



Ministère de l'Industrie,  
de la Poste et des  
Télécommunications



MINISTÈRE DE  
L'ENVIRONNEMENT

***Projet GEMITIS Nice :  
évaluation de l'aléa sismique local sur la ville de Nice***

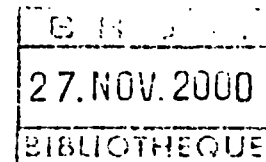
**Etude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 96-H-269**

décembre 1996  
R 39082





Ministère de l'Industrie,  
de la Poste et des  
Télécommunications



***Projet GEMITIS Nice :  
évaluation de l'aléa sismique local sur la ville de Nice***

**Etude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 96-H-269**

**décembre 1996  
R 39082**

**Mots clés :** Aléa sismique local, Effets de site, Effets induits, Alpes Maritimes (Nice)

**En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :**

**Stieltjes L., Bour M., Monge O. avec la coll. de Martin C. et Mouroux P. (1997) - Projet GEMITIS Nice : évaluation de l'aléa sismique local sur la ville de Nice. Rap. BRGM R39082, 80 p., 22 fig., 9 tabl., 8 pl. h.t.**

© BRGM, 1996, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## **Synthèse**

Dans le cadre du projet GEMITIS élaboré pour la Décennie Internationale pour la Prévention des Catastrophes Naturelles (DIPCN), les Ministères de l'Environnement et de l'Industrie ont chargé le BRGM, en 1995 et 1996, de réaliser une étude méthodologique de l'évaluation de l'aléa sismique sur la ville de Nice.

Cette étude d'aléa s'inscrit comme l'un des volets de la détermination du risque sismique dans une ville de moyenne importance du pourtour méditerranéen, dans un contexte de sismicité modérée. Cette approche globale et simplifiée à 1/25 000 (niveau A du microzonage AFPS) a pour objectif la réalisation de scénarios de risque ; en aucun cas, elle ne peut être transposée directement dans un PPR ou un POS, sans passer par des études détaillées (1/5 000).

Les résultats d'études préliminaires d'aléa sismique (aux échelles nationale, régionale ou locale) utiles à prendre en compte pour cette étude locale sont les suivants :

- **contexte sismotectonique** : l'agglomération de Nice est traversée par l'importante faille sismogène de Saint-Blaise - Aspremont (faille décrochante dextre), à laquelle plusieurs séismes historiques ( $I_0 = VIII$ ) ont été associés : 1494, 1618, 1644 ;
- **séisme de référence** pour Nice : 15 février 1644 ; situé à moins de 30 km au Nord de la ville ; son intensité épicentrale  $I_0$  est de VIII ;
- **zone de sismicité II** pour tout l'arrondissement de Nice (en vue de l'application des règles de construction parasismique, rendues obligatoires depuis 1994).

Les résultats du microzonage sismique réalisé sur la ville de Nice (à l'échelle du 1/25 000), font ressortir les importantes variations d'amplitude d'un quartier à l'autre de la ville pour les effets directs (" effets de site ") et les effets induits d'un séisme survenant dans la région :

- **les effets de site lithologiques** peuvent avoir une grande amplitude, dans tout le centre ville (construit sur d'importantes vallées alluviales) ainsi que dans la vallée du Var (zones industrielles, ZAC, habitat collectif, ...).

Les quatre classes de sites lithologiques ( $S_0, S_1, S_2, S_3$ ) préconisées par les règles PS 92, n'ont pu être distinguées que dans le centre-ville (à partir des données géotechniques, d'une modélisation 1D " SHAKE " de réponse sismique des sols, des enregistrements du bruit de fond sismique). Pour tout le reste de la commune, les classes  $S_2$  et  $S_3$  ont dû être regroupées ;

- **les effets de site topographiques** concernent essentiellement les forts reliefs du centre-ville (le Château, le Mt Boron, ...) ainsi que certaines collines du Nord de la ville ;

- **les effets induits cartographiés sont de deux types :**
  - les mouvements de terrain (éboulements, glissements, effondrements), dans la plupart des reliefs de la commune ;
  - la liquéfaction des sols sableux situés sous le niveau des nappes, en particulier dans le centre-ville, les vallées du Paillon et du Var, pouvant provoquer l'affaissement de constructions.

Pour l'application des règles de construction parasismique sur Nice, il conviendra d'appliquer les spectres de réponse élastiques des sols calculés dans cette étude (spécifiques au sous-sol local) plutôt que les spectres généraux PS 92.

## Sommaire

<b>1. Contexte et cadre général</b> .....	11
1.1. Le projet GEMITIS Nice .....	11
1.2. Cadre spécifique et objectifs de la présente étude .....	12
1.3. Présentation géographique et géologique.....	13
1.3.1. Cadre géographique.....	13
1.3.2. Cadre géologique et hydrogéologique.....	15
<b>2. Rappels méthodologiques sur l'évaluation de l'aléa sismique</b> .....	19
2.1. Echelle régionale : 1/500 000 à 1/1 000 000 .....	19
2.2. Echelle locale : 1/5 000 à 1/25 000 .....	22
<b>3. Travaux réalisés lors des phases antérieures</b> .....	25
3.1. Evaluation de l'aléa sismique régional.....	26
3.1.1. Contexte sismotectonique.....	26
3.1.2. Mouvements sismiques de référence .....	28
3.2. Evaluation de l'aléa sismique local .....	29
3.2.1. Modèle géotechnique 3D .....	29
3.2.2. Evaluation de l'aléa " effets de site " .....	29
3.2.3. Proposition de zonages préliminaires.....	31
3.2.4. Evaluation de l'aléa " liquéfaction " .....	31
<b>4. Failles actives</b> .....	33
4.1. Définition.....	33
4.2. Reconnaissance des failles actives, identification des failles sismogènes pour la ville de Nice .....	33

<b>5. Effets de site</b> .....	<b>35</b>
5.1. Effets de site topographiques .....	35
5.1.1. Compréhension des phénomènes physiques.....	35
5.1.2. Quantification des effets de site topographiques.....	35
5.1.3. Zonage des effets de site topographiques sensibles sur la ville de Nice.....	37
5.2. Effets de site liés à la lithologie.....	37
5.2.1. Compréhension des phénomènes physiques.....	38
5.2.2. Quantification des effets de site lithologiques.....	39
5.2.3. Zonage des effets de site lithologiques .....	42
<b>6. Phénomènes induits</b> .....	<b>45</b>
6.1. Mouvements de terrain.....	45
6.2. Liquéfaction des sols sous sollicitations sismiques .....	46
6.2.1. Définition .....	46
6.2.2. Description du phénomène.....	46
6.2.3. Contexte niçois.....	47
6.2.4. Mise en oeuvre de la méthode.....	47
6.2.5. Résultats.....	48
6.2.6. Conclusion .....	49
<b>7. Mouvements sismiques à prendre en compte</b> .....	<b>55</b>
7.1. Introduction.....	55
7.2. Révision du zonage proposé en 1995.....	55
7.2.1. Justification de ce nouveau zonage.....	55
7.2.2. Spectres de réponse élastiques.....	56
7.3. Comparaison entre résultats expérimentaux et numériques.....	60
7.3.1. Données et hypothèses de travail .....	60
7.3.2. Fonctions de transfert .....	62
7.3.3. Spectres de réponse.....	64
7.4. Mouvements sismiques retenus .....	68

<b>8. Conclusions et bilan .....</b>	<b>75</b>
8.1. Résultats antérieurs utilisés.....	75
8.2. Résultats acquis .....	76
8.2.1. Les effets directs.....	76
8.2.2. Les effets induits.....	77
8.3. Bilan.....	78
<b>Bibliographie.....</b>	<b>79</b>

### Liste des figures

Fig. 1 - Organigramme du projet GEMITIS Nice.....	12
Fig. 2 - Géologie des formations superficielles de la commune de Nice. ....	16
Fig. 3 - Evaluation de l'aléa sismique à l'échelle locale : calcul des effets de site (aléa local) et des effets induits. ....	23
Fig. 4 - Sismicité historique et failles principales du Sud-Est de la France.....	27
Fig. 5 - Carte du régime des contraintes pour les failles de Saint-Blaise - Aspremont et Sospel - Monaco à partir de l'analyse des microfailles. ....	34
Fig. 6 - Exemples de configurations lithologiques types provoquant une amplification des ondes sismiques (= effet de site lithologique). ....	38
Fig. 7a - N brut de l'essai SPT assurant un facteur de sécurité de 1,33 : nappe du Paillon.....	50
Fig. 7b - N brut de l'essai SPT assurant un facteur de sécurité de 1,33 : nappe du Var. ....	51
Fig. 8a - N brut de l'essai SPT induisant 100% de surpression interstitielle : nappe du Paillon.....	52
Fig. 8b - N brut de l'essai SPT induisant 100% de surpression interstitielle : nappe du Var.....	53
Fig. 9 - Implantation des stations d'enregistrement (triangles) et des 14 profils sélectionnés dans la zone d'étude pilote. ....	57
Fig. 10 - Spectres de réponse élastiques normalisés obtenus par approche numérique et regroupés en 3 zones.....	59
Fig. 11 - Spectres de réponse élastiques normalisés, pour chaque zone : courbe moyenne, courbe moyenne $\pm$ écart-type et forme simplifiée.....	61
Fig. 12 - Schéma de la procédure utilisée pour la détermination de mouvements sismiques tenant compte des conditions locales de site, par approche numérique. ....	63
Fig. 13 - Comparaison entre les fonctions de transfert obtenues sur les sites ALS et LIB. ....	64

Fig. 14 - Schéma de la procédure proposée pour la détermination de mouvements sismiques tenant compte des conditions locales de site, par approche expérimentale.....	66
Fig. 15 - Comparaison entre les spectres de réponse élastiques obtenus sur les sites ALS et LIB pour un niveau d'accélération au rocher de 0.25 g.....	67
Fig. 16 - Comparaison entre les spectres de réponse élastiques obtenus pour chacune des 4 zones par les modélisations 1D (traits gras) avec ceux préconisés par les règles PS 92 pour les sites S1, S2, S3 (traits fins), (pour $a_R = 0.25$ g).....	69
Fig. 17 - Comparaison entre les spectres de réponse élastiques obtenus pour chacune des 4 zones par les modélisations 1D (traits gras) avec ceux préconisés par les PS 92 pour les sites S1, S2, S3 (traits fins), (pour $a_R = 0.15$ g).....	70
Fig. 18 - Comparaison entre les spectres de réponse élastiques obtenus pour chacune des 4 zones par les modélisations 1D (traits gras) avec ceux préconisés par les PS 92 pour les sites S1, S2, S3 (traits fins), (pour $a_R = 0.35$ g).....	71
Fig. 19 - Comparaison entre les spectres de réponse élastiques obtenus pour chacune des 4 zones par les modélisations 1D (traits gras) avec ceux préconisés par Borchardt (1994) pour des sites de caractéristiques mécaniques comparables B1, B2, B3 (traits fins), (pour $a_R = 0.25$ g).....	73
Fig. 20 - Comparaison entre les spectres de réponse élastiques obtenus pour chacune des 4 zones par les modélisations 1D (traits gras) avec ceux préconisés par Dickenson & Seed (1996) pour des sites de caractéristiques mécaniques comparables A, B, C (traits fins), (pour $a_R = 0.25$ g).....	74

### Liste des tableaux

Tabl. 1 - Les trois principaux types de zonage sismique : zonage macrosismique, zonage " sismotectonique " et microzonage sismique(d'après Stieltjes, 1995). .....	20
Tabl. 2 - Méthodes d'évaluation de l'aléa sismique à l'échelle régionale.....	21
Tabl. 3 - Principaux séismes connus, d'intensité supérieure à VII, s'étant produits dans les Alpes du Sud(d'après le fichier national " SIRENE " de la sismicité historique de la France).....	27
Tabl. 4 - Caractéristiques du séisme historique de référence pris en compte pour l'évaluation de l'aléa sismique pour la ville de Nice(Blès et al., 1992). .....	28
Tabl. 5 - Paramètres d'identification des sols(règles PS 92).....	40
Tabl. 6 - Classification des sols en 4 types de sites lithologiques,d'après la combinaison de leurs caractéristiques géotechniques et de leur épaisseur(règles parasismiques PS 92). .....	41
Tabl. 7 - Qualification des niveaux d'intensité de l'aléa " mouvement de terrain sous sollicitation sismique ", utilisée dans la cartographie du zonage de cet aléa.....	45

Tabl. 8 - Liste par zone et par accélération au rocher $a_R$ , des valeurs moyennes avec écarts-types, de l'épaisseur $H$ de la colonne de sol et de l'accélération maximale au site $a_S$ .....	58
Tabl. 9 - Définition des spectres élastiques normalisés retenus, à l'aide des coordonnées des points A à D. ....	60

#### Liste des planches hors-texte

- Planche 1 - Carte géologique (1/25 000)
- Planche 2 - Carte hydrogéologique (1/25 000)
- Planche 3 - Zonage de l'aléa sismique local : effets de site topographiques
- Planche 4 - Classification des sites lithologiques de référence situés dans les alluvions (d'après l'exploitation des sondages géotechniques extraits de la Banque des données du Sous-Sol - BSS -)
- Planche 5 - Interprétation de l'épaisseur des alluvions (d'après la paléomorphologie, les données structurales et les sondages)
- Planche 6 - Zonage de l'aléa sismique local : effets de site lithologiques (pour l'ensemble de la commune de Nice)
- Planche 7 - Zonage de l'aléa sismique local : effets de site lithologiques (pour le secteur pilote du centre-ville)
- Planche 8 - Zonage de l'aléa sismique local : phénomènes induits, mouvements de terrain

# 1. Contexte et cadre général

## 1.1. LE PROJET GEMITIS NICE

Le Comité Français de la DIPCN (Décennie Internationale pour la Prévention des Catastrophes Naturelles) a proposé un programme de coopération entre villes méditerranéennes, portant sur la gestion des risques majeurs dans la planification urbaine.

La ville de Nice a été sélectionnée pour la réalisation d'une opération pilote à caractère méthodologique (GEMITIS<sup>1</sup> Nice), destinée à appuyer la mise en place d'une politique de prévention dans une ville du pourtour méditerranéen, portant en particulier sur les points suivants :

- description du milieu physique, identification des phénomènes naturels (séismes, mouvements de terrain, liquéfaction, inondations) et leurs effets sur l'environnement naturel, humain et socio-économique ;
- analyse des enjeux humains, socio-économiques et fonctionnels et de leur vulnérabilité aux aléas décrits précédemment, pour identifier les "points faibles" du système urbain (zones fragiles, dysfonctionnements potentiels, ...) ;
- élaboration de scénarios de crise, et évaluation du coût d'une catastrophe survenant en milieu urbain ;
- propositions de solutions pour la prévention des risques naturels et la préparation à la gestion de crise ;
- propositions d'actions pour l'information préventive de la population et la formation, des cadres territoriaux plus particulièrement ;
- définition, par la municipalité, d'un plan d'action préventive à moyen - long terme, appuyé par des techniques de négociations et d'aide à la décision.

L'organigramme général des opérateurs du projet GEMITIS Nice est détaillé dans la figure 1.

---

<sup>1</sup> GEMITIS vient du grec " gê ", terre et du latin " mitigare ", doux, tempéré, signifie " terre civilisée "

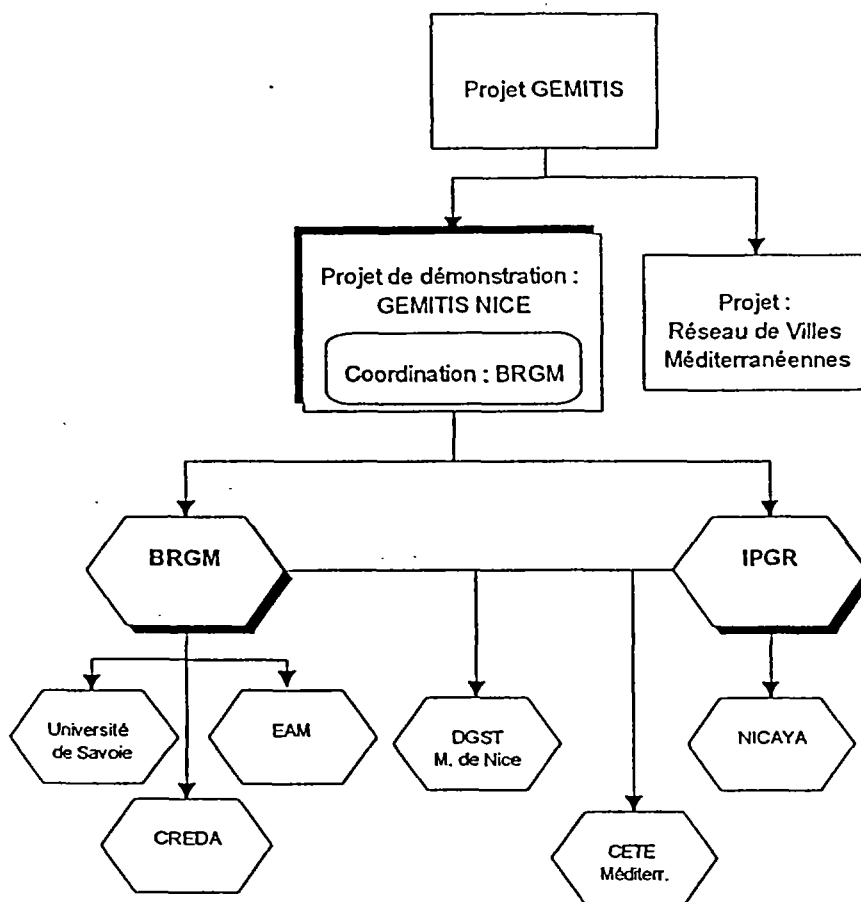


Fig. 1 - Organigramme du projet GEMITIS Nice.

## 1.2. CADRE SPECIFIQUE ET OBJECTIFS DE LA PRESENTE ETUDE

En 1995-1996, le projet GEMITIS Nice comporte plusieurs modules<sup>2</sup>, dont le premier concerne l'évaluation des aléas naturels. Le BRGM est chargé de sa réalisation pour l'aspect sismicité. Ce travail est réalisé dans le cadre de la convention n° 29/95 pour le compte du Ministère de l'Environnement, et bénéficie également d'un financement du Ministère de l'Industrie, dans le cadre des actions de service public du BRGM.

<sup>2</sup> Les autres modules du projet GEMITIS Nice, réalisés simultanément ou ultérieurement, doivent aborder les domaines suivants :

- évaluation des enjeux et de la vulnérabilité du bâti ;
- chiffrage du coût d'une catastrophe éventuelle liée à un séisme (séisme de référence) ;
- prévention et préparation à la gestion de la crise ;
- information préventive de la population (sensibilisation) ;
- appui à la commune pour l'élaboration d'un plan d'action préventive.

Au sein de ce module " évaluation des aléas naturels ", le volet " sismicité ", consiste en la **description du milieu physique (géologique, géotechnique, hydrogéologique)**. Sa finalité est une **première ébauche du microzonage sismique de la ville de Nice**.

La présente étude concerne donc l'évaluation de l'aléa sismique local transcrite sous la forme d'un microzonage : elle doit permettre, entre autres, de préparer des scénarios du risque sismique sur l'ensemble de la commune de Nice. Compte tenu de l'objectif visé et des financements accordés, seule une étude de niveau A, au sens du guide méthodologique de réalisation des microzonages sismiques, publié par l'AFPS, est réalisée. Les résultats obtenus sont adaptés pour une approche ultérieure globale du risque sismique de la ville. En revanche, ils devront être complétés par des études locales plus détaillées (1/5 000) si les autorités publiques souhaitent transposer les constats techniques en prescriptions opposables aux tiers.

### **1.3. PRESENTATION GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE**

#### **1.3.1. Cadre géographique**

##### **1.3.1.1. Contexte humain et administratif**

Nice, capitale de la Côte d'Azur, cinquième ville de France, compte près de 343 000 habitants sur un territoire de 7 192 ha. Située au centre d'une conurbation d'environ 100 km le long du littoral (regroupant notamment Cannes, Antibes, Monaco et Menton), Nice dispose du deuxième aéroport international français.

Nice apparaît ainsi comme une véritable capitale régionale, bien qu'elle ne soit pas reconnue en tant que telle du point de vue administratif (Nice appartient en effet à la région Provence Alpes Côte d'Azur, dont la capitale est Marseille).

##### **1.3.1.2. Environnement physique**

Le site de Nice est structuré autour de cinq composantes géographiques principales.

- **Les chaînons d'origine alpine orientés Nord-Sud** se répartissent de chaque côté de la vallée du Paillon, c'est-à-dire dans le secteur oriental de la commune. On y distingue du Sud vers le Nord :

- le Mont Boron, le Mont Alban et le Mont Vinaigrier, à l'Est du Paillon ;
- la colline du Château et la colline de Cimiez, à l'Ouest du Paillon.

Ces chaînons présentent des pentes assez raides et une végétation relativement dense.

- **La série de collines entaillées** dans les poudingues sont également orientées Nord-Sud. Elles séparent la plaine de Nice de celle du Var. Cette zone est découpée par de petits vallons abritant des torrents méditerranéens parfois très actifs, tels que le vallon de Magnan et le vallon de la Bornala. Les pentes, moins fortes que celles des chaînons de l'Est, étaient autrefois utilisées pour des cultures en terrasse, les sommets étant plus particulièrement voués à l'horticulture. Aujourd'hui des friches couvrent les terrasses, et l'urbanisation croissante investit rapidement les sommets.
- **La plaine de Nice**, entre ces deux séries de relief, est entièrement recouverte par la ville qui trouve là sa principale localisation.
- **Les vallées du Var et du Paillon**, orientées Nord-Sud, constituent les deux axes de communication majeurs vers les Alpes et la frontière italienne.

La large vallée du Var permet en effet les liaisons vers Grenoble, mais en même temps, elle constituait autrefois une frontière entre la Provence et le Comté de Savoie.

De même, la vallée du Paillon favorise les relations avec l'arrière-pays et au-delà le Piémont, mais a longtemps constitué une coupure entre la vieille ville et les quartiers modernes. La construction de ponts d'abord, puis la couverture du lit du Paillon dès 1880, sont toutefois parvenues à effacer cet effet de coupure, notamment au coeur de la ville.

- **Le littoral de la Baie des Anges** constitue "l'élément unificateur du site" (A. Dauphine, 1990). Transverse à l'orientation générale de la ville, c'est le seul milieu naturel permettant les liaisons Est-Ouest. Il est le support d'un des principaux axes routiers traversant la ville : la Promenade des Anglais.

### **1.3.1.3. Evolution historique du site urbain (issue de M. Bordes, 1976)**

L'ancien comptoir marin phénicien, puis grec, s'est édifié sur le relief calcaire où se situe le château actuel (entre le port et la vieille ville). La ville romaine se développera ensuite plus à l'intérieur des terres, sur la colline de Cimiez.

Ce ne sera qu'à la Renaissance que la ville s'étendra dans la plaine alluviale du Paillon, pour former ce qui constitue aujourd'hui la vieille ville. La construction du port date de 1612.

A partir du XVIII<sup>e</sup> siècle, les territoires situés au-delà de la vallée du Paillon commencent à être investis avec la construction de riches villas.

C'est vers la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, et en particulier avec l'arrivée du chemin de fer (en 1880), que la ville prend un réel essor : construction de palaces sur la colline de Cimiez et le front de mer de la Baie des Anges.

L'explosion urbaine récente de Nice date d'après la deuxième guerre mondiale : le développement urbain investit les collines du Nord de la ville ainsi que la vallée du Var.

