

PASSERELLE :
UN LIEN ENTRE LA RECHERCHE ET LA GESTION DU RISQUE SISMIQUE ET GRAVITAIRE
DANS LES ALPES MARITIMES

Cahier de suivi N° 3 des actions de recherche - Octobre 2006

Ce troisième cahier de suivi des actions de recherche entreprises dans le cadre du projet PASSERELLE doit permettre à chacun d'avoir une vision rapide des derniers résultats obtenus dans chacun des volets du projet. Comme pour les autres cahiers de suivi, les résultats seront présentés dans chaque axe.

B.1 Détection et imagerie des zones actives

(Coordination : Bertrand Delouis et Christophe Larroque)

Les travaux de terrain ont permis de mettre en évidence une anomalie morphologique parallèle à la branche du Var orientée N30E. Cette anomalie morphologique (figure 1) correspond à une faille qui a été partiellement identifiée sur le terrain (voir le cahier de suivi d'octobre 2005).



Figure 1 : Carte géologique de la moyenne vallée du Var : la trace en surface de l'anomalie morphologique du vallon de Saint Sauveur-Donaréo est indiquée par les triangle noirs. Le tracé de l'expérience de tomographie électrique est en vert et va du fond du vallon de Roguez jusqu'à la nécropole.

L'objectif que nous nous sommes fixés dans la dernière phase du projet PASSERELLE est d'obtenir une image en profondeur de cette faille afin de déterminer sa géométrie qui est un des paramètres majeurs de l'aléa sismique. Pour cela nous avons réalisé une expérience de tomographie électrique au mois de mai 2006 (Figure 1) : Quatre profils successifs ont été réalisés et permettent d'avoir une image de 960 m de long (figure 2).

