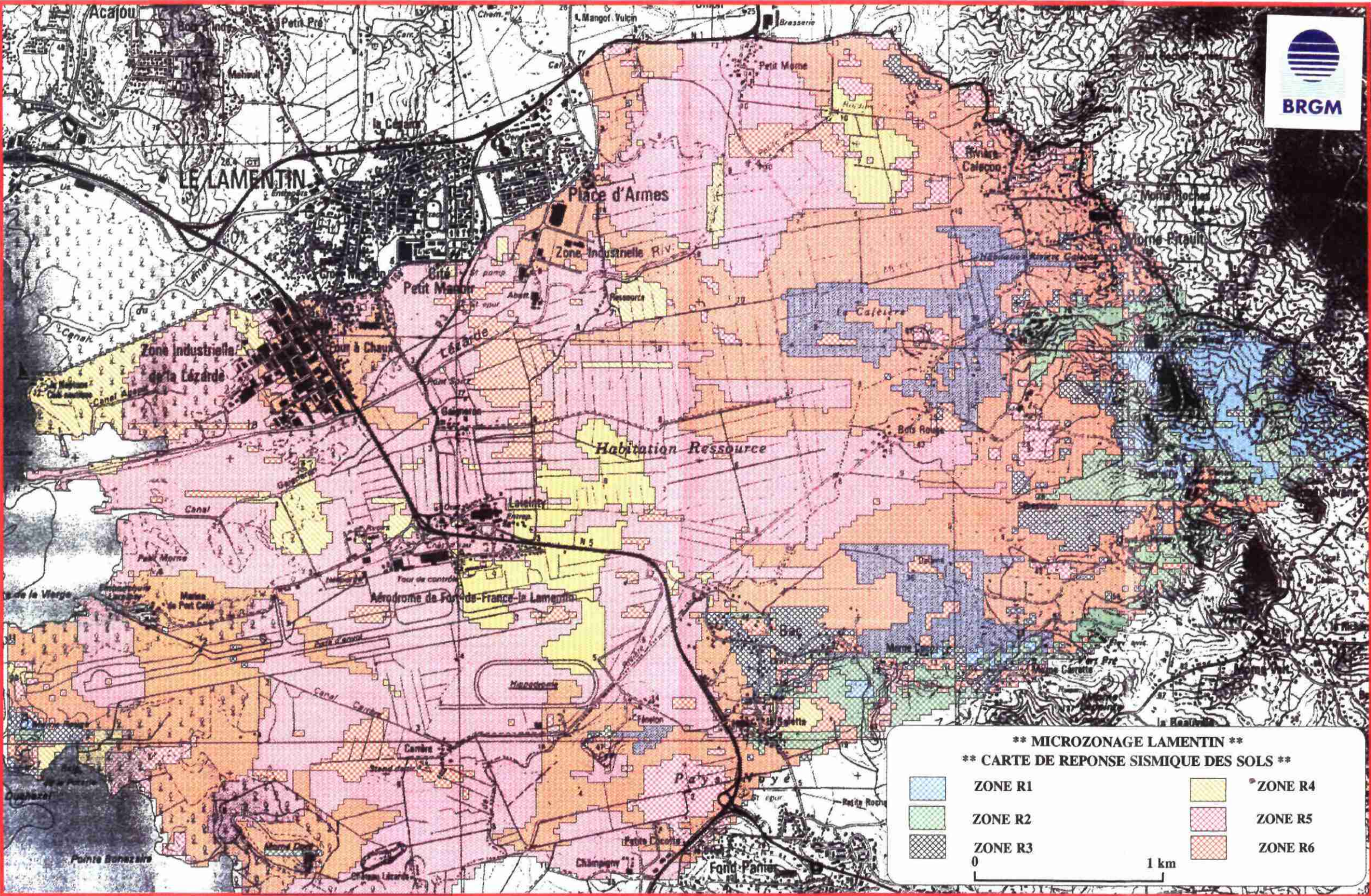
6.3.4. Cartographie des effets de site : niveau C

La démarche précédente a permis de subdiviser la zone d'étude en 6 zones présentant une réponse sismique homogène, et d'associer à chacune d'elles, un spectre de réponse. A chacune de ces zones correspondent une ou plusieurs des 43 configurations géotechniques existantes.

En chaque maille du modèle géotechnique, il suffit alors de procéder au différentiel des MNT, pour obtenir la configuration géotechnique sous-jacente, puis d'appliquer les critères logiques de reconnaissance des configurations géotechniques types, affectées d'un spectre donné.

Le zonage final des effets de site est présenté figure 41.