### 1.3.2. Cadre géologique et hydrogéologique

#### • Contexte géologique

La commune de Nice (72 km<sup>2</sup>) est presque entièrement construite sur trois types de formations géologiques (fig. 2 et planche hors-texte n° 1).

**Les alluvions anciennes et récentes des vallées du Var (à l'Ouest) et du Paillon et ses affluents ou anciens affluents (à l'Est et au centre), forment le soubassement du centre ville, de la ville ancienne et du littoral de la baie des Anges (promenade des Anglais et sa fameuse plage de galets).**

**Les épaisses formations de poudingues (souvent plus de 200 m d'épaisseur) d'âge pliocène, constituant les collines sur lesquelles se développe le tissu urbain et résidentiel plus récent.**

**Le soubassement rocheux plus ancien, essentiellement calcaire, marno-calcaire et gypseux d'âge triasique à jurassique, formant les reliefs et falaises des corniches en limite à l'Est de la ville.**

D'un point de vue tectonique, la ville de Nice est limitée par le prolongement vers le Sud de l'accident de Saint-Blaise - Aspremont ; cet accident correspond à une ancienne faille inverse d'âge tertiaire, reprise en décrochement dextre au Plio-Quaternaire et, vraisemblablement aussi, actuellement. Au niveau du centre ville, cet accident semble être constitué par deux branches de failles.

#### • Contexte hydrogéologique

Le contexte hydrogéologique de la ville de Nice est dominé par les domaines des nappes alluviales du Paillon et du Var (planche hors-texte n° 2). Soulignons toutefois que les épaisses collines de poudingues ont des caractéristiques hydrodynamiques médiocres.

• **La plaine alluviale du Paillon (centre-ville de Nice), formée d'alluvions caillouteuses et limoneuses avec des intercalations de lentilles ou niveaux sableux, a les caractéristiques hydrodynamiques suivantes (planche hors-texte n° 2) :**

- perméabilité :  $5 \cdot 10^{-4}$  à  $5 \cdot 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s ;
- profondeur moyenne de la nappe : 1 à 2 m dans le cours amont  
2 à 10 m dans le cours aval (St Roch, ...) ;
- fluctuation moyenne de la nappe : 0,5 à 1 m.

L'exploitation des nappes du Paillon n'étant pas intensive, le problème de leur équilibre avec l'eau de mer ne se pose pas ; mais la réglementation du prélèvement de granulats est nécessaire pour le contrôle de l'invasion marine dans les basses nappes alluviales.

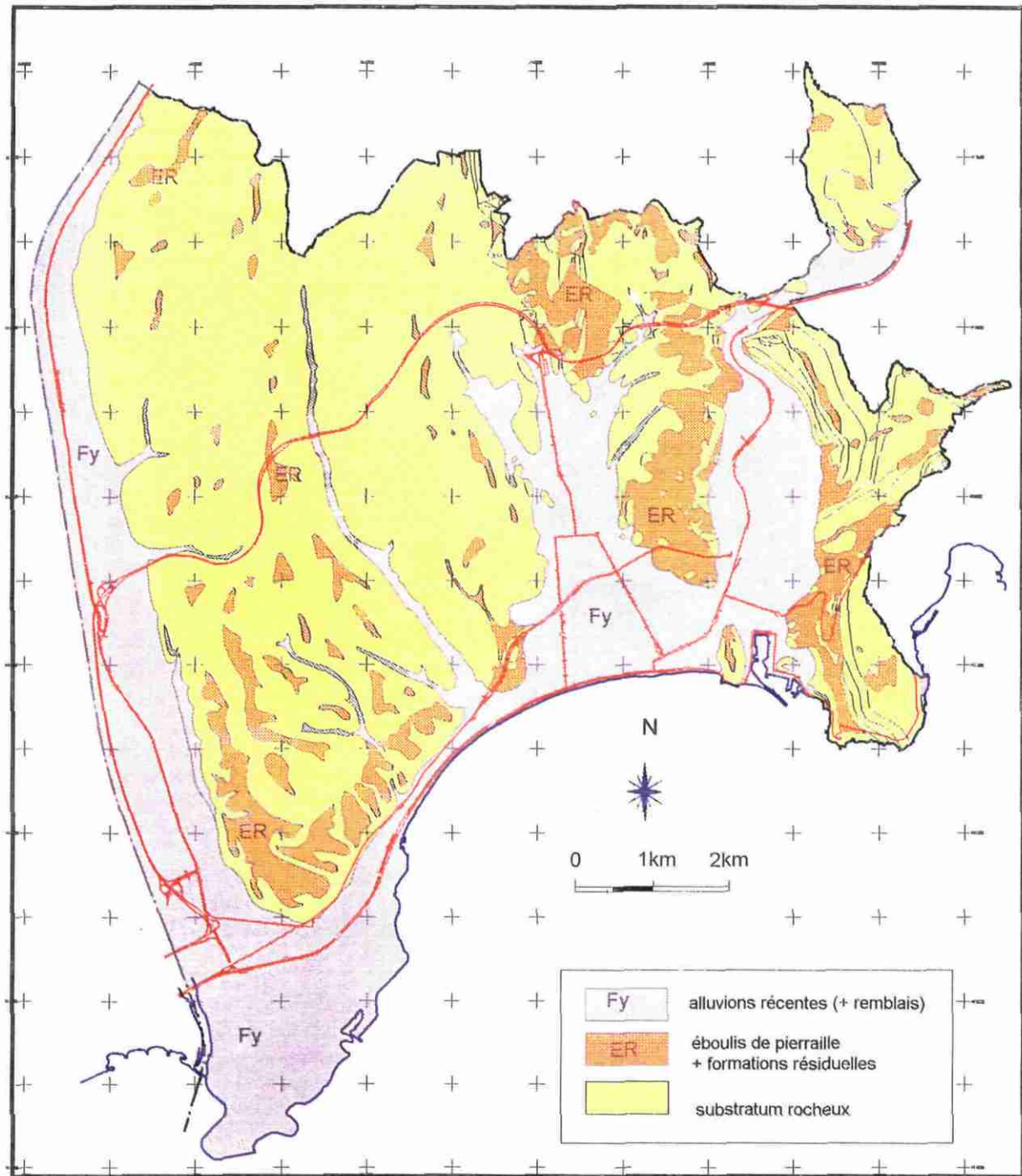


Fig. 2 - Géologie des formations superficielles de la commune de Nice.

• **La plaine alluviale du Var**, formée de plusieurs dizaines de mètres d'alluvions grossières contenant de vastes lentilles sableuses et graveleuses, a les caractéristiques hydrodynamiques suivantes (planche hors-texte n° 2) :

- perméabilité :  $5.10^{-4}$  à  $5.10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s ;
- profondeur moyenne de la nappe : 5 à 10 m ;
- fluctuation moyenne de la nappe : 1 à 2 m.

Les prélèvements de granulats sont interdits dans le lit vif de la partie aval du Var en vue de maintenir le niveau de base des basses nappes alluviales et maintenir ainsi l'équilibre avec l'eau de mer.



## 2. Rappels méthodologiques sur l'évaluation de l'aléa sismique

Evaluer l'aléa sismique consiste à quantifier la possibilité, pour une région ou pour un site particulier, d'être exposé à une secousse sismique de caractéristiques données :

- intensité macrosismique,
- paramètres des mouvements du sol (accélération, vitesse ou déplacement).

Trois étapes doivent être abordées successivement pour évaluer l'aléa sismique (tableau 1) :

- l'identification et la localisation des sources sismiques,
- la caractérisation de l'activité de ces sources sismiques,
- l'évaluation des effets des séismes en un site ou dans une région donnés.

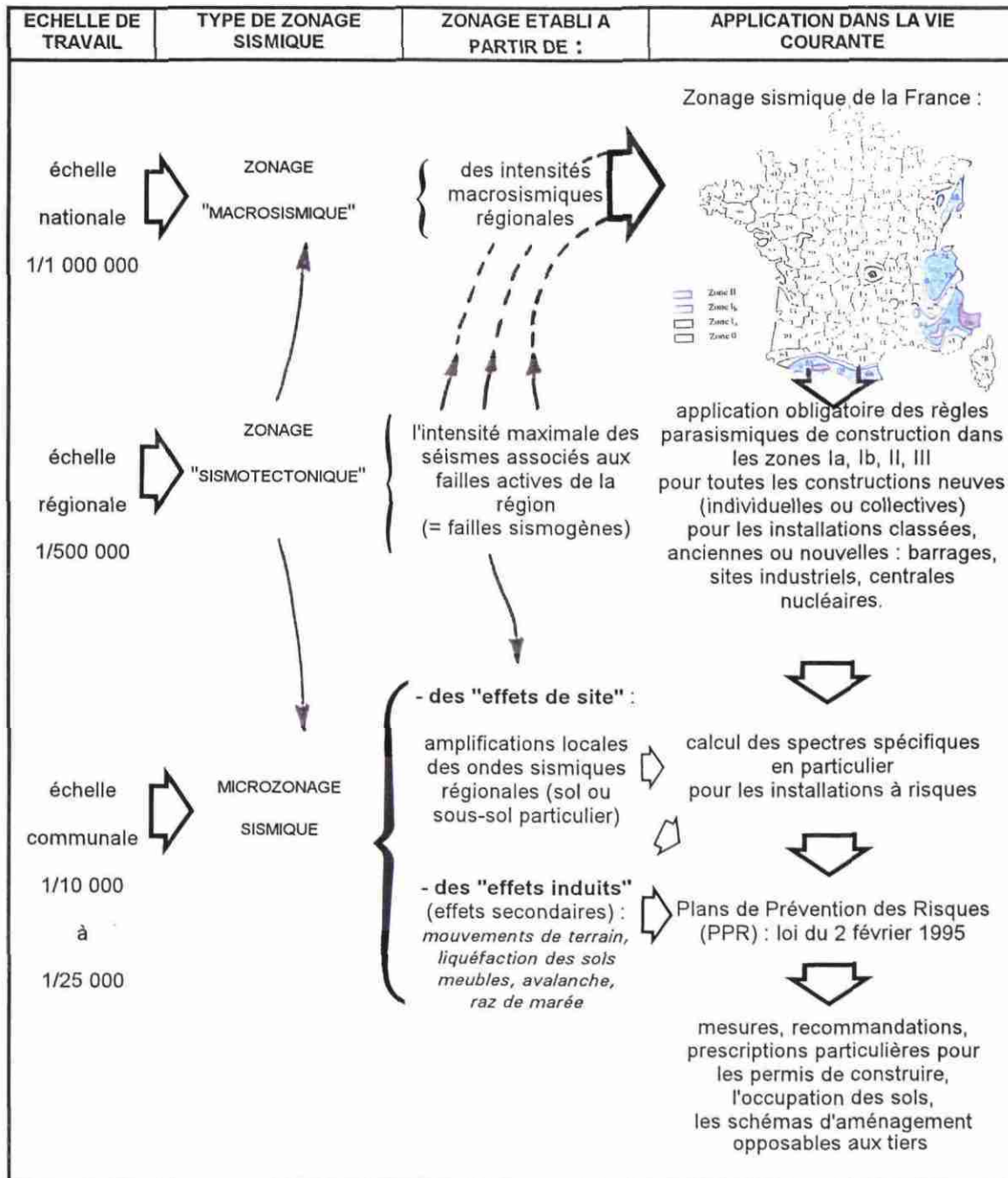
Les deux premiers points relèvent de l'aléa sismique régional alors que le dernier point concerne l'échelle locale.

### 2.1. ECHELLE REGIONALE : 1/500 000 A 1/1 000 000

A cette échelle, le sous-sol est supposé homogène du point de vue géologique.

**On se limite au calcul d'un mouvement sismique de référence** en conditions standard (point de référence et de contrôle, que les sismologues appellent le " rocher horizontal "), associé :

- soit à un séisme considéré comme " maximal " dans la région lorsque l'on procède à une analyse déterministe (à partir de la connaissance historique de la sismicité dans la région, fondée sur des recherches et interprétations d'archives, des études sur le terrain de mouvements anciens de failles, ..., voir tableau 2),
- soit à une probabilité annuelle de dépassement, ou de son inverse : la période de retour, dans le cas d'une approche probabiliste.



Tabl. 1 - Les trois principaux types de zonage sismique : zonage macrosismique, zonage "sismotectonique" et microzonage sismique (d'après Stieltjes, 1995).

Problèmes à résoudre	Méthodologie développée
<p>• <b>Connaissance et caractéristique des failles actives</b> (en tant que sources sismiques) :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- identification et localisation des structures géologiques actives (sources de déclenchement des séismes).</li> <li>- caractéristiques de l'activité sismique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>analyse sismotectonique régionale</b> : <ul style="list-style-type: none"> <li>. sismicité historique,</li> <li>. paléosismicité,</li> <li>. néotectonique.</li> </ul> </li> <li>- <b>analyse déterministe</b> (calcul d'un séisme maximum historiquement vraisemblable, susceptible de se produire sur une faille ou dans une zone sismotectonique, et de ses caractéristiques).</li> <li>- <b>analyse probabiliste</b> (lois de distribution des séismes dans le temps en fonction de la magnitude, période de retour),</li> </ul>
<p>• <b>Caractéristique du signal sismique</b> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- énergie rayonnée par la source,</li> <li>- atténuation avec la distance.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>calcul d'un mouvement sismique de référence</b> : <ul style="list-style-type: none"> <li>. approches empirico-statistiques (lois d'atténuation avec la magnitude et la distance),</li> <li>. approche théorique par modélisation : <ul style="list-style-type: none"> <li>- du rayonnement à la source,</li> <li>- de la propagation des ondes,</li> <li>- de la réponse des sites.</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>

*Tabl. 2 - Méthodes d'évaluation de l'aléa sismique à l'échelle régionale.*

## 2.2. ECHELLE LOCALE : 1/5 000 A 1/25 000

A cette échelle, on considère les trois composantes de l'aléa sismique local, à savoir :

- **la présence de failles actives** pouvant engendrer des rejets en surface ainsi que des mouvements du sol en source proche.
- **les " effets de site "**, c'est-à-dire les modifications du mouvement sismique de référence dues à la lithologie et à la topographie propres au site considéré (fig. 3). Ces modifications des ondes sismiques sont d'une grande importance, en particulier lorsqu'elles sont amplifiées par :
  - la topographie : falaises, fortes pentes, forts reliefs, ...
  - les dépôts géologiques superficiels lorsqu'ils sont peu consolidés : alluvions, sables, argiles, moraines glaciaires, ...
  - la structure locale et les discontinuités du sous-sol, failles anciennes, pendage et nature du terrain, ...
- **les " effets induits "**, c'est-à-dire les effets secondaires sur la stabilité des pentes et le comportement des sols pouvant être déclenchés par un séisme :
  - mouvements de terrain,
  - liquéfaction des sols,
  - tassements,
  - raz de marée.

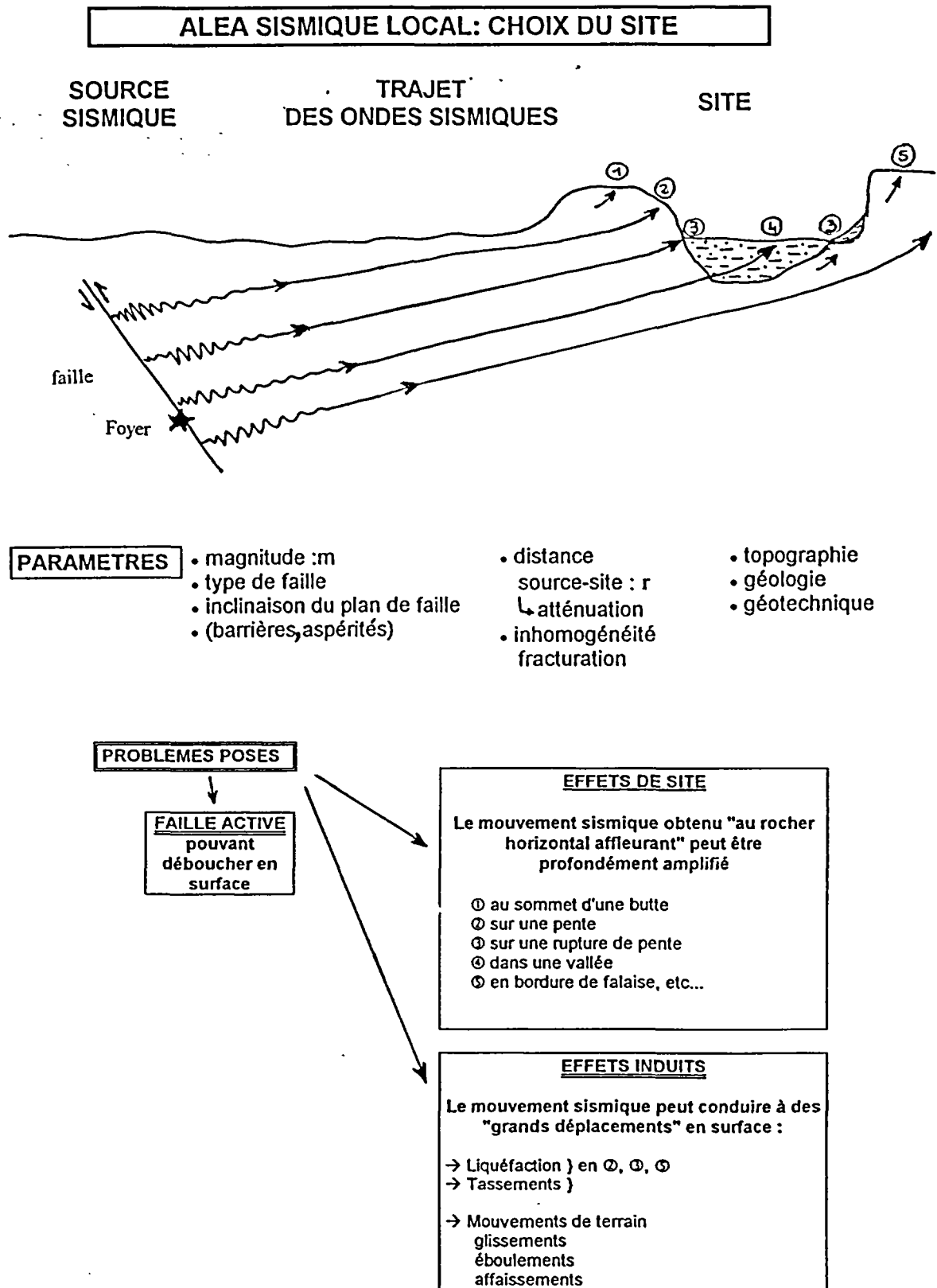


Fig. 3 - Evaluation de l'aléa sismique à l'échelle locale : calcul des effets de site (aléa local) et des effets induits.



### 3. Travaux réalisés lors des phases antérieures

Dans le zonage sismique de la France (voir carte dans le tabl. 1) défini par le décret du 14 mai 1991, la ville de Nice (et tout son arrondissement) est classée en zone de sismicité II.

Ce classement de la commune de Nice en zone II implique, d'après la loi (décret du 14 mai 1991 ; arrêté du 16 juillet 1992), l'obligation d'application des règles de construction parasismiques, en particulier pour tous les bâtiments nouveaux dits "à risque normal" (classes B, C et D).

C'est dans ces zones II que l'on recommande la réalisation d'un microzonage sismique par un organisme spécialisé afin de :

- cartographier et caractériser les zones présentant une réponse sismique homogène,
- moduler l'application des règles de construction parasismique selon les zones,
- établir les prescriptions opposables aux tiers et les intégrer dans les documents d'urbanisme (PPR, POS),
- préciser les cas exceptionnels d'interdiction de construire.

Depuis 1993, plusieurs tranches préliminaires d'étude ont été réalisées dans le cadre du module "sismicité" du programme GEMITIS Nice (collaboration BRGM-CETE Méditerranée, laboratoire de Nice), qui ont concerné en particulier les thèmes suivants.

- **Aléa sismique régional** (Blès *et al.*, 1992)
  - définition du contexte sismotectonique régional (Alpes du Sud, ville de Nice) ;
  - définition des mouvements sismiques de référence : séisme de référence pour Nice, accélération maximale du sol et spectres de réponse élastiques horizontaux.
- **Aléa sismique local**
  - élaboration d'un SIG (système d'information géographique) sur la zone pilote du centre ville (Rosset *et al.*, 1993), comprenant notamment les données de :
    - . topographie,
    - . profondeur de la nappe,
    - . modèle géotechnique tridimensionnel ;

- étude méthodologique sur le secteur pilote (Rosset *et al.*, 1993) :
  - . enregistrement de la sismicité (séismes régionaux et télé-séismes) et du bruit de fond sismique,
  - . modélisation des modifications du signal sismique ;
- microzonage sismique de la zone pilote par exploitation du SIG (Bour *et al.*, 1994) ;
- **Evaluation de la vulnérabilité du milieu construit** sur un quartier de la zone d'étude : le quartier des Musiciens (Bour *et al.*, 1994).
- **Evaluation préliminaire du risque sismique par scénarios de risque** sur le quartier des Musiciens (Bour *et al.*, 1994).

Dans le présent rapport, nous ne rappellerons que les travaux effectués dans un objectif d'évaluation de l'aléa sismique.

### 3.1. EVALUATION DE L'ALEA SISMIQUE REGIONAL

#### 3.1.1. Contexte sismotectonique

##### a) Pour les Alpes du Sud

Cette partie des Alpes du Sud correspond à une des régions les plus sismiques de France métropolitaine. Au cours des cinq derniers siècles, d'importants tremblements de terre d'intensité égale ou supérieure à VII y ont été localisés (fig. 4 et tabl. 3) certains ayant pu occasionner la perte de nombreuses vies humaines et des destructions très importantes (Blès *et al.*, 1992).

Les données microsismiques du fichier de sismicité instrumentale de la France, géré par le Laboratoire de Géophysique du CEA, confirment l'activité sismique relativement importante du massif de l'Argentera - Mercantour, de l'arrière pays niçois, ainsi que de la zone océanique ligurienne.

##### b) Pour la ville de Nice

L'agglomération niçoise se situe à la limite des deux unités sismotectoniques : la zone d'Ubaye - Mercantour et des Alpes externes méridionales, d'une part, et le domaine provençal oriental, d'autre part.

Par ailleurs, l'agglomération de Nice est traversée par un accident sismotectonique important : l'accident de Saint-Blaise - Aspremont, orienté NNE-SSW, à jeu décrochant dextre actuel (fig. 4). Plusieurs épencentres de séismes ont été localisés à proximité du tracé de cet accident et pourraient lui être associés : les séismes de 1494, 1618 et 1644, d'intensités épacentrales VIII (voir tabl. 3).