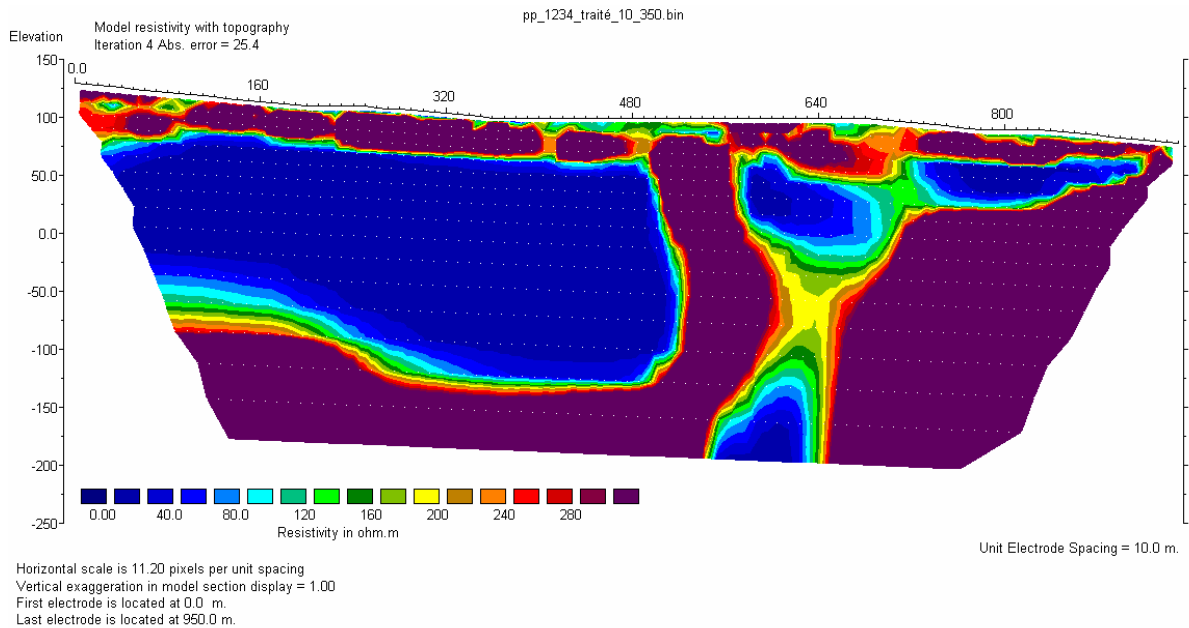


Figure 2 : Résultats préliminaires de l'expérience de tomographie électrique recoupant la faille de Saint Sauveur-Donaréo. La coupe fait 960 m d'extension horizontale et 200 m d'extension en profondeur. Les couleurs sont fonction de la conductivité électrique des couches géologiques (du bleu : forte conductivité, au violet : faible conductivité). Au point 640, on observe une structure verticale à forte conductivité qui est certainement la trace de la faille à l'origine de l'anomalie morphologique.

Les résultats préliminaires font apparaître l'existence d'une structure verticale suivant la direction de l'anomalie repérée. Cette structure qui est très probablement la faille recherchée est visible jusqu'à 200 m de profondeur qui est la limite de pénétration du dispositif employé.

En tenant compte de la géologie, il semble possible de différencier certaines formations au moins la formation de marnes pliocène présentant la résistivité la moins forte et les calcaires jurassiques présentant les résistivités les plus élevées. Les poudingues semblent avoir une résistivité beaucoup plus forte que les marnes et que les alluvions.

On peut proposer la coupe géologique suivante (attention : cette coupe interprétative est un document de travail et en aucun cas un résultat établi) :