Figure 41



7. CONCLUSION

L'expérience acquise lors des études de microzonage sismique, dans le cadre du précédent contrat de plan état-région, avait permis de souligner certaines difficultés et problèmes inhérents à la méthode mise en oeuvre. Il s'agissait en particulier :

- des difficultés de gestion **d'une masse considérable de données géologiques et géotechniques** ;
- des difficultés à identifier, sur une zone de plusieurs km² les **zones présentant une réponse sismique homogène**, uniquement à partir d'un **traitement et d'un croisement "manuels"** des données de base, laissant ainsi une certaine part de **subjectivité de l'interprétation** ;
- de la lourdeur de la **cartographie manuelle des résultats** ;
- de la difficulté à intégrer, une fois les cartes produites, des connaissances nouvelles susceptibles de modifier les cartes préexistantes.

Il est ainsi apparu nécessaire de disposer d'outils et méthodes plus efficaces, permettant aussi bien la gestion et le traitement informatisés des données, que l'évaluation et la cartographie plus automatisées de l'aléa local. C'est la raison pour laquelle le parti a été pris d'étudier, dans le cadre d'un projet de recherches, la faisabilité de la réalisation des microzonages sismiques sous un système d'informations géographiques (SIG).

Les grandes lignes de cette évolution ont été les suivantes :

- ① il a fallu tout d'abord **acquérir, interpréter et valider les différentes informations de base** ;
- ② puis, les **structurer sous forme informatisée**. Ainsi, les données ponctuelles de sondages ont été saisies sous forme de fichier ASCII et les cartes thématiques préexistantes digitalisées ;
- ③ une **procédure d'élaboration d'un modèle numérique géotechnique 3D** du sous-sol a ensuite été élaborée. Elle permet :
 - la création d'un modèle numérique de chaque niveau géotechnique ;
 - la génération de coupes géotechniques ;
 - l'extraction des caractéristiques géomécaniques des différents niveaux.
- ④ enfin, des logiciels d'évaluation et de cartographie des effets de site, exploitant le modèle géotechnique numérique 3D ont été développés. Ils permettent une **évaluation de l'aléa local**, suivant les trois niveaux d'étude (A, B, C), du plus simple au plus complexe, préconisés par l'Association française de Génie Parasismique (AFPS).

Cette méthode présente de multiples avantages :

- tout d'abord, elle permet de structurer les données de base utilisées, d'en conserver une trace informatisée et de les rendre aisément accessibles, par niveaux d'information ;

- les logiciels d'exploitation du modèle numérique géotechnique permettent d'homogénéiser l'évaluation de l'aléa et sa cartographie, en réduisant la part de subjectivité inhérente aux interprétations d'expert des méthodes plus conventionnelles ;
- les cartes produites peuvent être actualisées, en fonction de données nouvelles ;
- toute l'information disponible sur la zone d'étude est accessible de façon sélective ou globale ;
- enfin, la structuration sous SIG permet d'envisager le croisement des données relatives à l'aléa à celles concernant la vulnérabilité, et donc de réaliser une véritable évaluation du risque.

Il ne faut cependant pas occulter certaines difficultés ou limitations propres à la méthode. La qualité des résultats obtenus n'est en particulier que le reflet de celle des données de base entrées dans le modèle. C'est donc à la phase d'acquisition, de validation et de structuration de ces données, qu'il faut porter une attention particulière.

Par ailleurs, s'il est vrai que les procédures d'interpolation permettent de renseigner le modèle en tout point, il faut néanmoins distinguer trois types d'informations : celles issues des sondages ou reconnaissances, celles résultant des coupes géotechniques réalisées à la main et celles issues enfin de l'interpolation. Les tests réalisés au cours de cette étude montrent que les résultats ne sont fiables que lorsque 8% au moins des données appartiennent aux deux premières catégories. ceci souligne l'importance qu'il faut accorder à la collecte des données in-situ, dans les études de microzonage.

Enfin, l'une des difficultés majeures réside dans la modélisation des reliefs très prononcés (escarpements, par exemple) ou des géométries complexes du sous-sol, liées par exemple, à la présence de failles. Dans l'état actuel, si le modèle permet de prendre en compte de telles géométries, par un contrôle manuel des mailles du modèle, les procédures méritent d'être améliorées.

Cela étant, la méthode ainsi développée est opérationnelle et a permis de progresser de manière significative sur le plan de la quantification et de la cartographie des effets de site en zones urbaines. Les résultats obtenus dans le cadre de la présente étude, pourront être intégrés et sans nul doute étendus lors de la réalisation du plan d'exposition aux risques de l'agglomération de Fort de France.