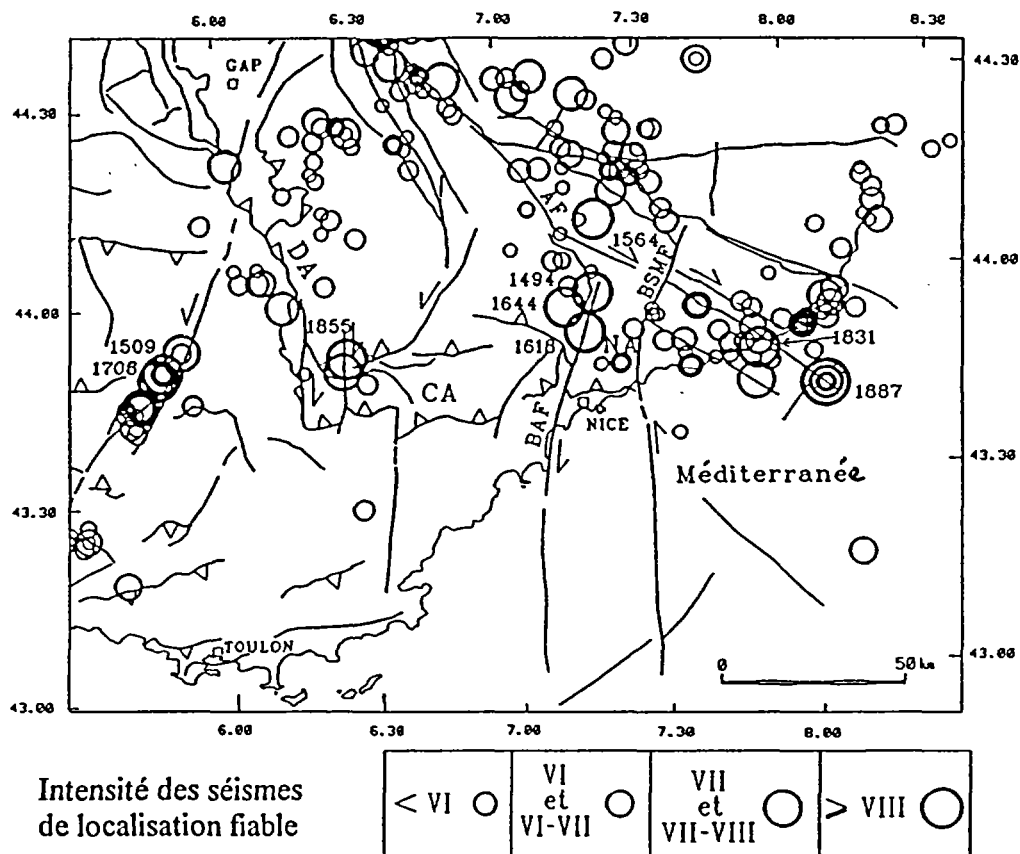


Fig. 4 - Sismicité historique et failles principales du Sud-Est de la France (Blès et al., 1992).

(DA : Arc de Digne ; CA : Arc de Castellane ; Na : Arc de Nice ; BAF : faille de Saint-Blaise - Aspremont ; BSMF : faille de Breil - Sospel - Monaco ; AF : faille d'Argentera).

Les épicentres des séismes de localisation fiable sont extraits du fichier de sismicité historique de la France (SIRENE).

Date	Localisation	Intensité épicentrale (I <sub>0</sub> )
23 février 1887	mer Ligure (au large d'Imperia)	IX
20 juillet 1564	Mercantour	VIII
23 juin 1494		VIII
18 janvier 1618	Arrière-pays niçois	VIII
15 février 1644		VIII

Tabl. 3 - Principaux séismes connus, d'intensité supérieure à VII, s'étant produits dans les Alpes du Sud (d'après le fichier national " SIRENE " de la sismicité historique de la France).

### 3.1.2. Mouvements sismiques de référence

#### a) Le séisme de référence

C'est à partir des résultats de l'étude sismotectonique des Alpes du Sud et de la région de Nice (Blès *et al.*, 1992) que le séisme de référence à prendre en compte pour la ville de Nice a pu être caractérisé (tabl. 4). Ce séisme est associé à la faille de Saint-Blaise - Aspremont.

Date	Localisation de l'épicentre	Intensité épicentrale ( $I_0$ )	Magnitude
15 février 1644	Arrière-pays niçois (à moins de 30 km au Nord de Nice)	VIII	5.6

*Tabl. 4 - Caractéristiques du séisme historique de référence pris en compte pour l'évaluation de l'aléa sismique pour la ville de Nice (Blès *et al.*, 1992).*

#### b) Accélération maximale du sol

Les valeurs d'accélération maximale du sol engendrées par ce séisme de référence et auxquelles on pourrait raisonnablement s'attendre dans le centre de Nice sont déduites de travaux portant sur la simulation de mouvements forts du sol dans ce secteur (Rosset P., 1994).

En faisant l'hypothèse de la répétitivité de ce séisme historique localisé dans des zones réputées sismogènes et actives, il s'est avéré que l'on pouvait obtenir des valeurs de l'ordre de 0,25 g comme accélération horizontale maximale. Par ailleurs, d'autres séismes provenant du bassin ligurien et/ou de la faille de Breil-Sospel-Monaco pourraient également conduire à des accélérations du même ordre. Cette valeur s'accorde par ailleurs à celle préconisée par les règles PS 92 pour les ouvrages de " classe A " dans la région de Nice, classée en zone de sismicité II.

Au-delà de 0,25 g, les pics d'accélération maximale retenus, envisageables pour la ville de Nice, sont 0,15 g et 0,35 g. Ces valeurs ont été délibérément choisies en vue de la réalisation ultérieure de scénarios de risque, pour lesquels on suppose l'occurrence potentielle de trois séismes régionaux, produisant sur le site de référence rocheux des accélérations maximales du sol respectivement de 0.15 g, 0.25 g et 0.35 g.

## 3.2. EVALUATION DE L'ALEA SISMIQUE LOCAL

En 1994 et 1995 (Rapport BRGM R38241, 1994 ; Bard *et al.*, 1995), les méthodes mises en œuvre pour la détermination des différentes composantes de l'aléa sismique local comprenaient d'abord une synthèse géologique (décrite en 1.3) et géotechnique des données disponibles sur un site pilote situé dans le centre de Nice : le quartier des Musiciens. La compilation et l'interprétation de ces données de base ont ensuite servi à la modélisation 1D pour l'étude numérique des effets de site. Par ailleurs, des approches expérimentales d'évaluation des effets de site, comme l'enregistrement de la microsismicité ou du bruit de fond, ont également été appliquées.

### 3.2.1. Modèle géotechnique 3D

Pour la mise en œuvre des méthodes numériques d'évaluation des effets de site et des potentiels de liquéfaction, il a été décidé d'utiliser les seules données lithologiques et géotechniques existantes (méthodes de niveau B du guide de microzonage sismique de l'AFPS, 1995).

Un des objectifs de l'étude de 1995 (rapport BRGM R38241) a été de rassembler et de structurer toutes les données de base disponibles sur la zone à l'échelle de 1/5 000, afin d'aboutir à un modèle géotechnique tridimensionnel répondant aux besoins de l'étude de microzonage, c'est-à-dire permettant la localisation géoréférencée des couches de sol homogènes (d'un point de vue géomécanique).

Le modèle géotechnique 3D du centre de Nice est composé de différents niveaux d'informations :

- les valeurs d'altitude, correspondant à la surface topographique,
- les valeurs de profondeur et d'épaisseur des terrains, pour chaque horizon géotechnique,
- les valeurs de piézométrie, c'est-à-dire de la profondeur de la nappe d'eau.

### 3.2.2. Evaluation de l'aléa " effets de site "

Les méthodes d'évaluation des effets de site visent à obtenir la réponse des sols à une sollicitation sismique. Deux paramètres sont principalement recherchés au cours d'un microzonage : la fréquence de résonance d'un site et le niveau d'amplification du signal par rapport au rocher.

Les études expérimentales, mises en œuvre par le CETE-Méditerranée, conduisent à la définition des fonctions de transfert locales du site par rapport à une référence (site rocheux horizontal).

Par ailleurs, le BRGM a appliqué un modèle monodimensionnel de réponse sismique des sols, utilisant en particulier les propriétés non-linéaires reconnues dans les différentes couches géotechniques constituant le site.

Il a ensuite été possible d'identifier et de cartographier les zones présentant une réponse sismique homogène et de réaliser ainsi un microzonage préliminaire de l'aléa sismique sur la zone d'étude.

#### **a) Méthode expérimentale**

Le principe de cette approche consiste à enregistrer la sismicité en différents points d'une ville, puis à comparer les enregistrements dans le domaine spectral avec ceux d'une station posée au rocher. La moyenne des rapports spectraux obtenus pour de nombreux événements sismiques (régionaux et télé-séismes) a permis de caractériser la fonction de transfert des trois sites considérés.

D'autre part, les enregistrements de bruit de fond sismique ont également été utilisés pour déterminer la réponse approximative des sites aux séismes. La fonction de transfert est obtenue, à partir d'un enregistrement de bruit de fond, en divisant le spectre d'une voie horizontale par celui de la voie verticale.

Les sites étudiés étaient au nombre de trois sur la zone d'étude pilote dans le centre-ville (quartier des Musiciens). Leur emplacement est lié à la géométrie du remplissage sédimentaire qui forme une "ria": du Nord au Sud, la hauteur de sédiments augmente et on rencontre successivement les sites RAY, LIB puis ALS (fig. ?). La station de référence était posée sur le Mont Boron, colline de calcaire jurassique à l'Est de la zone d'étude.

Conformément aux résultats attendus, l'étude expérimentale a montré une diminution de la fréquence propre des sites alluviaux au fur et à mesure que l'épaisseur des alluvions croît.

#### **b) Méthode numérique**

En première approximation, nous avons utilisé une méthode simplifiée 1D (SHAKE) qui repose sur l'utilisation de quelques paramètres mécaniques et morphologiques caractérisant le site et qui détermine la réponse des sols soumis à des sollicitations sismiques à partir d'un comportement linéaire équivalent.

A partir du modèle géotechnique tridimensionnel du sous-sol, la zone d'étude a été discrétisée en un nombre fini de mailles. L'espacement entre deux points consécutifs est de 250 m N-S et de 200 m E-W. Les profils sélectionnés sont essentiellement orientés Est-Ouest de manière à être perpendiculaires à l'axe du bassin ; ils sont recoupés par un profil grossièrement Nord-Sud. La réponse sismique du sol a été systématiquement calculée en chacun des 82 sites considérés et pour les 3 accélérogrammes au rocher.

L'ensemble des calculs numériques a permis de quantifier l'influence de l'épaisseur des couches superficielles de faibles caractéristiques mécaniques, sur l'amplification du mouvement sismique en surface. Les accélérations du sol sont généralement amplifiées en surface (facteur allant de 0.8 à 2.7) par rapport au niveau des spectres de réponse élastiques au rocher affleurant. Les fréquences propres des couches sédimentaires varient de plus de 4-5 Hz au Nord de la zone à environ 1 Hz au Sud.

### 3.2.3. Proposition de zonages préliminaires

A un stade préliminaire de l'étude, les résultats expérimentaux existant seulement en trois points du secteur d'étude, une véritable comparaison entre les méthodes numériques et instrumentales n'a pas été possible. Par contre, à partir de l'application des méthodologies PS 92 et numérique, deux microzonages sismiques de la zone pilote de Nice ont été réalisés.

D'une part, la méthode d'évaluation et de cartographie de l'aléa, préconisée par les règles PS 92, permet de définir pour chaque maille du modèle géotechnique discrétisé (c'est-à-dire tous les 5 m), à quel type de site  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  ou  $S_3$  elle appartient. La cartographie des valeurs de sites  $S_0$  à  $S_3$  définit un premier microzonage, conforme aux critères PS 92 d'identification des sols.

D'autre part, basé sur les modélisations 1D de la réponse sismique des sols, un deuxième microzonage a été réalisé. Les fonctions de transfert et les spectres de réponse calculés par SHAKE ont été comparés, puis regroupés en un nombre restreint de spectres ayant les mêmes caractéristiques fréquentielles. Cette comparaison a conduit à identifier sur l'ensemble du secteur d'étude, cinq zones présentant une réponse sismique homogène, et ceci indépendamment du niveau de la sollicitation sismique imposée aux sols.

Malgré une maille beaucoup plus lâche (200 m), la cartographie basée sur la modélisation 1D est plus détaillée, puisque contrairement au zonage PS 92, des sites susceptibles d'amplifier le mouvement du sol à hautes fréquences (supérieures à 3 Hz) appartiennent à des zones distinctes.

### 3.2.4. Evaluation de l'aléa " liquéfaction "

Compte tenu des données disponibles, c'est la méthode proposée dans le code chinois qui a été retenue pour l'évaluation des phénomènes de liquéfaction et de tassements (Taiping *et al.*, 1984), sous le terme d'influence de la teneur en fines des sols, qui n'est pas toujours disponible.

L'analyse de différents profils a conduit à un premier essai de synthèse cartographique. Le zonage obtenu doit être compris comme ayant une valeur indicative, compte tenu des informations disponibles.

Pour améliorer ce zonage, il est nécessaire de disposer d'un plus grand nombre de points de mesure (pénétomètre SPT ou CPT), d'essais d'identification, voire d'essais en laboratoire pour caler les précédents:



## 4. Failles actives

### 4.1. DEFINITION

Une faille active est une grande fracture de l'écorce terrestre, le long de laquelle des déplacements tectoniques se sont produits récemment et / ou à laquelle il est possible d'associer avec certitude une sismicité instrumentale ou historique (Regine Group, 1991).

Dans la pratique, plusieurs types de failles actives peuvent être rencontrés :

- des failles sismogènes (et donc obligatoirement actives), mais sans traces de mouvements récents en surface ;
- des failles actives au sens néotectonique du terme : elles présentent des traces de déformation récente, mais aucune sismicité connue ne peut leur être associée ;
- des failles actives sismogènes présentant à la fois des mouvements récents et une sismicité associée.

En France, on considère qu'une faille est active si elle a subi des mouvements néotectoniques significatifs (c'est-à-dire au cours de la période allant de la fin du Pliocène au Quaternaire).

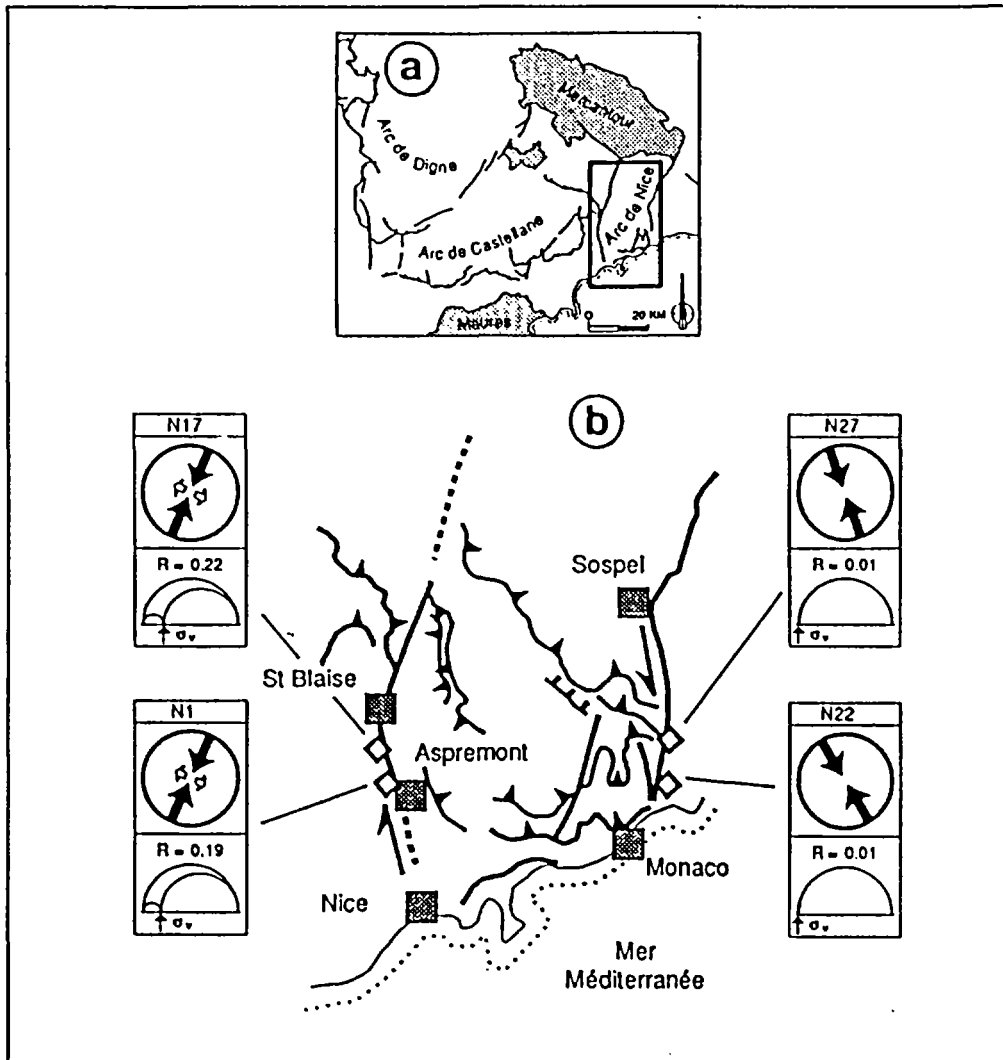
### 4.2. RECONNAISSANCE DES FAILLES ACTIVES, IDENTIFICATION DES FAILLES SISMOGENES POUR LA VILLE DE NICE

La reconnaissance des failles susceptibles d'engendrer des séismes majeurs repose sur divers critères liés à la sismicité et aux déformations géologiques récentes observées.

L'identification des failles sismogènes (c'est-à-dire présentant une activité sismique) n'est certifiée que lorsque l'on dispose de localisations des foyers à l'aide d'un réseau d'enregistrement, suffisamment précises pour pouvoir être mises en relation indubitablement avec des structures géologiques connues. Ce n'est actuellement pas le cas sur la région de Nice. On ne peut donc s'appuyer que sur les preuves géologiques du jeu récent en surface de ces failles.

Le tracé précis de ces accidents peut souvent être masqué par certaines formations géologiques superficielles non affectées, ce qui est le cas sur la région de Nice (terrasses alluviales, ...). Ainsi, la faille de Saint-Blaise - Aspremont n'est pas nettement individualisée à l'affleurement sur la ville de Nice (fig. 5).

Aucune faille active sismogène n'est clairement identifiée sur la région de Nice à ce jour : aucun épicerne de séisme n'a pu être formellement corrélé à une faille passant par l'agglomération de Nice.



*Fig. 5 - Carte du régime des contraintes pour les failles de Saint-Blaise - Aspremont et Sospel - Monaco à partir de l'analyse des microfailles (d'après Ritz, 1991).*

## 5. Effets de site

Les méthodes d'évaluation des effets de site visent à obtenir la réponse des sols à une sollicitation sismique. Deux paramètres sont principalement recherchés au cours d'un microzonage : la fréquence de résonance d'un site et le niveau d'amplification du signal par rapport au rocher.

En effet, le calcul de l'amplification du signal sismique par la topographie et la nature du sous-sol, sur toute la gamme de fréquence intéressant le génie parasismique, constitue le problème fondamental de la détermination quantitative des effets de site dans les études de microzonage, pour laquelle subsistent des interrogations concernant l'influence respective des effets géométriques (topographie de surface et géométrie du sous-sol) et de celle liée à l'évolution du comportement des sols sous sollicitations dynamiques.

### 5.1. EFFETS DE SITE TOPOGRAPHIQUES

#### 5.1.1. Compréhension des phénomènes physiques

On a constaté que, tous facteurs étant apparemment égaux par ailleurs, certaines configurations topographiques pouvaient entraîner des amplifications notables du signal sismique, entraînant par la même une augmentation locale de l'intensité du tremblement de terre. Il s'agit de zone de ruptures de pente, de crêtes, de bordures de plateau, de sommets.

Les ondes de volume et de surface sont diffractées par les reliefs ; elles se propagent vers l'extérieur de la topographie, et interfèrent avec les ondes directes, ainsi que le montrent les modélisations théoriques et numériques (Pedersen *et al.*, 1994).

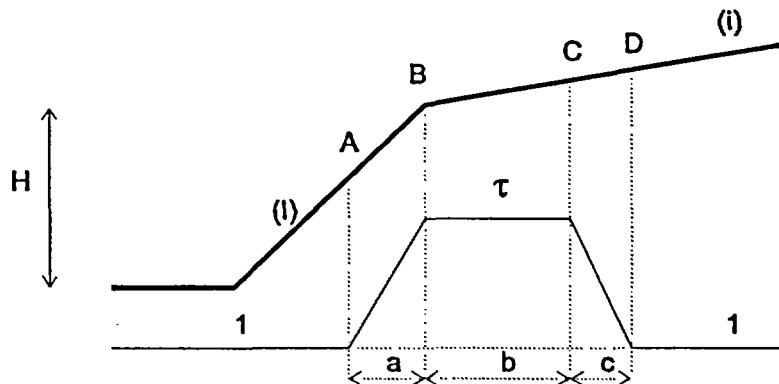
#### 5.1.2. Quantification des effets de site topographiques

Pour cette raison, les règles parasismiques PS 92 tiennent compte de ces effets par l'application d'un coefficient multiplicateur d'amplification  $\tau$  (Tau) variant entre 1 (pas d'augmentation des accélérations des spectres de dimensionnement) et 1,4 (majoration de 40% des accélérations). Il est obtenu à l'aide de formules empiriques.

Toutefois, les résultats de campagnes sismologiques conduites en parallèle avec des études de microzonage, ont été parfois en contradiction avec les résultats théoriquement attendus. La modélisation du phénomène reste donc encore largement du domaine de la recherche. Le coefficient  $\tau$  des règles représente donc plus un coefficient de majoration dissuasif qu'une valeur traduisant la réalité physique du phénomène.

Les règles de calcul des PS 92 méritent d'être rappelées.

Le principe du calcul du coefficient  $\tau$  est le suivant :



La détermination de H laisse une certaine part à l'appréciation. A titre indicatif, on peut considérer comme base du relief le point en dessous duquel la pente générale du site devient inférieure à 0,4.

Si l'on considère une arête B délimitant un versant aval de pente I (tangente de l'angle de pente) et un versant amont de pente i, et si :

- $H \geq 10$  m (H étant la hauteur de l'arête au-dessus de la base du relief,
- $i \leq I/3$ .

Le coefficient  $\tau$  prend la valeur :

$$\begin{aligned} \tau &= 1 && \text{pour } I-i \leq 0,40 \\ \tau &= 1+0,8(I-i-0,4) && \text{pour } 0,40 \leq I-i \leq 0,90 \\ \tau &= 1,40 && \text{pour } I-i \geq 0,90 \end{aligned}$$

I et i sont pris en valeur algébrique.

Sur le tronçon BC du versant amont défini par la longueur b de sa projection horizontale (exprimée en mètres) :

$$b = \text{minimum de } 20 I \text{ ou de } (H+4)/10$$

- fait l'objet d'un raccordement linéaire entre les valeurs 1 et le long des tronçons AB et CB de longueur :
  - $a=AB=H/3$
  - $c=CD=H/4$
- prend la valeur 1 à l'aval du point A et à l'amont du point D.

Le choix des profils apparaît donc comme étant déterminant.

### 5.1.3. Zonage des effets de site topographiques sensibles sur la ville de Nice

Le principe du calcul du coefficient d'amplification topographique ( $\tau$ ) a été exposé précédemment. Celui-ci peut alors être connu de façon continue suivant un profil.

Dans le cadre de la carte proposée, la représentation du coefficient  $\tau$  est binaire. On distingue les zones sans amplification ( $\tau=1$ ) de celles où une modification du signal est possible ( $\tau>1$ ).

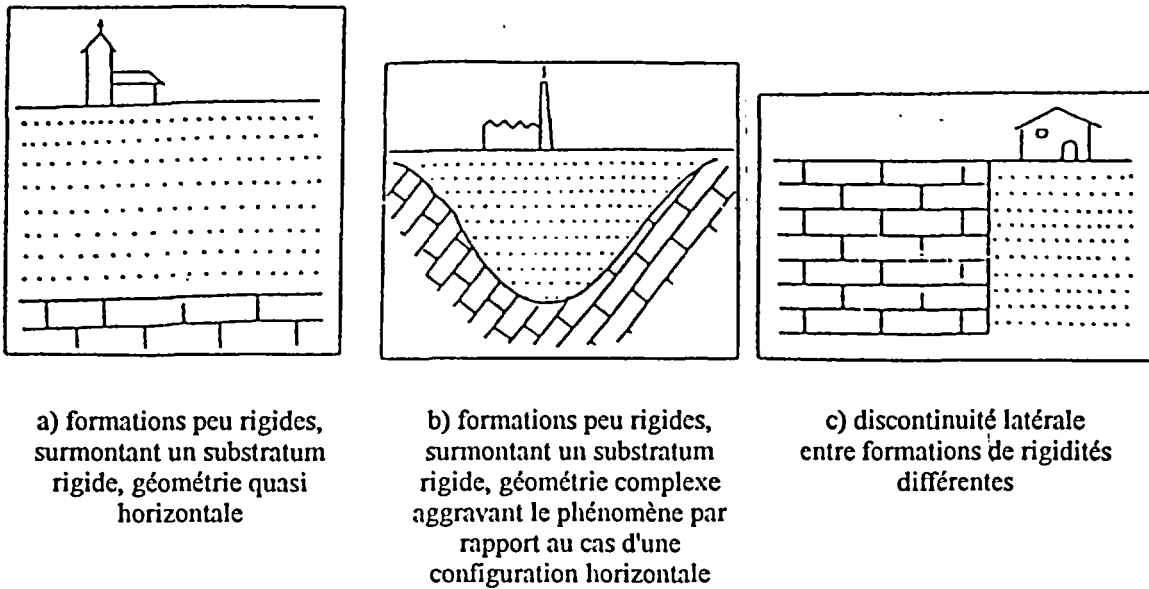
A l'échelle d'une commune, les profils ne peuvent être multipliés indéfiniment. Il est donc nécessaire d'adapter ces règles à la représentation plane de la carte. Si l'on conserve les notations déjà utilisées, la zone au sein de laquelle existe un effet topographique est délimité par une longueur  $a$  en aval de la " crête " et une longueur  $b+c$  côté amont.

$$a = \frac{H}{3}$$
$$b + c \approx 2 \cdot \frac{H}{4} = \frac{H}{2}$$

## 5.2. EFFETS DE SITE LIES A LA LITHOLOGIE

L'amplification des ondes sismiques dues à des formations géologiques peu consolidées (alluvions, cônes de déjection, loess, moraines, bassins et couches sédimentaires) reposant sur une formation plus rigide est certainement l'effet de site le mieux connu à l'heure actuelle (fig. 6). Cet effet revêt une importance particulière pour le génie parasismique puisqu'un grand nombre de villes sont localisées le long de vallées alluviales ou dans des bassins sédimentaires, sur des dépôts superficiels jeunes et très peu rigides. C'est en particulier le cas de la ville de Nice.

Un grand nombre d'observations macrosismiques faites depuis le début de ce siècle montrent clairement que ces effets de site peuvent augmenter les effets destructeurs, d'un facteur pouvant aller jusqu'à 2 ou 3 degrés sur l'échelle d'intensité MKS. Ces observations ont été complétées, plus récemment, par de nombreuses études instrumentales qui ont permis de quantifier plus précisément ces amplifications.



*Fig. 6 - Exemples de configurations lithologiques types provoquant une amplification des ondes sismiques (= effet de site lithologique).*

### 5.2.1. Compréhension des phénomènes physiques

- **Piégeage des ondes sismiques dans les sédiments**

Le phénomène physique responsable de l'amplification du mouvement sur les formations géologiques peu consolidées est le piégeage des ondes sismiques, dû au contraste d'impédance existant entre ces formations et un substratum plus rigide. Quand la formation est constituée de couches horizontales (on est alors en présence d'une structure à une dimension, " 1D "), ce piégeage n'affecte que les ondes de volume. Quand la structure est à 2 ou 3 dimensions (2D ou 3D), c'est-à-dire lorsque des hétérogénéités latérales sont présentes, (variations d'épaisseurs des sédiments dans le cas de vallées alluviales par exemple), le piégeage affecte également les ondes de surface qui se développent sur ces hétérogénéités.

- **Phénomène de résonance**

Les interférences qui ont lieu entre ces ondes piégées, puis réfléchies, dans les couches superficielles, donnent naissance à un phénomène de résonance dont les caractéristiques sont liées à la géométrie et aux propriétés mécaniques de la structure. Le cas de la résonance 1D est très simple (résonance verticale des ondes de volume), alors que les cas 2D et a fortiori 3D sont plus complexes.

### • Conséquences dans le domaine fréquentiel

Le phénomène de résonance conduit à une prolongation importante de la vibration et à une forte amplification du mouvement sismique à certaines fréquences.

Dans le domaine fréquentiel, la résonance est caractérisée par des pics spectraux. La position des fréquences correspondant à ces pics dépend à la fois de l'épaisseur  $H$  et de la vitesse des ondes  $S V_{S1}$  de la couche superficielle, et de la largeur pour les structures 2D et 3D. Dans le cas 1D d'une couche horizontale reposant sur un substratum rigide, la fréquence propre peut être déterminée en première approximation par :

$$\begin{aligned} f_0 &= V_{S1}/4H \quad \text{pour le mode fondamental} \\ f_n &= (2n + 1)f_0 \quad \text{pour les modes harmoniques.} \end{aligned}$$

La valeur de  $f_0$  peut varier de 0,2 à 1 Hz (pour des dépôts de sédiments très épais, ou pour des matériaux extrêmement peu consolidés, comme des argiles) à 10 Hz (pour des couches très minces comme les dépôts diluviaux ou les roches altérées).

### 5.2.2. Quantification des effets de site lithologiques

L'approche des effets de sites liés à la lithologie sur l'ensemble de la commune de Nice a comporté plusieurs volets :

- **classification des sols et des sites**, d'après les interprétations des sondages et essais géotechniques (extraits de la Banque des données du sous-sol -BSS-);
- **vérification de terrain** de la nature, des variations des différents horizons lithologiques et des sols ;
- **interprétation de l'épaisseur des alluvions** d'après la paléomorphologie et les sondages.

La méthodologie de classification des sites utilisée est celle préconisée par les règles PS 92, qui définit les spectres élastiques normalisés des sols en fonction de sites types :

En vue de la définition des sites-types, les sols sont classés en quatre groupes, en fonction de leurs propriétés mécaniques, comme indiqué ci-après et dans le tableau 5 :

• **Classification des sols**

- rocher sain ;
- groupe a : sols de résistance bonne à très bonne (par exemple : sables et graviers compacts, marnes ou argiles raides fortement consolidées) ;
- groupe b : sols de résistance moyenne (par exemple : roches altérées, sables et graviers moyennement compacts, marnes ou argiles de raideur moyenne) ;
- groupe c : sols de faible résistance (par exemple : sables ou graviers lâches, argiles molles, craies altérées, vases).

La connaissance d'un ou plusieurs paramètres figurant dans le tableau 5 ci-dessous permet d'asseoir le classement sur une base objective.

TYPE DE SOL		Pénétromètre Statique : résistance (Mpa)	SPT Nombre de coups	Pressiomètre		Résistance Compression simple (MPa)	Densité relative (%)	Indice de compression Cc	Vitesse des ondes de cisaillement (m/s)	Vitesse des ondes longitudinales		
				Module E (MPa)	Pression limite Pl (MPa)					Sous la nappe (m/s)	Hors nappe (m/s)	
a	ROCHERS Rochers sains et craies dures			> 100	> 5	> 10			> 800		> 2500	
	Sols de bonne à très bonnes résistance mécanique	Sols granulaires compacts	> 15	> 30	> 20	> 2		> 60		> 400	> 1800	> 800
		Sols cohérents (argiles 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 moyennement 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				
		Sols cohérents mous (argiles molles ou vases) et craies altérées	< 1,5	< 2	< 5	< 0,5	< 0,1		> 0,10	< 150	< 1500	< 500

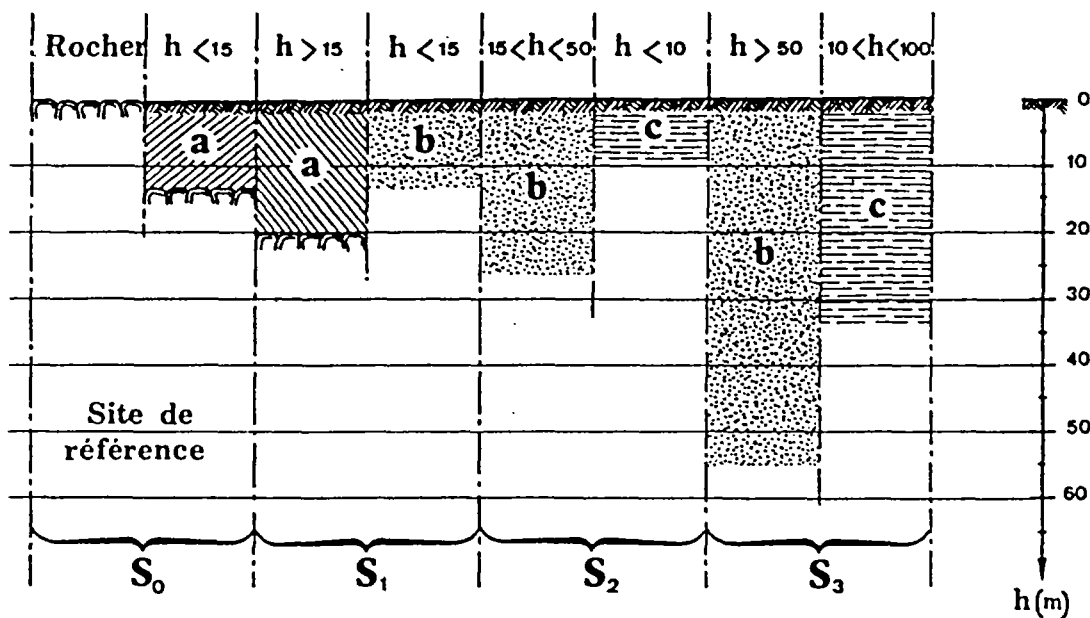
Tabl. 5 - Paramètres d'identification des sols (règles PS 92).

• **Classification des sites**

En fonction des caractéristiques géotechniques des sols (définies dans le tabl. 5) et de l'épaisseur des différentes classes de sol (tabl. 6), on définit 4 types de sites correspondant aux caractéristiques suivantes :

- Sites  $S_0$  sites rocheux (site de référence)  
sols du groupe a en épaisseur inférieure à 15 m.
- Sites  $S_1$  sols du groupe a en épaisseur supérieure à 15 m  
sols du groupe b en épaisseur inférieure à 15 m.
- Sites  $S_2$  sols du groupe b en épaisseur comprise entre 15 et 50 m  
sols du groupe c en épaisseur inférieure à 10 m.
- Sites  $S_3$  sols du groupe b en épaisseur supérieure à 50 m  
sols du groupe c en épaisseur comprise entre 10 et 100 m.

Dans le cas de sites comportant des sols du groupe c en épaisseur supérieure à 100 m, il convient de procéder à une étude particulière en vue de la détermination d'un spectre spécifique.



**Tabl. 6 - Classification des sols en 4 types de sites lithologiques, d'après la combinaison de leurs caractéristiques géotechniques et de leur épaisseur (règles parasismiques PS 92).**

Ces descriptions supposent que les sols en cause sont disposés en formations à peu près régulières. Dans le cas de formations irrégulières ou lenticulaires, ou en cas d'ambiguïté, il convient de procéder à l'assimilation qui, compte tenu de la forme des spectres et des périodes propres de la structure, conduit au degré de conservatisme immédiatement supérieur.

### 5.2.3. Zonage des effets de site lithologiques

- **Contexte géotechnique**

De cette façon, nous avons analysé plus de 100 dossiers de sondages, puis classé cette centaine de sites (planche hors-texte n° 2).

Un contrôle de terrain a permis de pondérer ces données brutes par des observations in situ, en particulier dans l'épaisse masse de poudingue où les faciès varient latéralement d'une part, et d'autre part de la base de la série (où les sédiments sont fortement compactés et présentent généralement un comportement de type "rocher") vers le sommet (où les sédiments sont moins compacts, parfois friables) [planche hors-texte n° 3].

- **Interprétation de l'épaisseur des alluvions**

L'épaisseur des alluvions sous le centre-ville de Nice en particulier, joue un rôle déterminant sur la réponse du sol aux sollicitations sismiques pour l'amplification des ondes (tabl. 6).

Dans la mesure où nombre de sondages n'atteignent pas la base du remplissage des vallées alluviales, nous avons tenté une interprétation de l'épaisseur des alluvions sous la ville de Nice (planche hors-texte n° 4), d'après :

- la paléotopographie : poursuite possible des reliefs sous les alluvions ;
- la tectonique ;
- les sondages BSS.

Les résultats de cette interprétation sont présentés dans la carte de la planche hors-texte n° 4.

La méthodologie d'interprétation a été la suivante :

- nous avons prolongé les lignes de crêtes morphologiques existantes en considérant qu'elles plongent sous les alluvions ;
- nous avons tenu compte des pentes des deux versants de chaque crête (généralement, un versant est plus abrupt que l'autre) pour évaluer la profondeur du substratum rocheux sous le recouvrement alluvial ou colluvial ;
- nous avons calé ces interprétations de profondeur du substratum (et donc d'épaisseur d'alluvions) à partir des coupes de sondages disponibles ;
- nous avons ainsi réalisé une carte distinguant l'évaluation de trois tranches d'épaisseur de sédiments :
  - \* de 0 à 15m,
  - \* de 15 à 25 m,
  - \* de 25 à 35 m,
  - \* plus de 35 m.

La corrélation de cette interprétation morpho-structurale avec les sondages disponibles est tout à fait cohérente. Si l'on admet cette démarche, on peut directement établir un zonage des sites  $S_0$  (0 à 15 m d'alluvions),  $S_1$  (15 à 25 m d'alluvions),  $S_2$  (de 25 à 35 m d'alluvions),  $S_3$  (plus de 35 m d'alluvions).



## 6. Phénomènes induits

### 6.1. MOUVEMENTS DE TERRAIN

L'occurrence d'un séisme est un facteur déclenchant de mouvement de terrain. L'équilibre connu en phase statique est minoré (on peut admettre de 30%) sous sollicitation dynamique par la prise en compte d'une action gravitaire accidentelle.

Mandaté par les services techniques de la ville de Nice, le BRGM a réalisé en 1991, une cartographie communale à l'échelle du 1/5 000 de l'aptitude des sols à la construction vis-à-vis des mouvements de terrain (rapport BRGM R34133) (glissements, éboulements et effondrements). Considérant que cette cartographie récente ne pouvait être améliorée à ce jour sans la mise en oeuvre d'efforts substantiels, nous réutilisons donc ce zonage de l'aléa mouvement de terrain en statique (planche hors-texte n° 8).

Son exploitation sous sollicitation dynamique pour cartographier les effets induits revient à minorer le facteur de sécurité vis-à-vis de la stabilité ou augmenter l'occurrence temporelle de tels événements. Par intensité décroissante de l'aléa, quatre niveaux sont distingués dans la carte d'aptitude des sols vis-à-vis des mouvements de terrain, tenant compte d'une sollicitation sismique :

Zonage	Qualité du sol	Qualification de l'aléa
zone 1	bonne à très bonne	nul à faible
zone 2	moyenne	faible
zone 3	faible	moyen
zone 4	nulle à faible	fort

*Tabl. 7 - Qualification des niveaux d'intensité de l'aléa " mouvement de terrain sous sollicitation sismique ", utilisée dans la cartographie du zonage de cet aléa.*

## 6.2. LIQUEFACTION DES SOLS SOUS SOLlicitATIONS SISMQUES

### 6.2.1. Définition

Physiquement, on appelle liquéfaction le processus de transformation d'une substance solide en un liquide.

Pour un sol pulvérulent saturé, la transformation de l'état solide à l'état liquide se fait par augmentation de la pression interstitielle. Cette augmentation peut résulter soit d'un chargement quasi statique monotone, soit d'un chargement cyclique, comme par exemple lors d'un tremblement de terre. Elle a pour conséquence une diminution des contraintes effectives régnant dans le sol et donc une diminution de sa résistance au cisaillement qui, à l'état ultime, peut devenir nulle.

Pour qu'il y ait liquéfaction sous l'action d'un séisme, la conjonction de facteurs permanents et aggravants doit être vérifiée ; il faut donc :

- qu'il y ait **susceptibilité** du sol à la liquéfaction, c'est-à-dire qu'il soit plutôt pulvérulent, dans un état peu compact, peu contraint et situé sous la nappe (exemple des sables ou des limons lâches saturés).

Des critères d'identification de sols susceptibles de liquéfier, utilisables uniquement pour les sols courants, sont proposés dans les " Règles parasismiques PS 92 " (1992).

- qu'il y ait **occasion** de se liquéfier, c'est-à-dire que l'énergie des ondes émises pendant un séisme soit suffisante, cette énergie étant par exemple traduite sous forme d'une accélération maximale en surface et d'un nombre de cycles équivalents, ces 2 paramètres dépendant de la magnitude du séisme et de la distance du site au foyer.

Deux grands types de méthodes peuvent alors être proposés pour étudier les potentialités de liquéfaction d'un sol donné :

- **méthodes basées sur des essais in situ ;**
- **méthodes basées sur des essais de laboratoire.**

### 6.2.2. Description du phénomène

Le phénomène de liquéfaction ne concerne généralement que certaines formations géologiques : sables, sables vaseux ou limons, ..., peu compacts, pulvérulents, et saturés d'eau. Dans ce cas, le sol devient une sorte de boue liquide et perd alors sa portance ; les effets principaux de la liquéfaction peuvent se manifester :

- **par des glissements sur des pentes très faibles,**
- **des tassements généralisés au sol (du fait de l'absence de portance),**
- **des pertes de portance des fondations des bâtiments.**

### 6.2.3. Contexte niçois

Vu l'extension de la ville et les hétérogénéités de faciès rencontrés, la cartographie des zones liquéfiables ne peut être réalisée à partir des connaissances *in situ* et en laboratoire disponibles. L'identification des formations qualitativement susceptibles de se liquéfier selon les critères PS 92 faisant défaut, les efforts entrepris conduisent à une cartographie des potentialités de liquéfaction selon la méthode proposée par Seed (1984).

Celle-ci met en jeu deux termes : susceptibilité mécanique, à partir de l'essai SPT, et " opportunité " induite par le séisme de référence.

Le zonage sismique de niveau A (sites  $S_0$  à  $S_3$ ) repose sur l'identification de colonnes de sol (a, b, c), de qualité géotechnique plus ou moins bonne, auxquelles sont associés des intervalles de valeur mécanique (SPT notamment). On se propose donc d'utiliser ce zonage de ces caractéristiques moyennes pour évaluer de façon paramétrique les potentialités de liquéfaction.

### 6.2.4. Mise en oeuvre de la méthode

La cartographie des nappes alluviales (planche hors-texte n° 2) permet de distinguer trois principaux systèmes aquifères :

- la nappe alluviale de la vallée du Var,
- une nappe complexe sise sous le centre de Nice,
- la nappe alluviale de la vallée du Paillon.

De ces trois ensembles on retient deux configurations de nappe :

	Profondeur moyenne de nappe	Profondeur de la nappe haute
Nappes du Var et du centre ville	5 m	3 m
Nappe du Paillon	2 m	0 m

Par ailleurs, les reliefs niçois peuvent contenir des nappes localisées complexes et difficilement individualisables.

Pour chaque profil géotechnique sont donc traitées les deux configurations hydrogéologiques avec les deux hypothèses de niveau de nappe.

Les paramètres sismiques pris en compte sont les suivants :

- zone de sismicité : II
- magnitude :  $M_s = 6,0$
- accélération nominale :  $A_n = 2,5 \text{ m/s}^2$
- accélération sur site :  $A_s = 2,5 \text{ m/s}^2$  (en zones  $S_0$  et  $S_1$ )  
 $A_s = 3,0 \text{ m/s}^2$  (en zone  $S_2$  et  $S_3$ )

### 6.2.5. Résultats

En l'absence de considérations qualitatives quant à la susceptibilité des matériaux à se liquéfier et au contexte permettant éventuellement de dissiper les surpressions interstitielles, les résultats ne portent que sur des conditions nécessaires à la liquéfaction.

Les résultats sont présentés sous forme de profils de sols, de 0 à 20 m, en indiquant la valeur maximum du N de l'essai SPT<sup>3</sup> pour laquelle on aura respectivement un facteur de sécurité  $F_l$  de 1,33 (fig. 7) et de 1,0 (fig. 8).

La valeur de  $N_{SPT}$  est une valeur brute, calculée dans le cas d'un sable de densité ( $\gamma = 20 \text{ hN/m}^3$ ). Une correction des effets de fines doit éventuellement être apportée.

On distingue deux facteurs de sécurité, car :

- pour  $F_l \leq 1,33$  il y a potentialité de liquéfaction, c'est-à-dire que des surpressions interstitielles peuvent apparaître.
- pour  $F_l \leq 1,0$  il y a 100% de surpression interstitielle, et par conséquent, perte totale de la résistance au cisaillement.

Plusieurs courbes prises individuellement permettent de distinguer les différentes configurations hydrogéologiques et sismiques. Ensembles, elles forment un fuseau assez bien défini.

D'une façon globale, on peut dire que jusqu'à 10 m de profondeur les sols de type b et surtout c sont potentiellement liquéfiables. Au delà de 10 m et jusqu'à 20 m de profondeur, les sols de type a, aux caractéristiques mécaniques les moins bonnes ( $NSPT < 35$ ) sont aussi potentiellement liquéfiables.

Toutefois, si l'on regarde parmi les sols potentiellement liquéfiables, ceux qui peuvent développer jusqu'à 100% de surpressions interstitielles ( $F_l \leq 1,0$ ), il convient d'exclure les sols de type a.

---

<sup>3</sup> SPT (Standard Penetration Test). Cet essai de pénétration dynamique consiste à battre un carottier au fond d'un forage et à compter le nombre de coups ( $N_{SPT}$ ) nécessaires à l'enfoncement.

L'importance relative des conditions hydrogéologiques est prépondérante dans la tranche superficielle de la nappe, aussi bien entre les niveaux moyen et haut qu'entre les différentes nappes.

L'accélération sismique, quant à elle, a une influence sur les résultats : elle croît avec la profondeur.

### 6.2.6. Conclusion

Quelques rares potentialités de liquéfaction sont envisageables sur les reliefs niçois. Il faut pour cela supposer un faciès sableux et la présence (difficilement cernable) d'une tranche de sols saturés dans ce complexe aquifère. Hormis ce cas particulier, les potentialités de liquéfaction sont localisées dans les nappes du Paillon, du centre ville et du Var.

Les potentialités mécaniques de liquéfaction concernent essentiellement, par intensité décroissante, les formations de type c et éventuellement b. Il s'agit par conséquent, des sites de types  $S_3$ ,  $S_2$  et, à un degré moindre, du site de type  $S_1$ .

Au delà de cette répartition, il convient au cas par cas, d'évaluer ponctuellement :

- la susceptibilité réelle du matériau à se liquéfier,
- le contexte local permettant éventuellement de dissiper les surpressions interstitielles dans des formations alluviales grossières ou au contraire de les accentuer au sein de matériaux plus fins,
- d'intégrer globalement les effets de chaque tranche liquéfiable pour estimer la sévérité du problème comme l'a proposé Iwasaki (1986).

Par conséquent, après cette analyse, la cartographie des potentialités de liquéfaction résulte à la fois des cartes hydrogéologiques et des zones de sismicité.

Toutefois, la conclusion définitive sur l'aléa liquéfaction ne peut être envisagée, à ce jour, que localement.

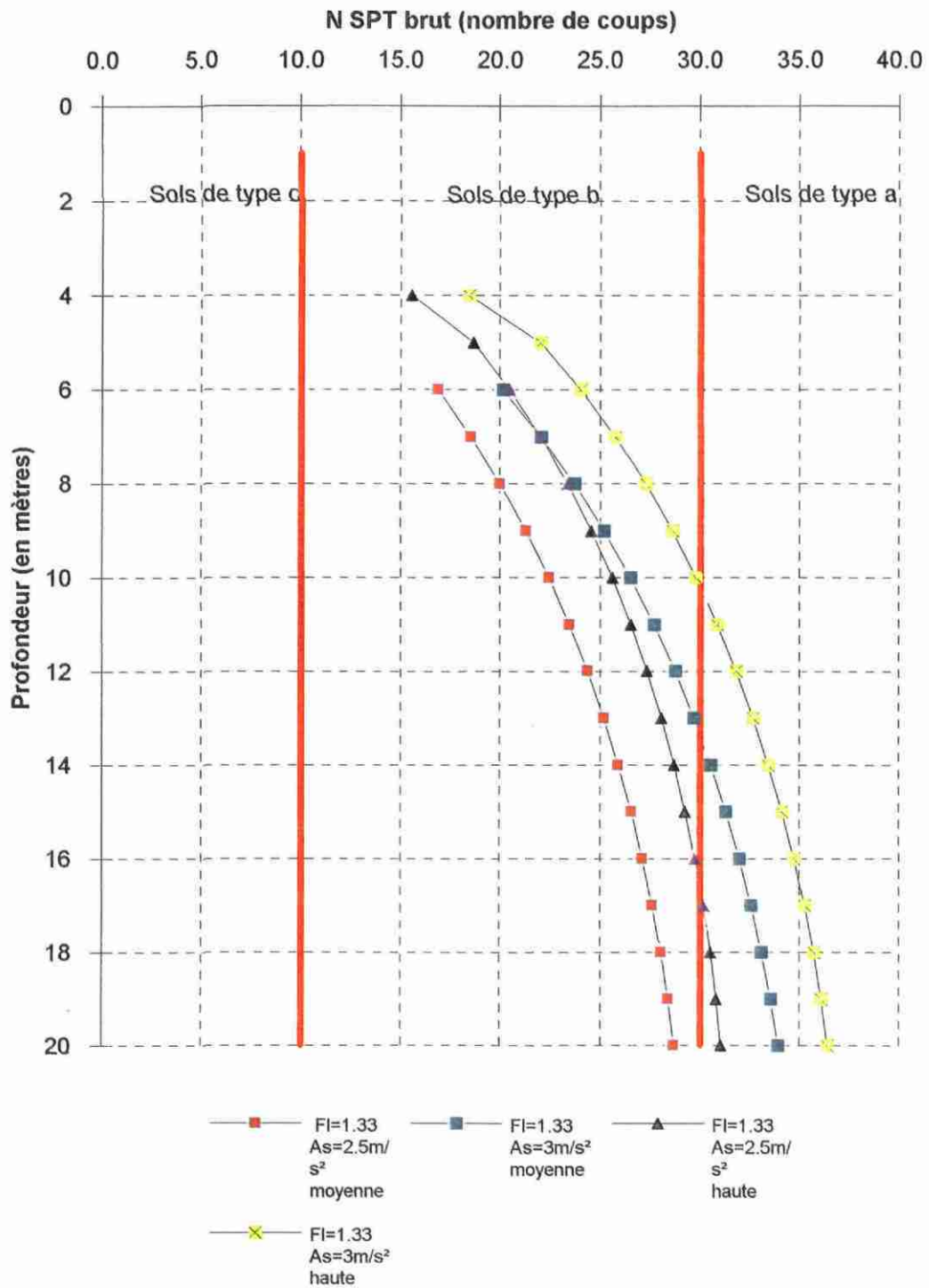


Fig. 7a - N brut de l'essai SPT assurant un facteur de sécurité de 1,33 : nappe du Paillon.

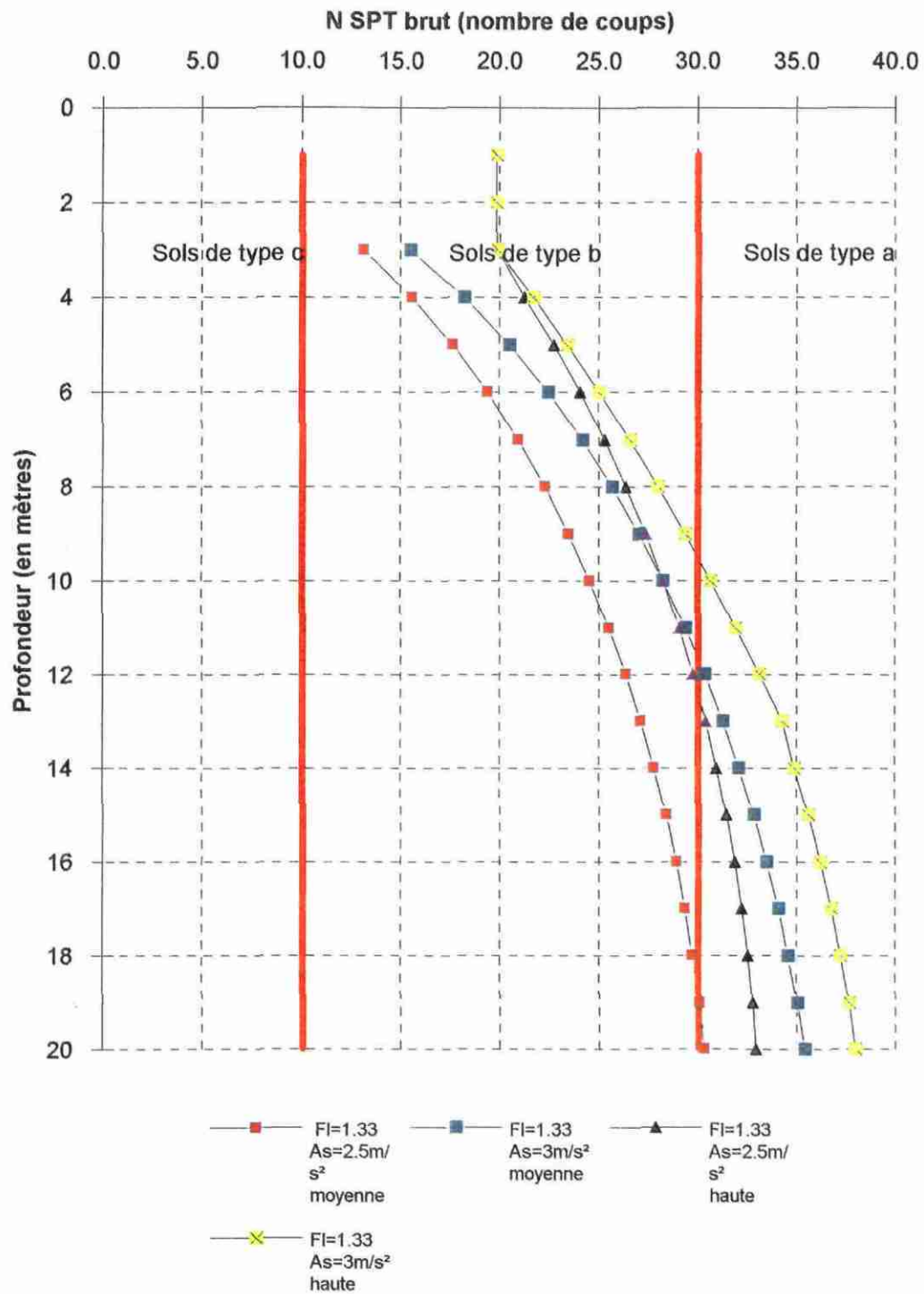


Fig. 7b - N brut de l'essai SPT assurant un facteur de sécurité de 1,33 : nappe du Var.

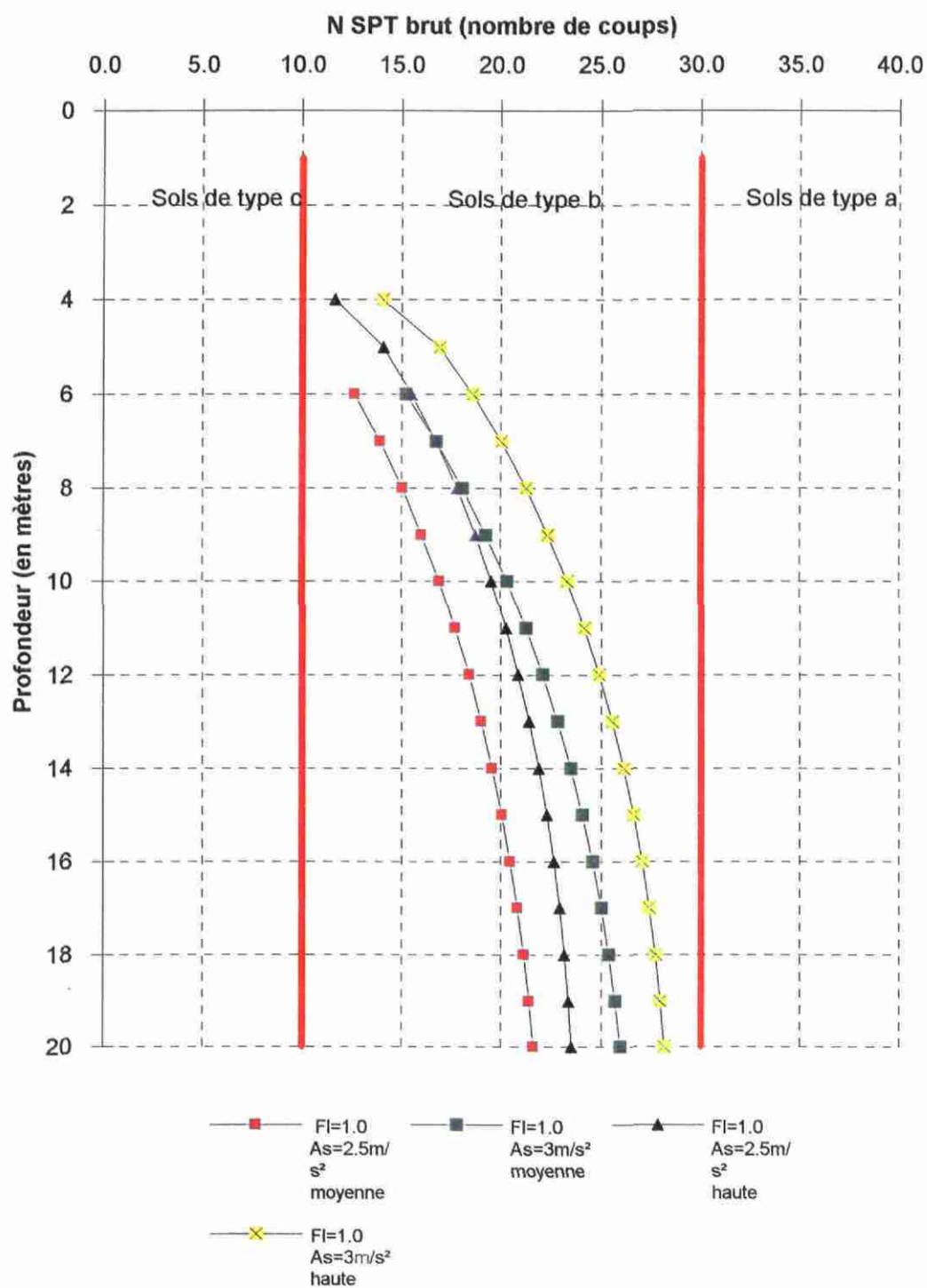


Fig. 8a - N brut de l'essai SPT induisant 100% de surpression interstitielle : nappe du Paillon.

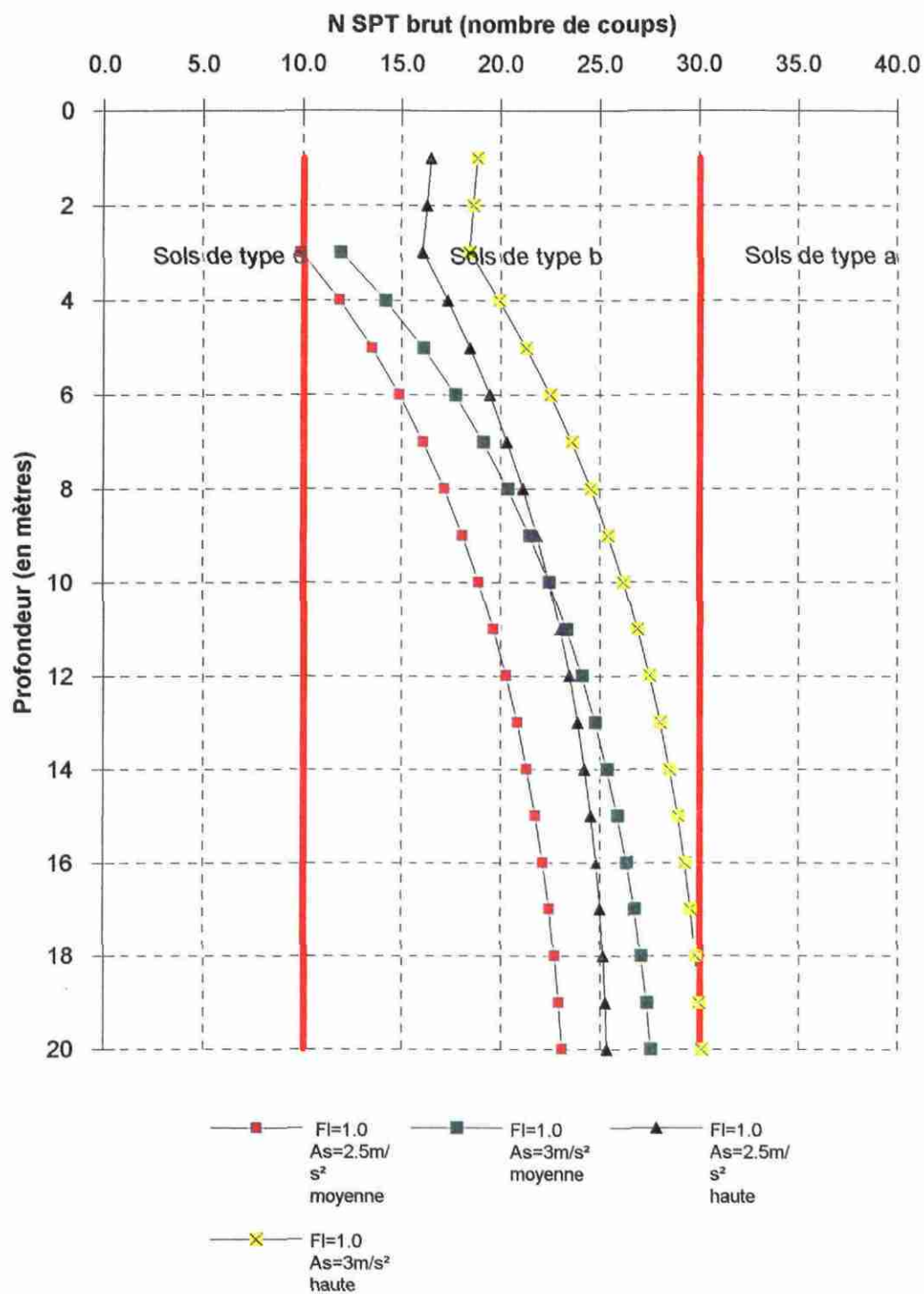


Fig. 8b - N brut de l'essai SPT induisant 100% de surpression interstitielle : nappe du Var.



## 7. Mouvements sismiques à prendre en compte

### 7.1. INTRODUCTION

Cette partie vient en complément des conclusions de l'étude de 1995, rassemblées dans l'article de Bard *et al.*, présenté à la 5<sup>ème</sup> Conférence Internationale sur le Zonage Sismique à Nice en octobre 1995.

Sur la zone pilote du centre de Nice, des méthodes expérimentales et numériques ont été mises en oeuvre pour définir l'aléa sismique local. Elles visent à quantifier la réponse des sols à une sollicitation sismique, à l'aide de deux paramètres : la fréquence de résonance d'un site et le niveau d'amplification du signal par rapport au rocher.

Plus particulièrement, l'utilisation du programme SHAKE a permis d'identifier et de cartographier les zones présentant une réponse sismique homogène et de caractériser chacune d'entre elles par un spectre de réponse élastique.

L'objet de ce travail complémentaire était en un premier temps de comparer les résultats issus des enregistrements du bruit de fond à ceux des modélisations numériques. Il s'agissait ensuite d'analyser si ces nouvelles informations déduites de l'approche expérimentale pouvaient être répercutées en terme de modifications à apporter à la définition des mouvements sismiques à prendre en compte pour le zonage de la ville de Nice.

### 7.2. REVISION DU ZONAGE PROPOSE EN 1995

#### 7.2.1. Justification de ce nouveau zonage

Lorsque les formations peu rigides surplombant le substratum sont quasi horizontales et de grande extension latérale, les modifications temporelles et spectrales du signal sismique sont relativement simples et rapides à calculer à l'aide d'un modèle monodimensionnel de réponse sismique des sols. En première approximation, nous avons utilisé une méthode simplifiée ID (SHAKE) qui repose sur quelques paramètres mécaniques et morphologiques caractérisant le site et qui détermine la réponse des sols soumis à des sollicitations sismiques à partir d'un comportement linéaire équivalent (Schnabel *et al.*, 1972).

La version de SHAKE utilisée pour l'établissement du zonage du secteur d'étude de Nice datait de 1985. Depuis 1996, nous disposons d'une version améliorée (Idriss & Sun, 1992) qui corrige certains inconvénients mis en évidence à plusieurs reprises sur l'ancienne version de SHAKE, parmi lesquels :

- les courbes G- $\gamma$  doivent être données sous forme normalisée à  $G/G_{max}$  ; il n'y a donc plus lieu de les caler éventuellement à l'aide de valeurs de cohésion non drainée ( $C_{uv}$ ) dans le cas d'argiles ;

- l'expérience a montré qu'il était préférable de diviser une couche de grande épaisseur (supérieure à 10 mètres), en plusieurs couches d'épaisseur au plus égale à 10 mètres ;
- on ne considère plus la présence d'un niveau de nappe d'eau dans la colonne (sans grande influence) ;
- le calcul du rapport entre la déformation effective et la déformation maximale  $\gamma/\gamma_{\max}$  s'effectue désormais à l'aide d'une loi empirique dépendant de la magnitude du séisme.

A partir du modèle géotechnique tridimensionnel du sous-sol, la zone d'étude a été discrétisée en un nombre fini de mailles. L'espacement entre deux points consécutifs est de 250 m N-S et de 200 m E-W. Les profils sélectionnés sont essentiellement orientés Est-Ouest de manière à être perpendiculaires à l'axe du bassin ; ils sont recoupés par un profil grossièrement Nord-Sud. La figure 9 présente les 14 profils sélectionnés sur la zone d'étude, ainsi que la numérotation des sites (par exemple, le site 14-20 se trouve à la position n°20 sur le profil n°14).

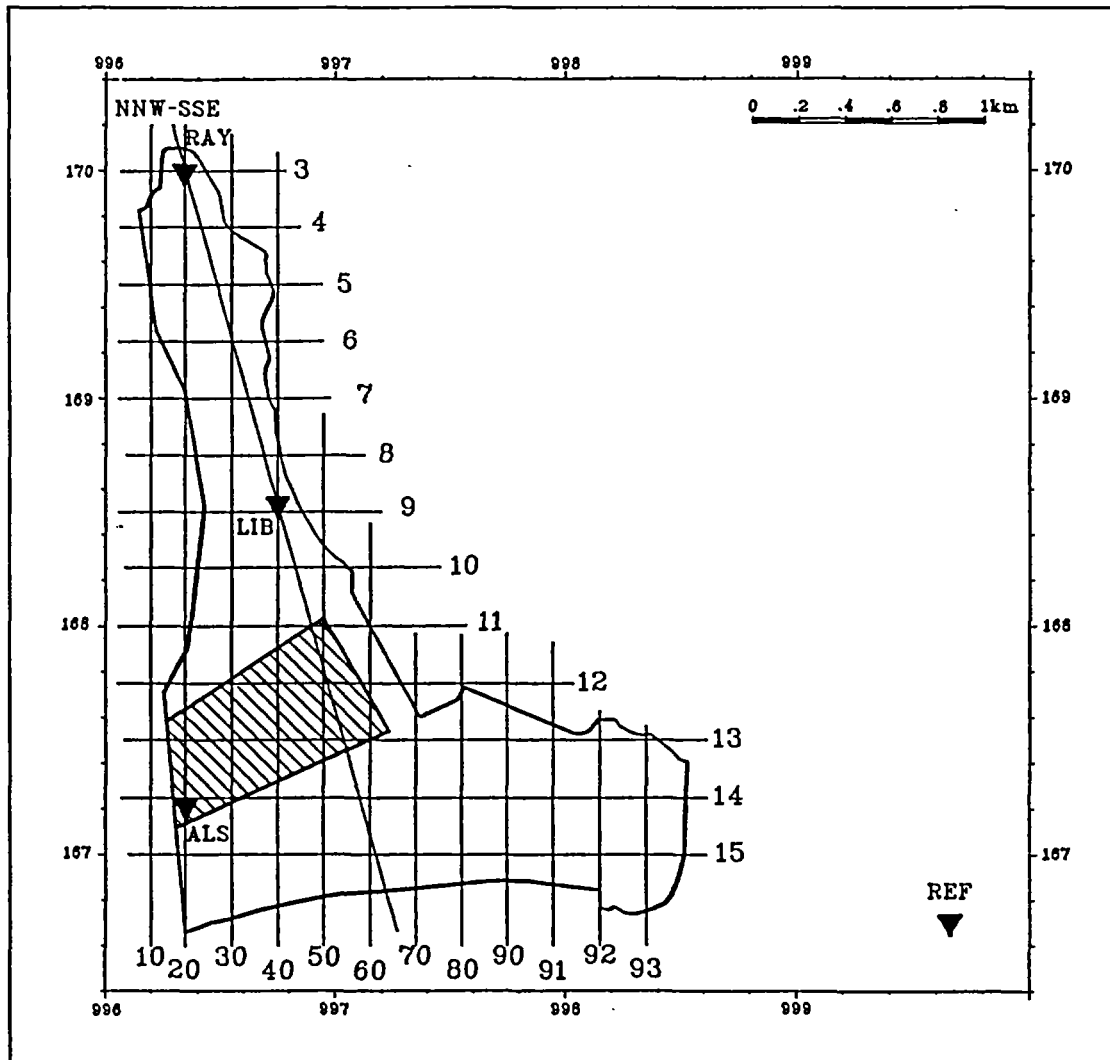
### 7.2.2. Spectres de réponse élastiques

La réponse sismique du sol a été systématiquement réévaluée par SHAKE91 en chacun des 82 sites considérés (fig. 9) et pour les 3 accélérogrammes au rocher calés à 0.15 g, 0.25 g et 0.35 g. Les accélérogrammes obtenus en surface conduisent à déterminer plusieurs quantités, qui permettent de mettre en évidence et de caractériser les effets de site, parmi lesquelles :

- l'accélération horizontale maximale en surface,  $a_s$  ;
- le spectre de réponse élastique en accélération,  $SA(T)$ , fonction de la période.

Les spectres de réponse ainsi calculés ont ensuite été comparés, puis regroupés, pour ne retenir finalement qu'un nombre restreint de spectres ayant les mêmes caractéristiques fréquentielles. On définit ainsi un nombre limité de zones présentant une réponse sismique homogène. Contrairement au zonage précédent qui en contenait cinq, le regroupement des spectres a conduit à n'identifier plus que trois zones sur l'ensemble du secteur d'étude. Par ailleurs, dans un souci de cohérence avec le zonage de l'ensemble de la commune de Nice (zonage de niveau A basé sur les règles PS 92), contenant deux zones distinctes hors rocher (planche hors-texte n°6), nous avons introduit une quatrième zone 2-3, qui regroupe les zones 2 et 3.

Les spectres de réponse  $SA(T)$  pour chacune des quatre zones : 1, 2, 3 et 2-3, sont donnés sur la figure 10. Le tableau 8 présente les valeurs d'accélération maximales obtenues en surface.



*Fig. 9 - Implantation des stations d'enregistrement (triangles) et des 14 profils sélectionnés dans la zone d'étude pilote.*

Le quartier des Musiciens (zone d'étude pilote) figure en traits hachurés.

	nombre de points de calcul	H (m)	$a_R = 0.15 \text{ g}$ $a_s$ (g)	$a_R = 0.25 \text{ g}$ $a_s$ (g)	$a_R = 0.35 \text{ g}$ $a_s$ (g)
ZONE 1	19	16 ±11	0.34 ±0.05	0.51 ±0.10	0.66 ±0.14
ZONE 2	38	39 ±11	0.22 ±0.02	0.31 ±0.02	0.38 ±0.03
ZONE 3	16	61 ±7	0.19 ±0.02	0.26 ±0.01	0.32 ±0.01
ZONE 2-3	54		0.21 ±0.02	0.29 ±0.03	0.36 ±0.04

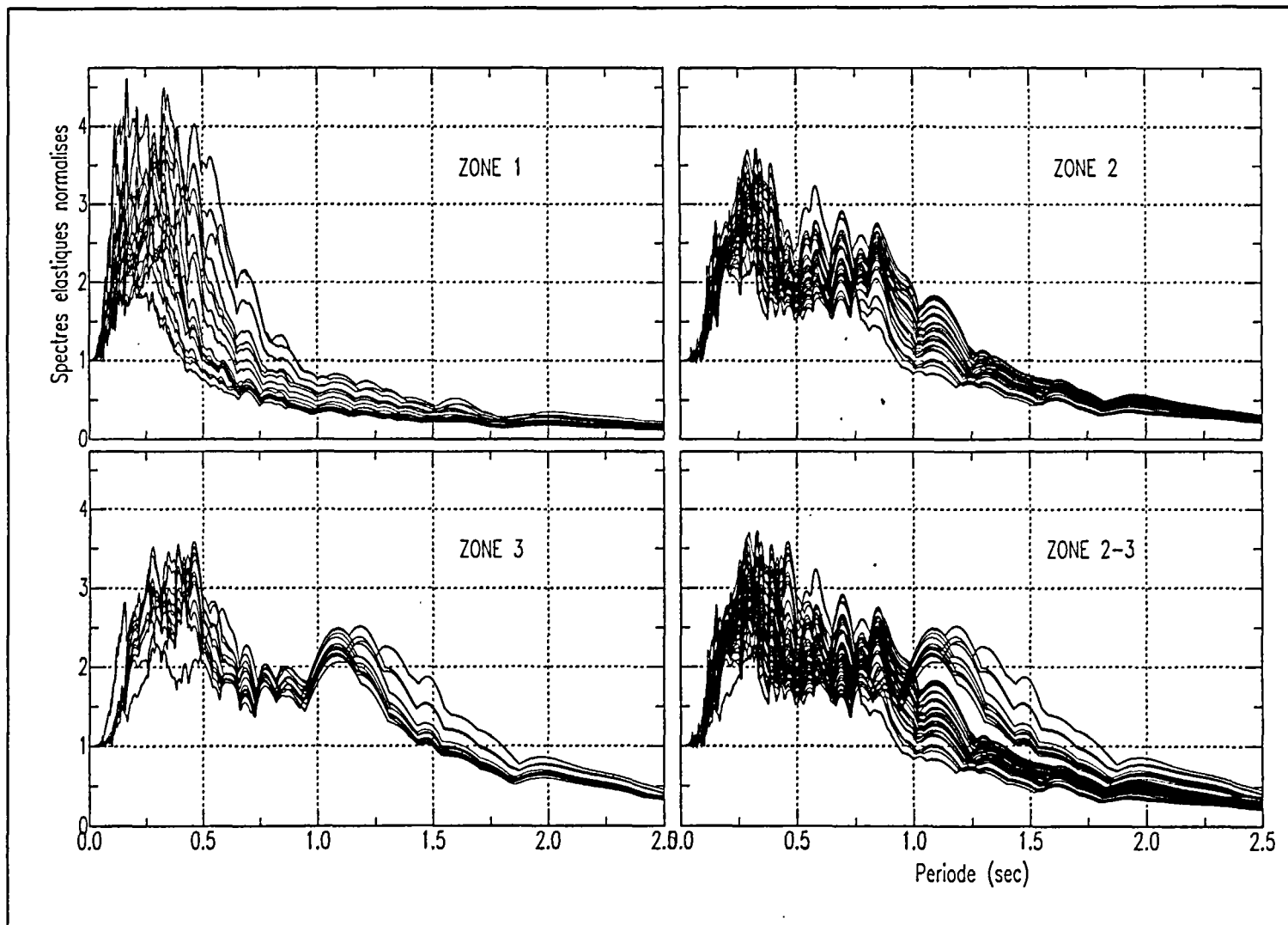
*Tabl. 8 - Liste par zone et par accélération au rocher  $a_R$  des valeurs moyennes avec écarts-types, de l'épaisseur  $H$  de la colonne de sol et de l'accélération maximale au site  $a_s$*

Le zonage obtenu par les nouveaux calculs (planche hors-texte n° 6) est indépendant du niveau de la sollicitation sismique imposée aux sols : le découpage du secteur d'étude est identique lorsque l'on considère les spectres calculés à partir de  $a_R=0.15\text{g}$ ,  $0.25\text{g}$  ou  $0.35 \text{ g}$ . Notons que la numérotation des zones est identique à celle des spectres réglementaires  $S_0$  à  $S_3$ , puisque la zone 1 est à rapprocher du secteur défini par les spectres  $S_1$ , la zone 2 aux  $S_2$ , etc.

Avec la version de SHAKE91, nous obtenons toujours des niveaux d'accélération élevés dans le Nord du secteur d'étude traduisant les limites d'utilisation du programme dans des configurations où le contraste d'impédance entre les couches superficielles de faible épaisseur et le substratum est particulièrement élevé (de l'ordre de 6).

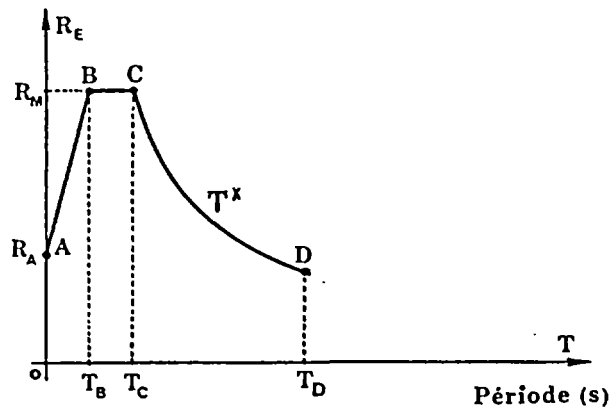
Dans une seconde étape, il est possible d'attribuer à chaque zone un spectre de réponse spécifique, qui tient compte de la réponse particulière de chaque type de sols.

Les spectres élastiques obtenus pour chaque zone, sont normalisés à l'accélération maximale au site  $a_s$ , puis moyennés (fig. 11). Les valeurs d'amplification maximale sont données tableau 9 avec les gammes de périodes et de fréquences correspondantes.



*Fig. 10 - Spectres de réponse élastiques normalisés obtenus par approche numérique et regroupés en 3 zones.*

La zone 2-3 rassemble les spectres des zones 2 et 3.



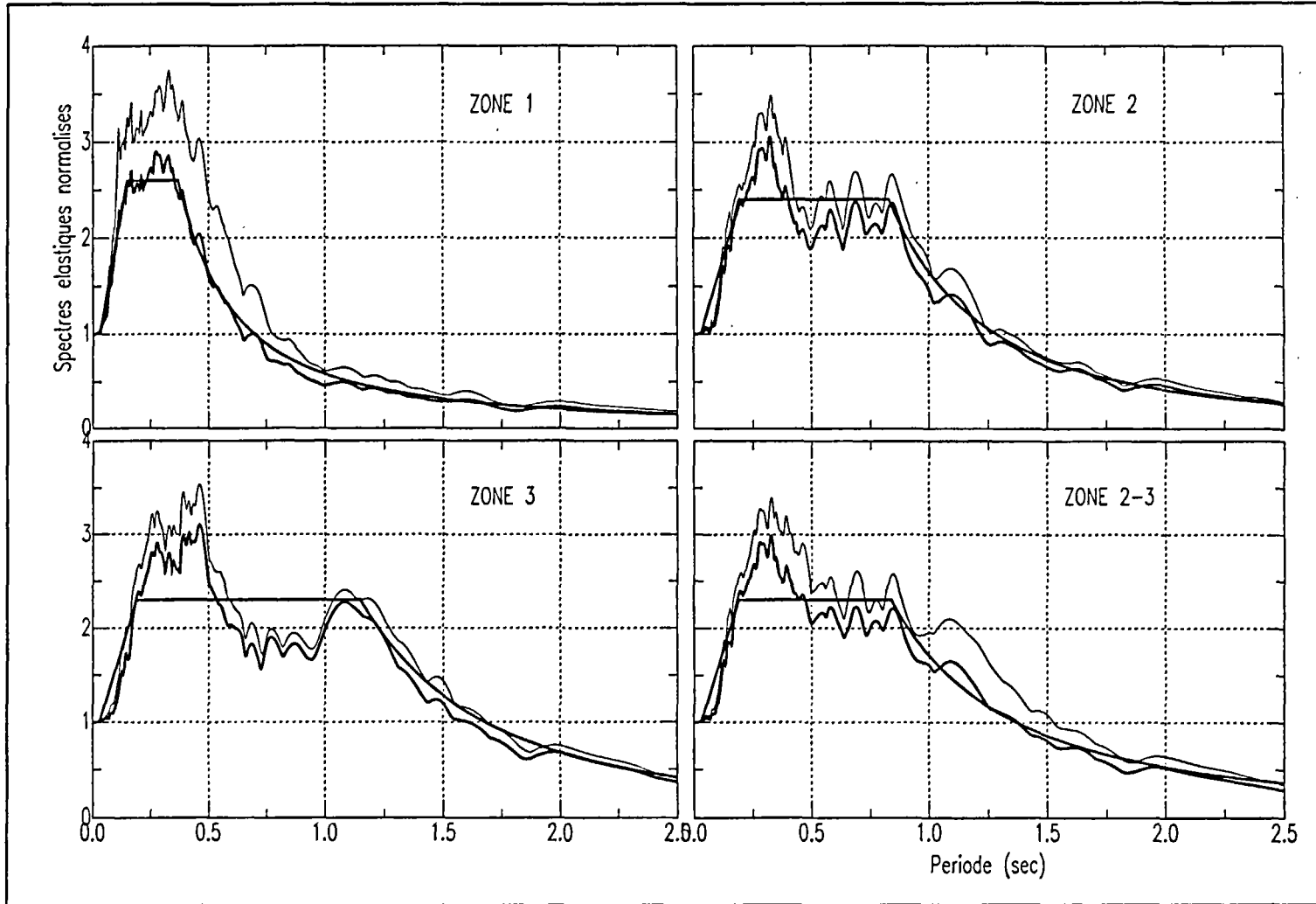
	$T_A$ (sec)	$T_B$ (sec)	$T_C$ (sec)	$T_D$ (sec)	$f_A$ (Hz)	$f_B$ (Hz)	$f_C$ (Hz)	$f_D$ (Hz)	$R_A$	$R_M$	$T^x$
ZONE 1	0.03	0.19	1.16	4	33	5.3	0.9	0.25	1	2.5	2.2
ZONE 2	0.03	0.22	0.82	4	33	4.5	1.2	0.25	1	2.7	2.0
ZONE 3	0.03	0.15	0.41	4	33	6.7	2.4	0.25	1	3.3	1.6
ZONE 2-3	0.03	0.19	0.84	4	33	5.3	1.2	0.25	1	2.3	1.7

Tabl. 9 - Définition des spectres élastiques normalisés retenus, à l'aide des coordonnées des points A à D.

### 7.3. COMPARAISON ENTRE RESULTATS EXPERIMENTAUX ET NUMERIQUES

#### 7.3.1. Données et hypothèses de travail

Le modèle monodimensionnel de réponse sismique des sols SHAKE, mis en oeuvre par le BRGM, conduit à la définition des fonctions de transfert locales du site par rapport au rocher horizontal. La fonction de transfert est définie ici comme le rapport de la transformée de Fourier du mouvement calculé à la surface, à la transformée de Fourier du mouvement donné au rocher horizontal affleurant (fig. 12).



*Fig. 11 - Spectres de réponse élastiques normalisés, pour chaque zone :  
courbe moyenne, courbe moyenne  $\pm$  écart-type et forme simplifiée.*

Par ailleurs, le CETE-Méditerranée a appliqué des méthodes expérimentales de détermination des effets de site (Bard *et al.*, 1995). Concernant l'approche " bruit de fond ", une hypothèse déterminante bien que n'étant pas physiquement démontrée à ce jour, est le fait d'assimiler le rapport spectral entre les composantes horizontale et verticale (H/V) du bruit de fond, à une fonction de transfert entre un site donné et le rocher de référence.

En 1995, l'observation des rapports spectraux site/référence pour l'enregistrement de séismes régionaux d'une part, et des rapports H/V pour l'enregistrement du bruit de fond d'autre part, a permis de dégager un certain nombre de caractéristiques intéressantes pour chacun des trois sites étudiés ALS, LIB et RAY sur la figure 9.

Les fonctions de transfert obtenues à partir d'enregistrements de bruit de fond redescendent autour de l'unité après avoir marqué un pic très net à une fréquence que l'on peut sans doute considérer comme celle du premier mode de résonance. Par contre, les fonctions de transfert site/référence restent anormalement élevées après cette montée en amplification au niveau du pic de résonance (fig. 11 et fig. 16 dans Bard *et al.*, 1995). C'est la raison pour laquelle nous ne tiendrons pas compte des résultats expérimentaux issus des fonctions de transfert site/référence, car ils sont inexploitablement en terme de mouvements sismiques de référence à prendre en compte sur la ville de Nice.

D'autre part, nous ne traiterons pas le site RAY (fig. 9), les résultats des deux types de méthodes étant contradictoires sur ce site. En effet, lors des simulations numériques, le site RAY a été assimilé à un site rocheux, car la réponse obtenue par SHAKE était plate jusqu'à près de 20 Hz. Par contre, les fonctions de transfert déterminées expérimentalement sur ce site font nettement ressortir une fréquence de résonance voisine de 3.5 Hz.

Il ne reste que les données issues des enregistrements du bruit de fond sur les deux autres sites ALS et LIB pour réaliser la confrontation entre résultats numériques et expérimentaux.

### 7.3.2. Fonctions de transfert

La figure 13 présente pour les sites ALS et LIB les fonctions de transfert locales obtenues par méthodes numérique et expérimentale. Les modélisations par SHAKE ont été systématiquement réalisées pour trois niveaux d'accélération maximale au rocher : 0.15 g, 0.25 g et 0.35 g, produisant une série de trois fonctions de transfert. Les fréquences propres obtenues pour ces différents niveaux de sollicitation sismique dans le cas de Nice varient très peu : elles diminuent très légèrement lorsque le mouvement imposé à la base de la colonne de sol est plus fort.

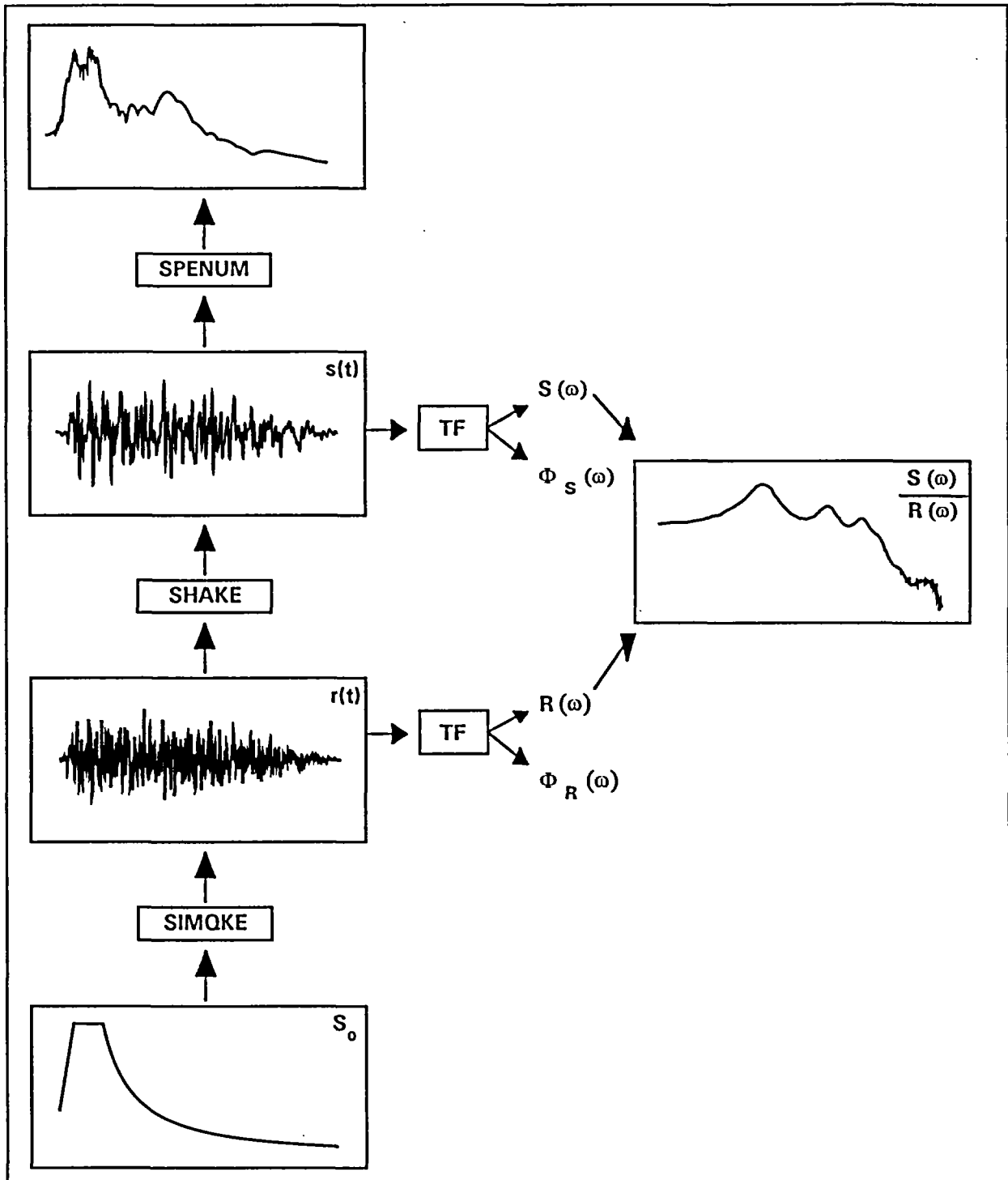
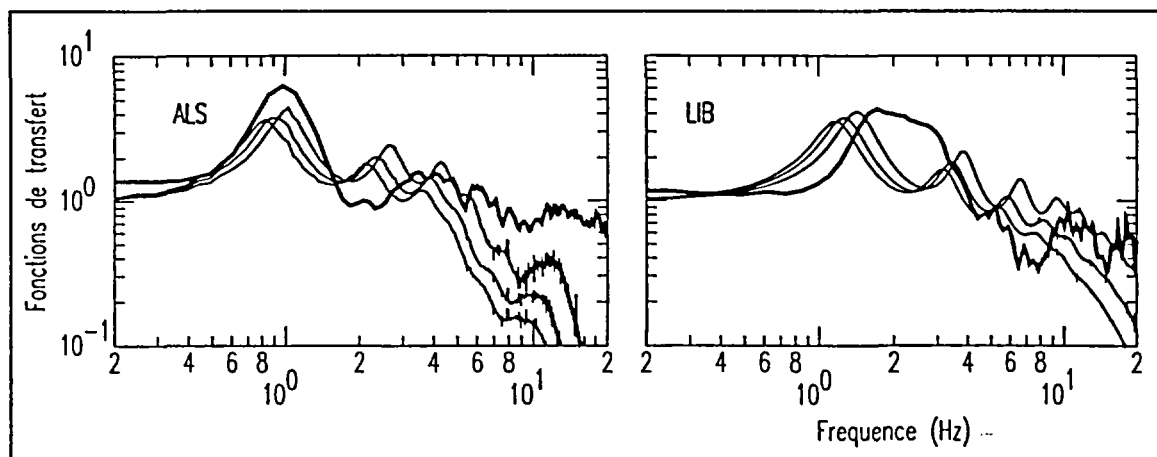


Fig. 12 - Schéma de la procédure utilisée pour la détermination de mouvements sismiques tenant compte des conditions locales de site, par approche numérique.



**Fig. 13 - Comparaison entre les fonctions de transfert obtenues sur les sites ALS et LIB.**

trait gras = rapport H/V, trait fin = modélisation 1D pour les 3 niveaux d'accélération au rocher 0.15 g, 0.25 g et 0.35 g.

Au niveau de la position de la fréquence propre de la colonne de sol, sur le site ALS les deux fonctions de transfert s'accordent très bien et mettent en évidence une amplification du signal sismique autour de 1 Hz. Par contre, sur le site LIB on observe un décalage de plus de 0.6 Hz entre les pics. Outre ce décalage, on note une contradiction dans la réponse du sol autour de 2-3 Hz, avec un creux sur la courbe numérique et un maximum d'amplification sur la courbe expérimentale.

Concernant les niveaux d'amplification, les valeurs sont du même ordre de grandeur, excepté à très hautes fréquences où la fonction de transfert expérimentale amplifie nettement plus le mouvement du sol à partir de 10 Hz, que ne le prévoit la courbe numérique. Ceci laisse présager des niveaux d'accélération maximale déduits de l'approche expérimentale, particulièrement élevés.

Globalement, l'accord entre les fonctions de transfert obtenues par simulation numérique d'une part, et les courbes déduites des fonctions de transfert H/V du bruit de fond d'autre part, n'est pas vraiment concluant sur les deux sites traités.

### 7.3.3. Spectres de réponse

#### 7.3.3.1. Méthodologie proposée

Bien que les approches expérimentales d'évaluation des effets de site, notamment par enregistrement du bruit de fond ambiant, soient actuellement utilisées de manière extensive, elles permettent uniquement d'avoir une estimation de la fréquence propre du sol, ainsi qu'une information qualitative sur les niveaux d'amplification relatifs d'un site à l'autre. Pour l'application de ce genre de méthode dans le domaine de l'ingénierie sismique, il faut être capable de passer de la fonction de transfert du site à la définition

des mouvements sismiques de référence, en particulier sous forme de spectres de réponse élastiques.

De part cette nécessité, nous proposons ici (fig. 14) une procédure directement inspirée du schéma de calcul de mouvements sismiques par approche numérique (fig. 12). Rappelons que la fonction de transfert est définie comme le rapport de la transformée de Fourier du mouvement calculé à la surface  $S(\omega)$ , à la transformée de Fourier du mouvement donné au rocher horizontal affleurant  $R(\omega)$ .

Bien qu'il y ait peu de justifications physiquement acceptables à cela, nous supposons que le rapport spectral H/V bruit de fond est équivalent à la fonction de transfert du site  $S(\omega)/R(\omega)$ . En convoluant la fonction de transfert expérimentale par le mouvement au rocher  $R(\omega)$ , nous extrayons la seule contribution du site, c'est-à-dire la transformée de Fourier  $S(\omega)$ . Il suffit ensuite d'effectuer une transformée de Fourier inverse pour générer une accélération du sol  $s(t)$ , supposée avoir été modifiée par les conditions propres au site. Pour cette transformation, il est nécessaire d'avoir non seulement le module du spectre de Fourier  $S(\omega)$ , mais aussi sa phase. Nous prenons la phase la plus appropriée, c'est-à-dire celle du signal numérique calculé au toit de la colonne de sol  $\Phi_s(\omega)$ . Une fois ce signal obtenu, le calcul de son spectre de réponse élastique en accélération est immédiat.

La question de la phase à choisir pour effectuer la transformation de Fourier inverse mérite certainement d'être approfondie par des études spécifiques. Nous avons simplement testé la procédure avec les phases des signaux synthétiques disponibles : le rocher  $r(t)$  et le site  $s(t)$ . Son influence sur les spectres de réponse obtenus était dans ce cas négligeable.

### **7.3.3.2. Application aux sites ALS et LIB**

Par application de la procédure précédemment décrite, nous pouvons désormais superposer sur la figure 15 les deux types de spectres de réponse : l'un obtenu par le calcul SHAKE et l'autre déduit des mesures de bruit de fond. La figure 15 présente en outre les formes spectrales simplifiées adoptées pour la zone 3 incluant le site ALS et pour la zone 2 à laquelle appartient le site LIB.

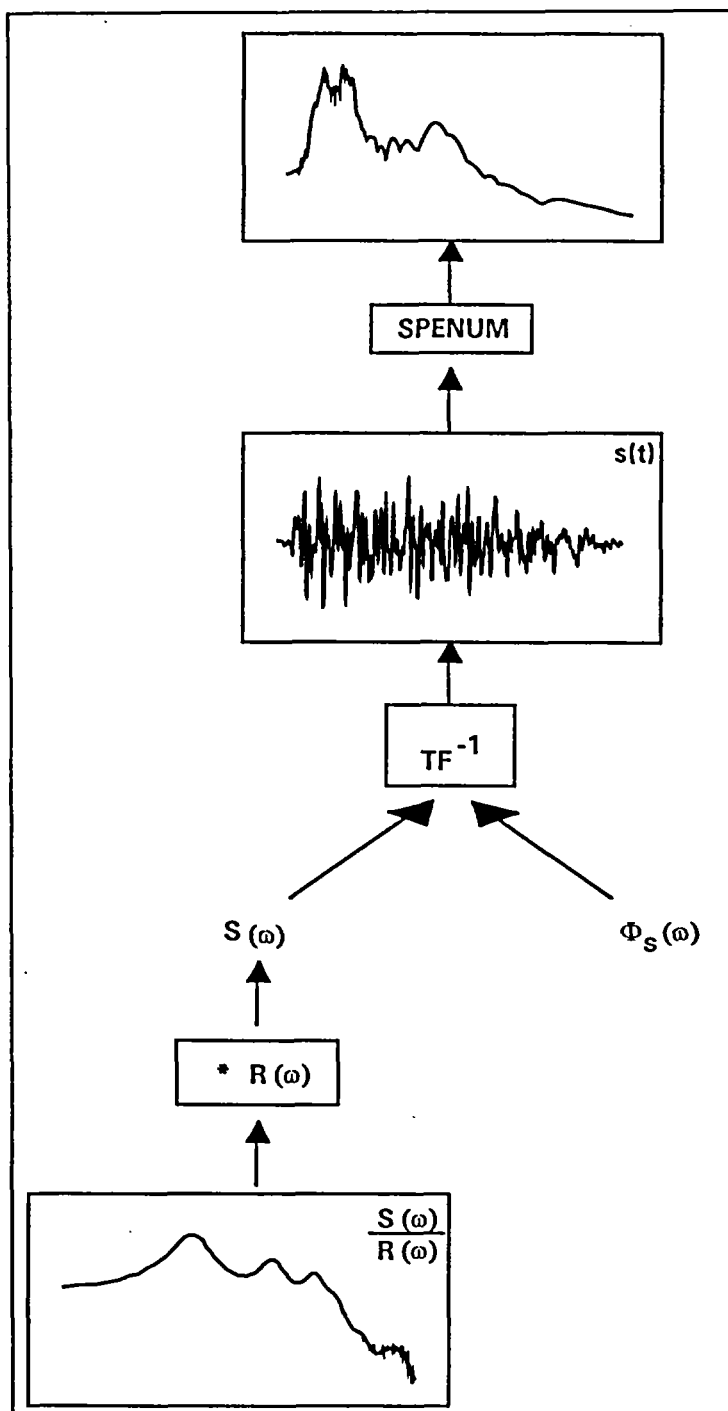
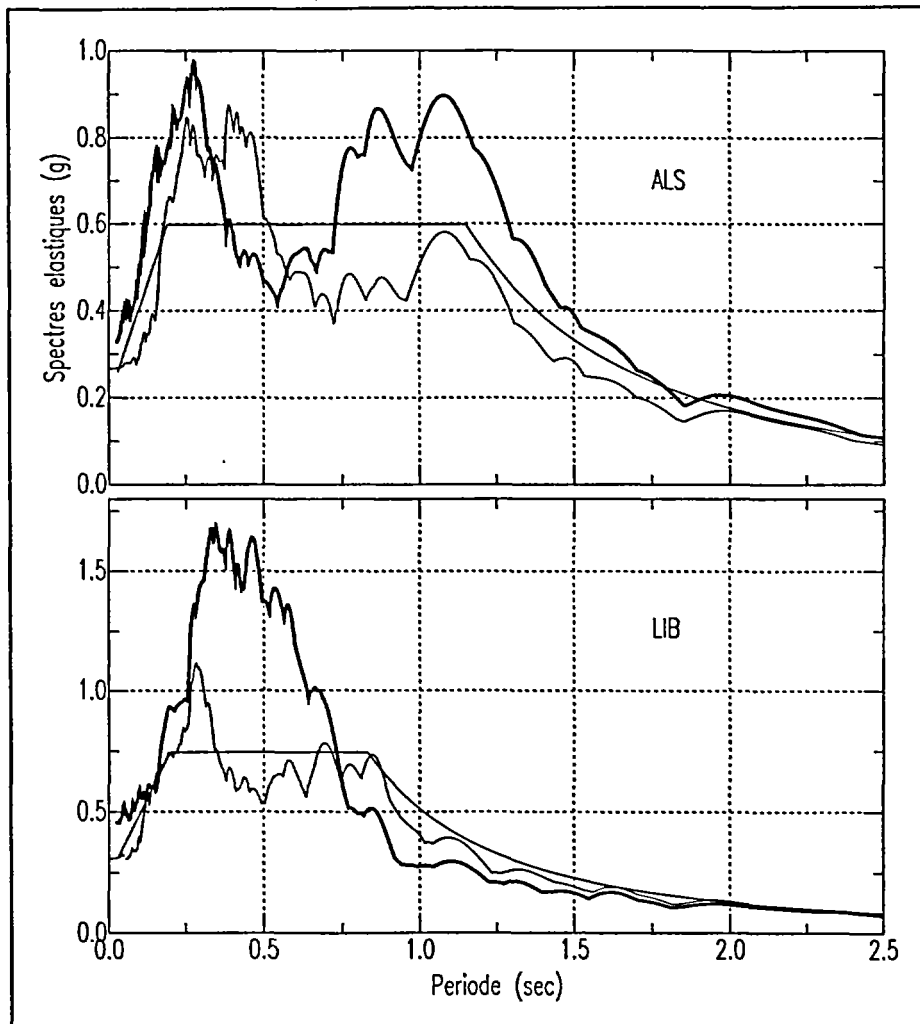


Fig. 14 - Schéma de la procédure proposée pour la détermination de mouvements sismiques tenant compte des conditions locales de site, par approche expérimentale.



**Fig. 15 - Comparaison entre les spectres de réponse élastiques obtenus sur les sites ALS et LIB pour un niveau d'accélération au rocher de 0.25 g.**

trait gras = rapport H/V, trait fin = modélisation 1D et forme spectrale simplifiée de la zone correspondante.

On retrouve évidemment sur ce graphique les divergences déjà mises en évidence sur les fonctions de transfert de la figure 13, c'est-à-dire un décalage des maximums d'amplification, excepté le pic voisin de 1 seconde qui est bien reproduit pour le site ALS. Les valeurs d'accélération maximale  $a_g$  déduites de la méthode bruit de fond sont de 25% à 50% supérieures à celles déterminées par SHAKE : 0.27 g à 0.33 g pour ALS et 0.31 g à 0.46 g pour LIB.

Au vu des données expérimentales uniquement exploitables en deux points du secteur d'étude (sur 4 km<sup>2</sup>), et d'un mauvais accord entre les deux types de résultats, il n'est guère envisageable de modifier nos mouvements de référence tels que définis au paragraphe 7.2.2.

## 7.4. MOUVEMENTS SISMIQUES RETENUS

D'après la figure 15, il est clair que les données actuellement disponibles ne sont ni suffisamment nombreuses, ni suffisamment concordantes, pour en tirer des modifications à apporter au spectre de référence de chacune des zones.

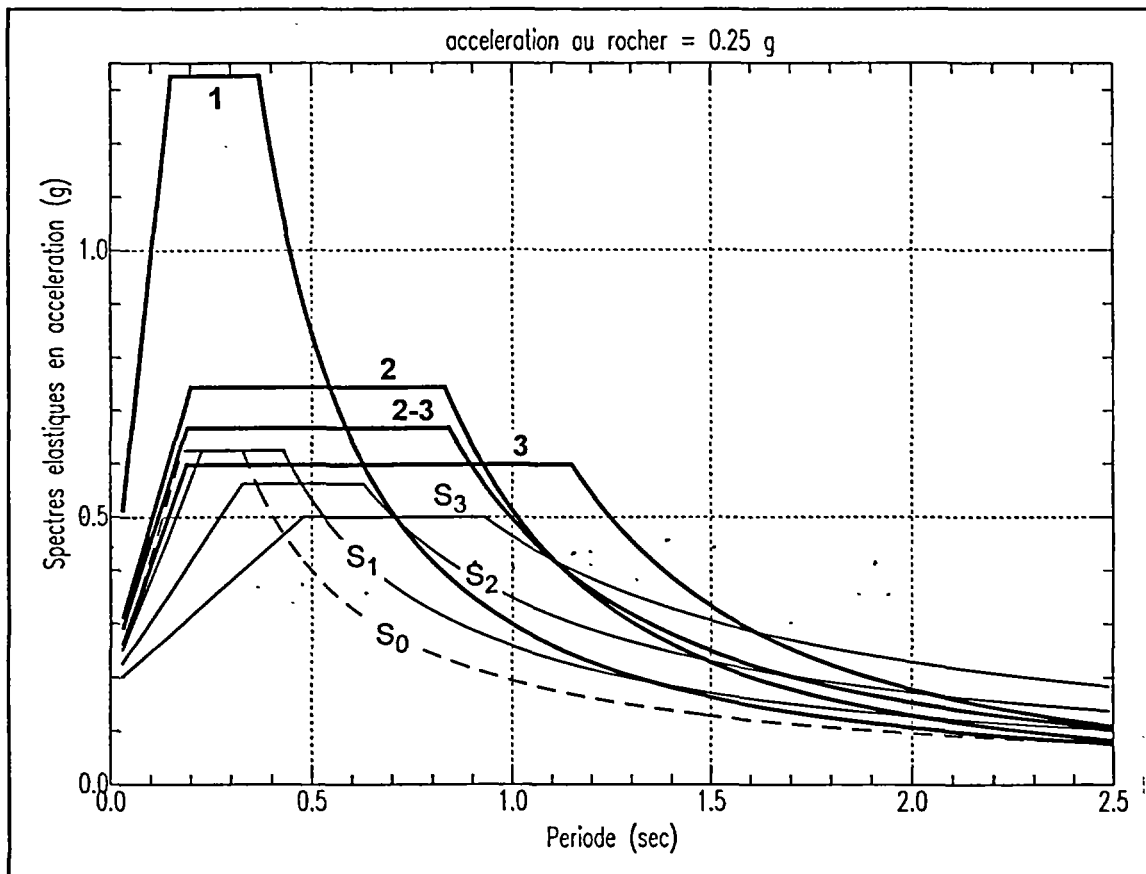
Par conséquent, les mouvements sismiques de référence proposés comme ceux à prendre en compte pour le zonage de Nice sont ceux déterminés par le modèle monodimensionnel de réponse sismique des sols (SHAKE). Ils sont présentés sous forme normalisée sur la figure 12 et définis par les tableaux 8 et 9.

Pour une accélération au rocher de 0.25 g, on compare sur la figure 16 les trois spectres élastiques sur le secteur pilote du centre de Nice, avec les spectres élastiques  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  préconisés par la réglementation en vigueur (PS 92). Le spectre  $S_0$  en pointillés caractérise le mouvement sismique au niveau du rocher horizontal. Les spectre  $S_{2,3}$  est rattaché à la zone 2-3 du microzonage de la commune de Nice. Rappelons que compte tenu des données disponibles pour une grande partie de la commune, une distinction entre zone 2 et zone 3 n'a pas été possible. Elles ont donc été regroupées en une seule et même zone 2-3.

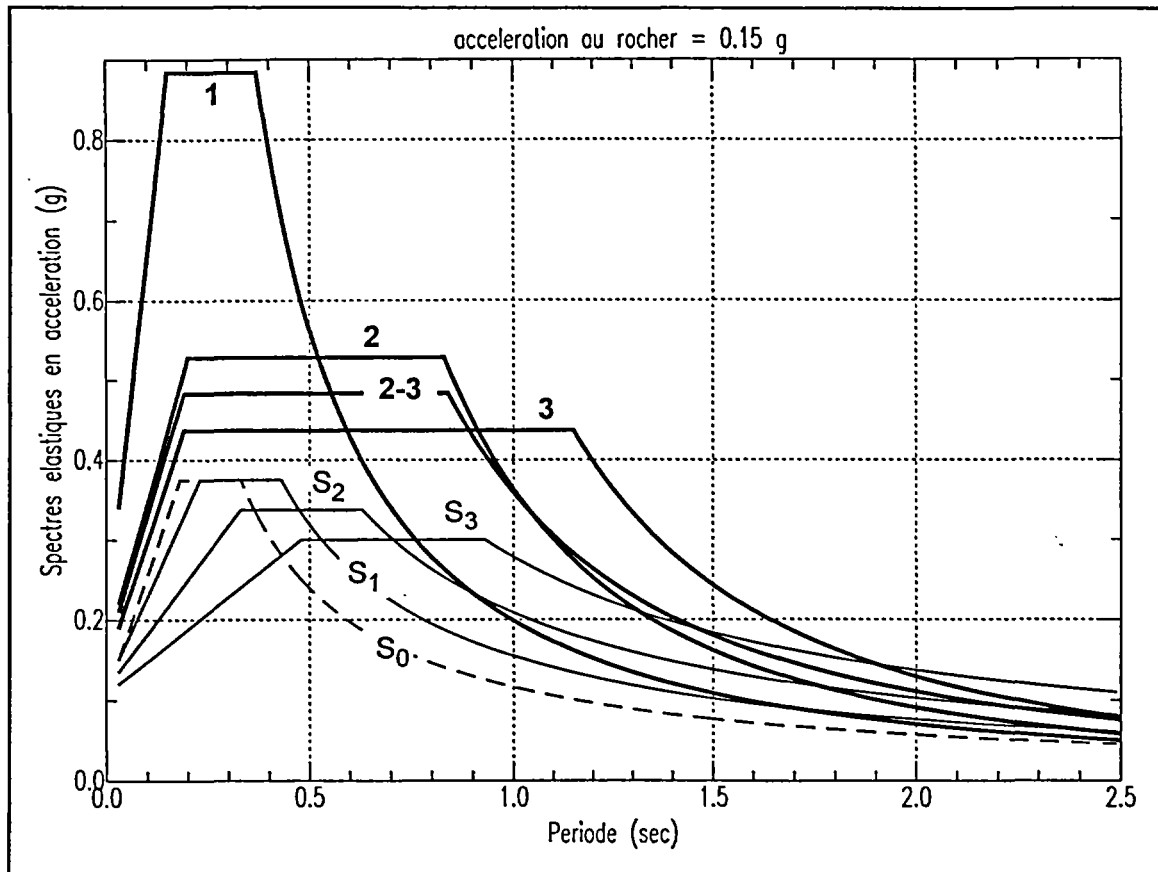
De la même manière que pour les spectres PS 92, les valeurs d'accélération nominale, ainsi que les plateaux en accélération, diminuent lorsque l'épaisseur des alluvions augmente. Mais de façon générale, les mouvements sismiques calculés pour cette étude spécifique sont bien au-delà des niveaux préconisés par les spectres PS 92 dans le domaine des courtes périodes jusqu'à environ 1,5 sec., c'est-à-dire à hautes fréquences ( $> 7$  Hz). En particulier le spectre 1, qui est à rapprocher du spectre  $S_1$ , présente une très forte amplification jusqu'à 1,3 sec. où il passe en dessous de  $S_1$ . Ces niveaux particulièrement élevés sont directement liés à l'accélération maximale moyenne obtenue dans la zone 1 qui est amplifiée d'un facteur 2 par rapport à l'accélération au rocher de 0.25 g. Cette forte amplification dépend surtout du contraste particulièrement marqué de propriétés mécaniques avec le rocher sous-jacent (contraste d'impédance de l'ordre de 6). Ceci met en évidence la grande sensibilité des signaux aux terrains superficiels de faible épaisseur et de faible vitesse.

Pour les zones 2, 3 et 2-3, le plateau en accélération est large: plus de 0,6 sec. Ceci s'explique par le fait que les spectres utilisés pour arriver à ces formes simplifiées présentent parfois (comme dans le cas de la zone 3) un deuxième pic d'amplification bien marqué, dont il a bien fallu tenir compte (fig. 11).

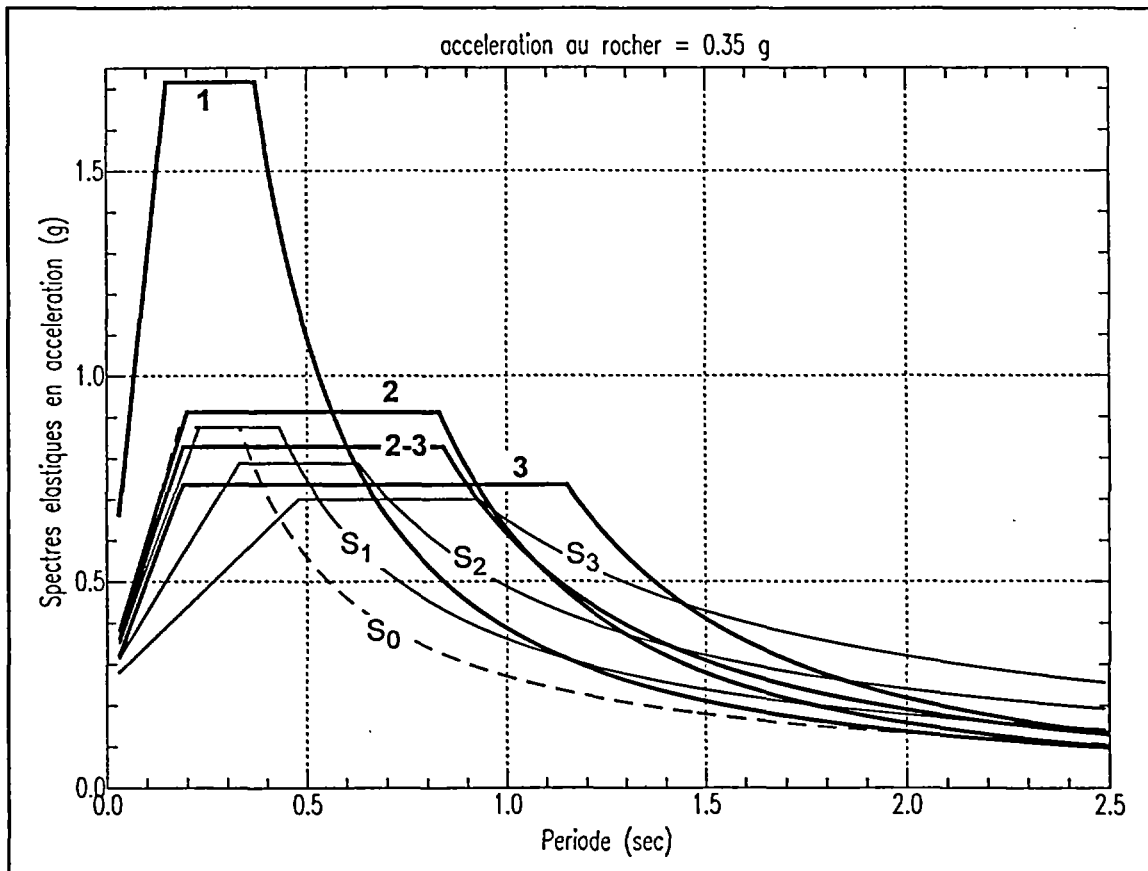
Les spectres de réponse obtenus pour une accélération maximale au rocher de 0.15 g et de 0.35 g sont représentés sur les figures 17 et 18. La différence entre les spectres calculés et les spectres PS 92 est plus marquée lorsque les niveaux d'accélération au rocher sont plus faibles : 0.15 g et 0.25 g. Ceci est lié à l'amplification du mouvement du sol à hautes fréquences qui est plus importante pour de faibles niveaux de sollicitation. Par contre pour  $a_R = 0.35$  g, les sols de la zone 3 désamplifient très légèrement le mouvement sismique à hautes fréquences ( $a_S = 0.34$  g).



*Fig. 16 - Comparaison entre les spectres de réponse élastiques obtenus pour chacune des 4 zones par les modélisations 1D (traits gras) avec ceux préconisés par les règles PS 92 pour les sites  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  (traits fins), (pour  $a_R = 0.25$  g).*



*Fig. 17 - Comparaison entre les spectres de réponse élastiques obtenus pour chacune des 4 zones par les modélisations 1D (traits gras) avec ceux préconisés par les PS 92 pour les sites S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub> (traits fins), (pour  $a_R = 0.15$  g).*

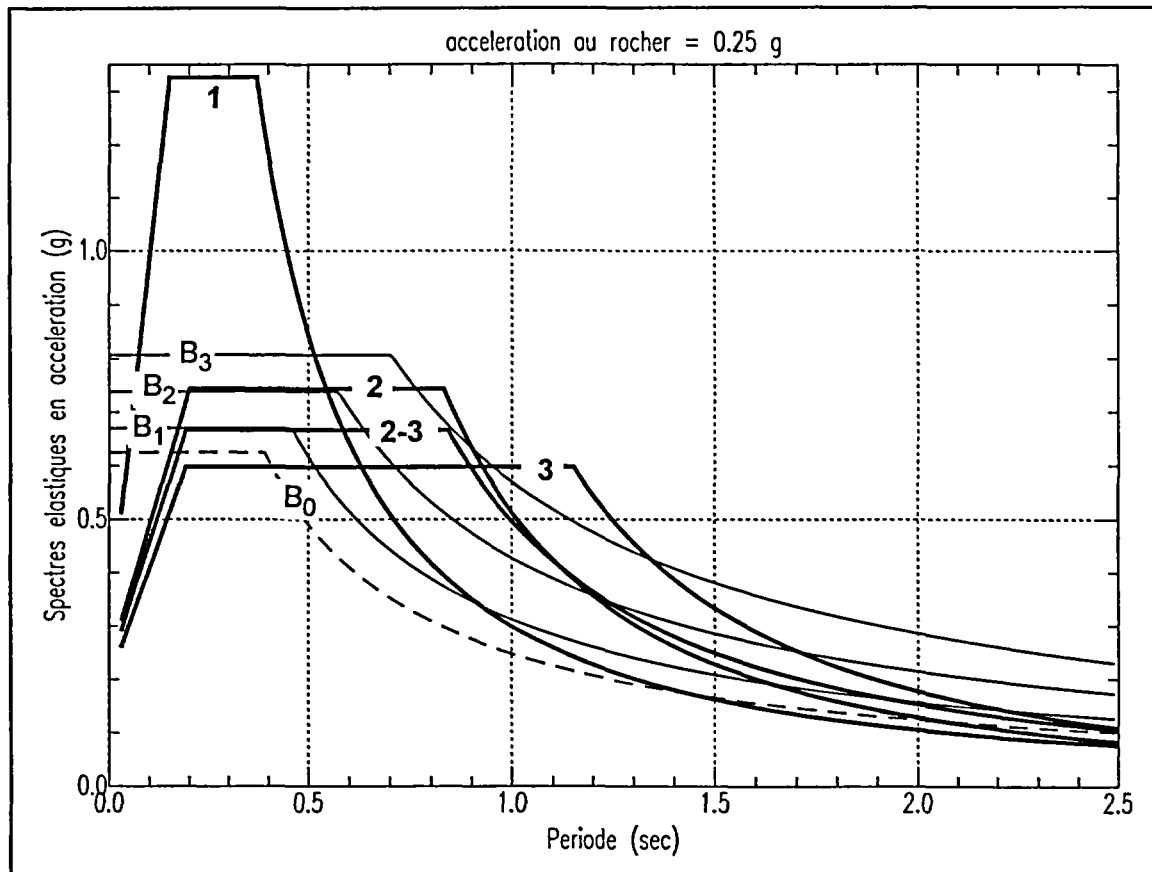


*Fig. 18 - Comparaison entre les spectres de réponse élastiques obtenus pour chacune des 4 zones par les modélisations 1D (traits gras) avec ceux préconisés par les PS 92 pour les sites S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub> (traits fins), (pour a<sub>R</sub> = 0.35 g).*

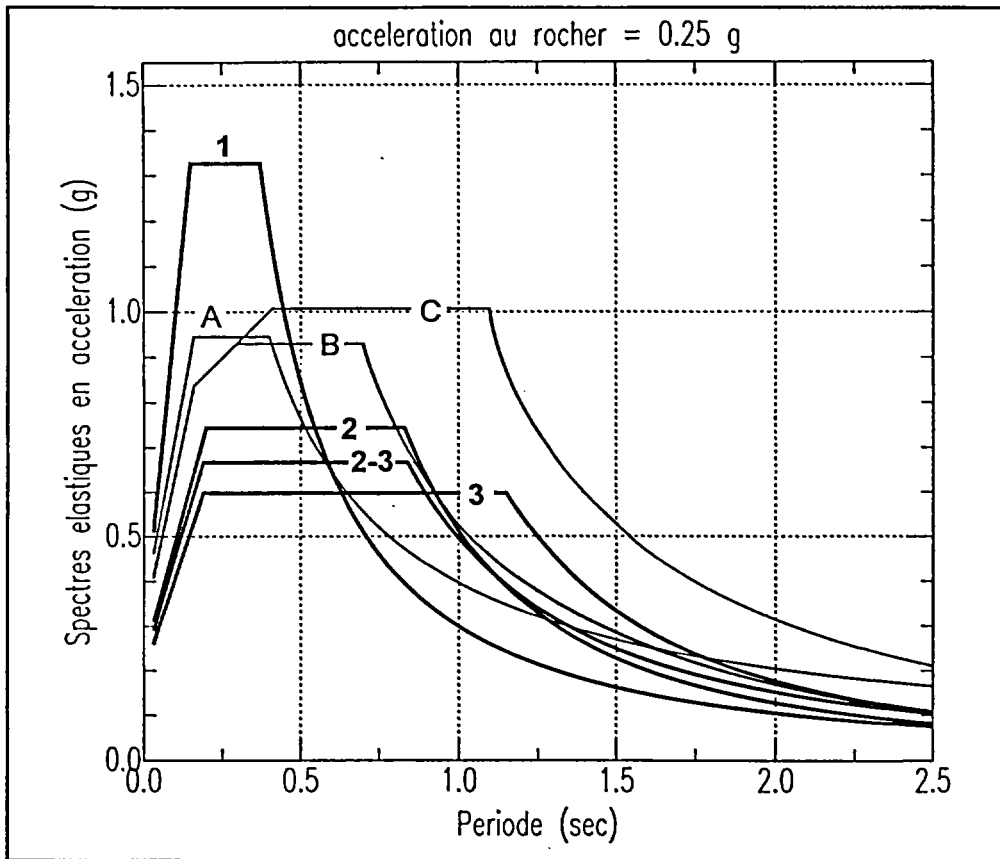
Les récents travaux de Borchardt (1994) et de Dickenson & Seed (1996) sont actuellement en train de faire évoluer la réglementation parasismique aux Etats-Unis. Ces auteurs proposent des modifications des spectres de dimensionnement, basées sur l'analyse d'enregistrements de mouvements forts acquis lors des derniers tremblements de terre (Mexico, 1985 ; Loma Prieta, 1989 ; Northridge, 1994 ; Kobe, 1995). Les spectres obtenus sur les deux (ou trois) zones de la commune de Nice, sont comparés sur les figures 19 et 20 respectivement, aux spectres préconisés par Borchardt (1994) et Dickenson & Seed (1996), pour des classes de site ayant des caractéristiques mécaniques comparables à celles de nos zones 1 à 3. Nos résultats, qui vont dans le sens d'une réévaluation à la hausse des niveaux spectraux, sont de ce point de vue compatibles avec les nouveaux spectres réglementaires américains.

Les calculs des mouvements sismiques de référence ont été réalisés sur la zone pilote du centre de Nice. Ils sont applicables à l'ensemble du zonage de la commune de Nice présenté sur la carte de la planche hors-texte n° 6.

La généralisation des mesures et des analyses du bruit de fond ambiant à l'ensemble de la zone d'étude, ainsi que l'exploitation des résultats de modélisations 1D et 2D, permettraient à la fois de préciser les limites du zonage des effets de site, et d'affiner la détermination des mouvements sismiques sur la ville de Nice.



**Fig. 19 - Comparaison entre les spectres de réponse élastiques obtenus pour chacune des 4 zones par les modélisations 1D (traits gras) avec ceux préconisés par Borchardt (1994) pour des sites de caractéristiques mécaniques comparables  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  (traits fins), (pour  $a_R = \dot{a}.25$  g).**



**Fig. 20 - Comparaison entre les spectres de réponse élastiques obtenus pour chacune des 4 zones par les modélisations 1D (traits gras) avec ceux préconisés par Dickenson & Seed (1996) pour des sites de caractéristiques mécaniques comparables A, B, C (traits fins), (pour  $a_R = \dot{a}.25$  g).**

## 8. Conclusions et bilan

L'évaluation de l'aléa sismique local sur la ville de Nice a été menée en 1996 dans le cadre du programme " GEMITIS " : elle est transcrite ici sous la forme d'un microzonage sismique de l'ensemble du territoire communal.

Ce microzonage constitue une opération méthodologique pilote destinée à préparer des scénarios de risque sismique pour la ville de Nice, et à appuyer ainsi l'élaboration d'une politique de prévention.

L'objectif de cette étude est en fait de réaliser une évaluation globale et simplifiée des aléas sismique et mouvements de terrain. Compte tenu de l'importance accordée à cette approche par la puissance publique, le parti a été pris de ne réaliser qu'une étude de niveau A (au sens du guide méthodologique des microzonages sismiques de l'AFPS).

Les résultats présentés ici sont donc insuffisants pour établir des prescriptions réglementaires opposables aux tiers, pouvant être incluses dans un PPR et dans un POS. L'établissement d'un PPR à partir de cette étude nécessitera des études détaillées complémentaires à 1/5 000.

Au-delà de la ville de Nice, cette approche méthodologique est destinée à être étendue à d'autres villes de moyenne importance sur le pourtour du bassin méditerranéen.

### 8.1. RESULTATS ANTERIEURS UTILISES

Cette évaluation de l'aléa sismique local de Nice s'est appuyée sur les résultats des études préliminaires réalisées en 1995 et durant les années précédentes, qui ont en particulier concerné des approches à deux niveaux :

→ **l'évaluation de l'aléa sismique régional**, à travers l'analyse du contexte sismotectonique (des Alpes du Sud en général, puis de la ville de Nice en particulier), puis l'individualisation des mouvements sismiques de références à prendre en compte pour la ville de Nice.

Cette première évaluation a montré que la ville de Nice, située à la limite des domaines des Alpes externes et de la Provence orientale, est en particulier traversée par l'important accident de Saint-Blaise - Aspremont, auquel est associé le séisme de référence, daté du 15 février 1644, d'intensité épiscopale VIII et de magnitude 5.6. Ce séisme de référence se situe dans l'arrière-pays niçois, à une trentaine de kilomètres au Nord de la ville.

→ l'évaluation de l'aléa sismique local sur un site pilote situé dans le centre-ville de Nice : le quartier des Musiciens. Cette évaluation préliminaire a été établie sur la base :

- d'un modèle géotechnique en 3 dimensions,
- de l'évaluation des " effets de site " lithologiques et topographiques, et de leur microzonage,
- de l'évaluation des phénomènes de liquéfaction potentielle des sols.

## 8.2. RESULTATS ACQUIS

La description, l'analyse, puis la présentation synthétique de l'environnement physique du sol et du sous-sol de Nice (topographie, caractéristiques géologiques et géotechniques des alluvions et des roches, contexte hydrogéologique) [planches hors-texte n° 1 et 2], ont été couplées à une modélisation monodimensionnelle de réponse sismique des sols (modèle " SHAKE "), calée par les résultats des enregistrements du bruit de fond sismique.

Ces approches font ressortir que les manifestations en surface d'un séisme se produisant dans la région de Nice pourraient avoir des effets directs et des effets induits sur le milieu naturel et le milieu construit, avec bien évidemment des conséquences secondaires pour la population, la vie économique et sociale.

### 8.2.1. Les effets directs

Ils concernent essentiellement les " effets de site ", c'est-à-dire l'amplification locale de la vibration du sol par des conditions locales particulières :

- **une topographie marquée**, lorsque l'on a de forts reliefs ou des falaises. Ceci est en particulier le cas pour les reliefs calcaires du centre-ville (le château, ...), pour les corniches calcaires à l'Est vers Villefranche (Mt Boron, Mt Gros, ...), dans les collines du Nord de la ville.

Les zones pouvant être soumises à des effets de site topographiques ont été cartographiées à l'échelle 1/25 000, et sont présentées dans la planche hors-texte n° 3.

- **des terrains peu consolidés**, lorsque l'on a des alluvions, en particulier. Une grande partie de la ville de Nice est construite sur d'anciennes vallées alluviales (centre-ville, le Paillon, le Var, ainsi que des petits vallons encaissés tel que le vallon de Magnan).

L'épaisseur des alluvions variant rapidement de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres (carte de la planche hors-texte n° 5), les effets de site lithologiques vont pouvoir induire des variations importantes des dommages d'un quartier à un autre de la ville (sur les structures des bâtiments, les canalisations et les réseaux enterrés, ...).

Ces variations d'amplitude des ondes sismiques (selon les secteurs de la ville), du fait de la nature du sous-sol, sont traduites sous la forme d'une carte de microzonage des effets de site lithologiques dans la planche hors-texte n° 6 (à 1/25 000).

Les quatre classes de sites lithologiques ( $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ) définies pour Nice selon les règles PS 92, induiront une modulation dans l'application des règles de construction parasismique des ouvrages à risque normal<sup>4</sup> (bâtiments à usage individuel ou collectif). L'application de ces règles est avant tout sous la responsabilité de la commune (au niveau des permis de construire) et/ou de l'Etat.

Toutefois, au cours de ce microzonage sismique, la distinction entre les zones  $S_2$  et  $S_3$  n'a pas été possible pour toute la commune à partir du calcul des spectres de réponse<sup>5</sup>. Les zones  $S_2$  et  $S_3$  ont été regroupées en une seule zone  $S_{2-3}$  pour l'ensemble de la commune (planche hors-texte n° 6). C'est seulement pour la zone du centre-ville que les quatre classes de sites ( $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ) ont pu être distinguées et font l'objet d'un cartouche cartographique particulier (planche hors-texte n° 7).

Compte tenu des spécificités du sous-sol de Nice, il conviendra d'utiliser, pour l'application des règles de construction parasismique, les spectres de réponse élastiques des sols calculés dans cette étude, plutôt que les spectres PS 92 qui ont une valeur réglementaire générale.

Pour la zone du centre-ville (planche hors-texte n° 7), ce sont les résultats de l'étude spécifique de ce secteur qu'il convient de conserver (Bour *et al.*, 1994).

Signalons enfin, pour clore le volet des effets directs des séismes, que la rupture éventuelle d'une faille jusqu'en surface semble très peu probable. En effet, aucune faille active passant par la ville de Nice n'est identifiée à ce jour. Les seules interprétations sur les ramifications de failles sismogènes éventuelles, indiquent des tracés de failles passant sous les épaisses formations alluviales du Var (terrasses alluviales) et ne semblent pas, dans ces conditions, pouvoir rejouer jusqu'en surface de manière significative.

### 8.2.2. Les effets induits

Un séisme survenant dans la région de Nice pourrait également induire deux types de phénomènes pouvant provoquer des dommages sur les constructions, les réseaux :

- des mouvements de terrain (éboulements, écroulements, glissements, ...) déclenchés par les secousses sismiques. Les zones sensibles à ces mouvements ont été cartographiées sur la planche hors-texte n° 8 ;

---

<sup>4</sup> Arrêté du 16 juillet 1992.

<sup>5</sup> Les spectres de réponse élastiques  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  ont été obtenus sur la zone de Nice pour une accélération au rocher de 0,25 g, par le calcul du modèle "SHAKE" d'une part, et par déduction des mesures du bruit de fond sismique d'autre part.

- la **liquéfaction des sols**, intervenant dans le cas de sols peu compacts situés sous le niveau d'une nappe phréatique (exemple : sables), ces sols pouvant se transformer en boue liquide et provoquer alors soit un tassement généralisé du sol, soit des pertes de portance de fondations de bâtiments, d'où un affaissement des constructions. C'est essentiellement au niveau des parties des vallées du Var et du Paillon saturées en eau, et surtout pour les sites de type  $S_2$  et  $S_3$  dans ces deux vallées, que de tels phénomènes pourraient se produire.

Les potentialités de liquéfaction devront être envisagées localement, au cas par cas, en fonction des caractéristiques géotechniques des sols. Les secteurs susceptibles de présenter de la liquéfaction se déduisent de l'analyse des cartes hydrogéologiques (planche hors-texte n° 2) et du zonage de l'aléa sismique dans les alluvions (planche hors-texte n° 6).

### 8.3. BILAN

Nice, ville de 343 000 habitants du pourtour méditerranéen, est soumise à une sismicité moyenne due au rejeu périodique de failles actives liées aux mouvements de la chaîne des Alpes : plusieurs séismes historiques d'intensité VIII (1498, 1618, 1644 <sup>6</sup>) paraissent associés au rejeu décrochant de la faille Saint-Blaise - Aspremont qui concerne la commune. D'après les caractéristiques sismotectoniques régionales, Nice a été classée en **zone II** dans le zonage sismique de la France (décret du 14 mai 1991), ce qui oblige à l'application des règles de construction parasismique <sup>7</sup> pour toute construction nouvelle de classe B, C et D.

Le **microzonage sismique** réalisé sur l'ensemble de la commune au cours de cette étude méthodologique, met en évidence des variations d'amplitude importantes des ondes sismiques selon les quartiers de la ville. En effet, certaines caractéristiques des sols (vallées alluviales épaisses) ou de la topographie (arêtes, rebords de pentes) sont susceptibles d'induire des " effets de site " lithologiques et topographiques. Les effets de site dans la ville de Nice pourraient donc entraîner des **variations importantes des effets destructeurs d'un même séisme d'un quartier à l'autre**.

Les cartes de zonage des effets de site (à 1/25 000) proposent une présentation des variations de l'exposition aux effets d'un séisme des divers quartiers de la ville. Cette approche globale et simplifiée à 1/25 000 permettra d'orienter des études plus détaillées à 1/5 000 pour l'établissement d'un PPR.

Par ailleurs, les effets induits par un séisme pourraient déclencher deux types de phénomène : des mouvements de terrain et une liquéfaction de certains sols, que l'on regroupe sous le terme " d'effets induits ". Les susceptibilités des terrains à ces effets induits sont exposées dans des cartes à 1/25 000.

<sup>6</sup> Le séisme du 15 février 1644 (intensité épiscopale : VIII) est le séisme de référence (séisme maximum connu) qui permet de caractériser le " Séisme Maximal Historiquement Vraisemblable " (SMHV) susceptible de se produire en n'importe quel point de la ville de Nice et de ses environs.

<sup>7</sup> Règles de construction définies par l'arrêté ministériel du 16 juillet 1992.

## Bibliographie

- AFNOR (1995) - Règles de construction parasismique : règles PS applicables aux bâtiments, dites règles PS92. AFNOR, Paris, norme française NF P 06-013
- Association Française du Génie Parasismique (1990) - Recommandations AFPS 90 pour la rédaction de règles relatives aux ouvrages et installations à réaliser dans les régions sujettes aux séismes. Presses des Ponts et Chaussées, Paris.
- Association Française du Génie Parasismique (1993) - Guide méthodologique pour la réalisation d'études de microzonage sismique. AFPS, St-Rémy-lès-Chevreuse.
- Bard P.Y., Bour M., Duval A.M., Godefroy P., Martin C., Meneroud J.P., Mouroux P., Terrier M., Thibault C., Velkov P., Vidal S. (1995) - Méthodologie de zonage sismique pour la ville de Nice : état d'avancement. *In* : Proc. 5th International Conference on Seismic Zonation, October 17-18-19, 1995, Nice (France), Nantes : Ouest Editions Presses académiques, vol. 3, p. 1749-1784.
- Blès J.L., Sauret B., Godefroy P., Martin C., Lambert J. (1992) - Contribution à l'étude des dangers d'installations industrielles à risque spécial de la région Rhône-Alpes : évaluation déterministe de l'aléa sismique. Rap. BRGM, n° R33623 GEO SGN 92.
- Borcherdt R.D. (1994) - Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). *Earthquake Spectra*, vol. 10, p. 617-653.
- Bordes M. (1976) - Histoire de Nice et du pays niçois. Ed. Privat, 490 p.
- Bour M., Mouroux P., Terrier M. avec la coll. de Duval A.M., Meneroud J.P. (1994) - Convention n°17/94 relative à la Décennie internationale de la prévention des catastrophes naturelles. Programme DIPC/N Méditerranée - Projet GEMITIS/Nice (1993/1996) : rapport 2ème année. Rap. BRGM, n° R38241.
- BRGM (1993) - TGV-Méditerranée. prise en compte de l'aléa sismique. Aléa sismique régional. Vol. 1 : Définition des mouvements sismique de référence au rocher horizontal. Vol. 2 : Pré-zonage géotechnique. Rap. BRGM, n° R37528, juin et octobre 1993.
- Dauphine A. (1990) - Nice, une cité euroméditerranéenne. Ed. Serre, Nice, 198 p.
- Dickenson S.E., Seed R.B. (1996) - Nonlinear dynamic response of soft and deep cohesive soil deposits. Proc. Int. Workshop on site response subjected to strong earthquake motions, Yokosuka, Japan, vol. 2, p. 67-81.

- Gounon A., Cairon D. (1991) - Ville de Nice Services techniques. Plan d'occupation des sols. Carte des risques naturels : éboulements, effondrements, glissements. Aptitude à la construction. Rap. BRGM, n° R34133 PAC 4S 91.
- Gravost M. (1986) - Synthèse hydrogéologique de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Quantité-Qualité. Etat des connaissances en 1985 : fiches synthétiques et fiches cartographiques. Rap. BRGM, n° 86 SGN 255 PAC.
- Idriss I.M., Sun J.I. (1992) - User's manual for SHAKE91. Department of Civil & Environmental Engineering, Univ. California, Davis, California.
- Iwasaki T. (1986) - Soil liquefaction studies in Japan : state-of-the-art. *Soil. Dynamics and Earthquake Engng.*, vol. 5, n° 1, p. 2-68.
- Iwasaki T., Tokida K., Tatsuoka F., Watanabe S., Yasuda S., Sato H. (1982) - Microzonation for soil liquefaction using simplified methods. Proc. 3rd Int. Earthquake Microzonation Conf., Seattle, 3, p. 1319-1330.
- Regine Group (1991) - Proposal for a classification of fault activity in an intraplate collision setting : definition and examples. *Tectonophysics*, 194, p. 279-293.
- Ritz J.F. (1991) - Evolution du champ de contraintes dans les Alpes du Sud depuis la fin de l'Oligocène : implications sismotectoniques. Thèse Doct., Univ. Montpellier II, USTL, 21 avril 1991, 187 p.
- Rosset P. (1994) - Simulation de mouvements forts du sol sur le centre de Nice (Alpes-Maritimes). Rap. BRGM, n° R37893.
- Rosset P., Terrier M., Meneroud J.P., Mouroux P. (1993) - Convention n°2/93 relative à la Décennie internationale de la prévention des catastrophes naturelles. Programme DIPCN / Méditerranée - Projet GEMITIS (1993-1996) : rapport 1ère année. Rap. BRGM, n° R37853.
- Schnabel P.B., Lysmer J., Seed H.B. (1972) - SHAKE : a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Earthquake Engineering Research Center, Univ. California, Berkeley, Report n° EERC 72-12.
- Seed H.B., Idriss I.M., Arango J. (1983) - Evaluation of liquefaction potential using field performance data. *J. Geotechn. Engng., ASCE*, vol. 109, n° 3, p. 458-482.
- Seed H.B., Tokimatsu K., Harder L.F., Chung R.M. (1984) - The influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluation. *Univ. California, Berkeley, EERC report*, vol. 84/15.
- Stieltjes et al. (1995) - Guide de gestion des risques géologiques. Guide technique : guide sismique. Rap. BRGM, n°R38197.

**BRGM**  
**SERVICE GEOLOGIQUE NATIONAL**  
**Département Utilisation et Protection de l'Espace Géologique**  
BP 167 - 13276 MARSEILLE Cedex 9 - France - Tél. : (33) 04 91 17 74 74