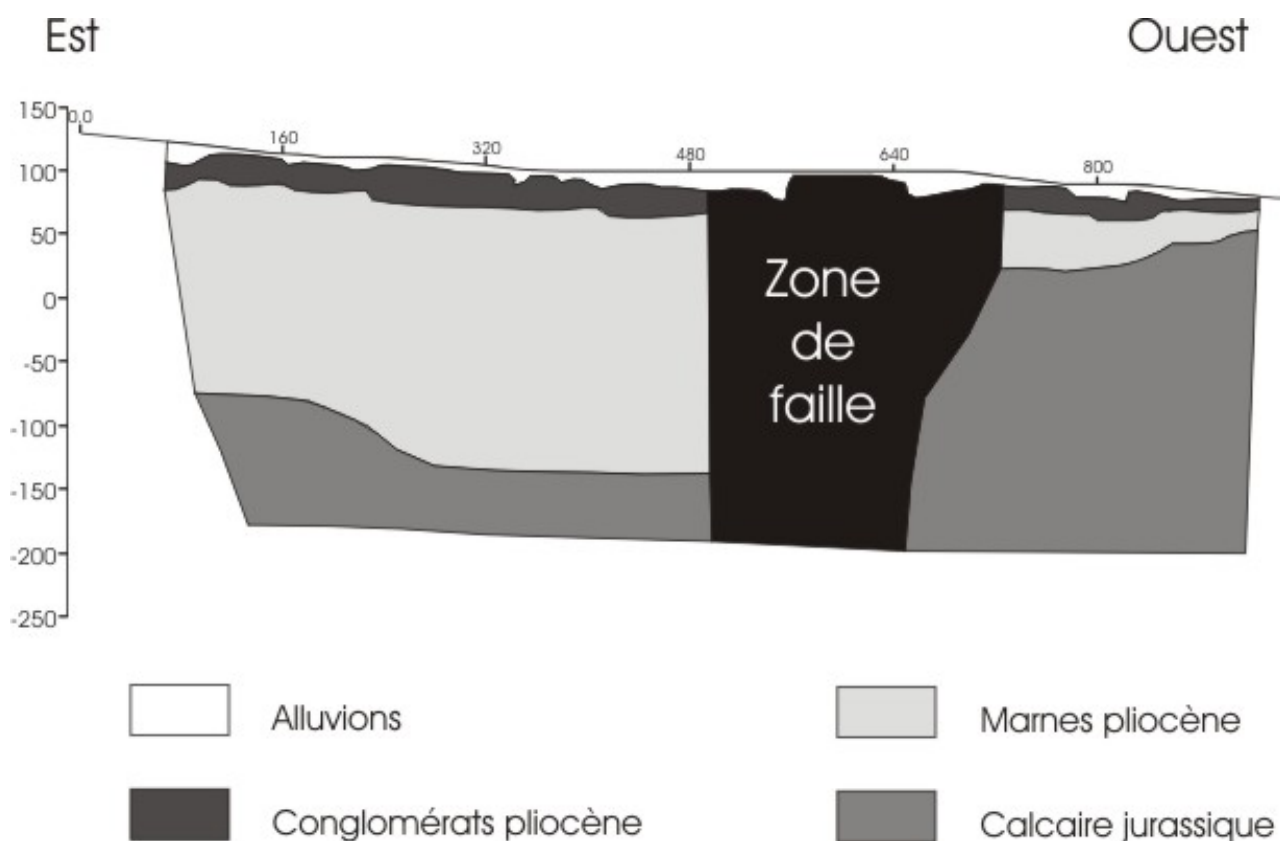


Figure 3 : Coupe interprétative préliminaire

Sur la coupe proposée (Figure 3), la zone perturbée qui pourrait correspondre à la zone de faille que nous recherchons se trouve bien dans l'axe du vallon de Donaréo (vallon NNE-SSW souligné sur la figure 1 par des triangles noirs) et le pendage attendu est bien celui d'une structure verticale affectant les formations pliocènes.

La zone fracturée semble être couverte par quelques dizaines de mètres d'alluvions quaternaire. Le toit des calcaires jurassique serait décalé verticalement d'une centaine de mètre entre +50 dans le compartiment ouest et -100 dans le compartiment est.

Le résultat de ce travail (qui devra être finalisé et confirmé dans les mois qui viennent) fait apparaître la présence d'une faille active récemment (moins de 2 millions d'année) située à quelques kilomètres au nord ouest de Nice. Il est maintenant indispensable de caractériser le potentiel sismogénique de cette structure : peut-elle être la source de tremblements de terre dans le futur et si la réponse est oui, qu'elle pourrait être la magnitude de ces séismes potentiels.

B.2 Observation et enregistrement des séismes actuels

(Coordination : Anne Deschamps)

L'axe 2 du projet PASSERELLE concerne l'enregistrement des séismes actuels. La partie la plus importante de cet axe s'est déroulée comme convenu dans la première partie du projet où un réseau de 12 capteurs portables a été ajouté aux stations sismologiques permanentes en place. Ce réseau a enregistré durant 6 mois la microsismicité autour de la vallée du Var. Durant ces 6 mois, malheureusement, aucun séisme local n'a été enregistré. Seules les données de séismes régionaux et mondiaux seront exploitées pour tenter de mieux connaître la structure profonde de la croûte terrestre dans les Alpes Maritimes (voir une description de la campagne et de ses résultats dans le cahier de suivi numéro 2 d'octobre 2005).

Les stations du réseau temporaire n'étaient donc plus en place le 2 septembre 2006, lorsqu'un séisme de magnitude M_l 4.2 a ébranlé la partie est de notre département. Ce séisme est le plus fort enregistré dans notre département depuis l'événement du 25 février 2001 (magnitude 4.6) qui avait eu lieu à 25 km au large de Nice. Ce séisme a eu lieu en Italie dans la zone de faille de Saorge-Taggia bien connue pour son activité récente. Le séisme a été fortement ressenti dans la vallée de la Roya et dans la zone de Menton mais également dans la vallée de la Vésubie plus lointaine et dans la région de Nice (voir carte d'intensité du BCSF sous www.franceseisme.fr).

Ce séisme a été parfaitement enregistré par toutes les stations permanentes du réseau permanent des Alpes Maritimes (figure 4) et nous permet actuellement d'entreprendre de nouvelles études comme la comparaison avec les lois d'atténuation ou la simulation d'un séisme fort du côté italien (voir axe B4).

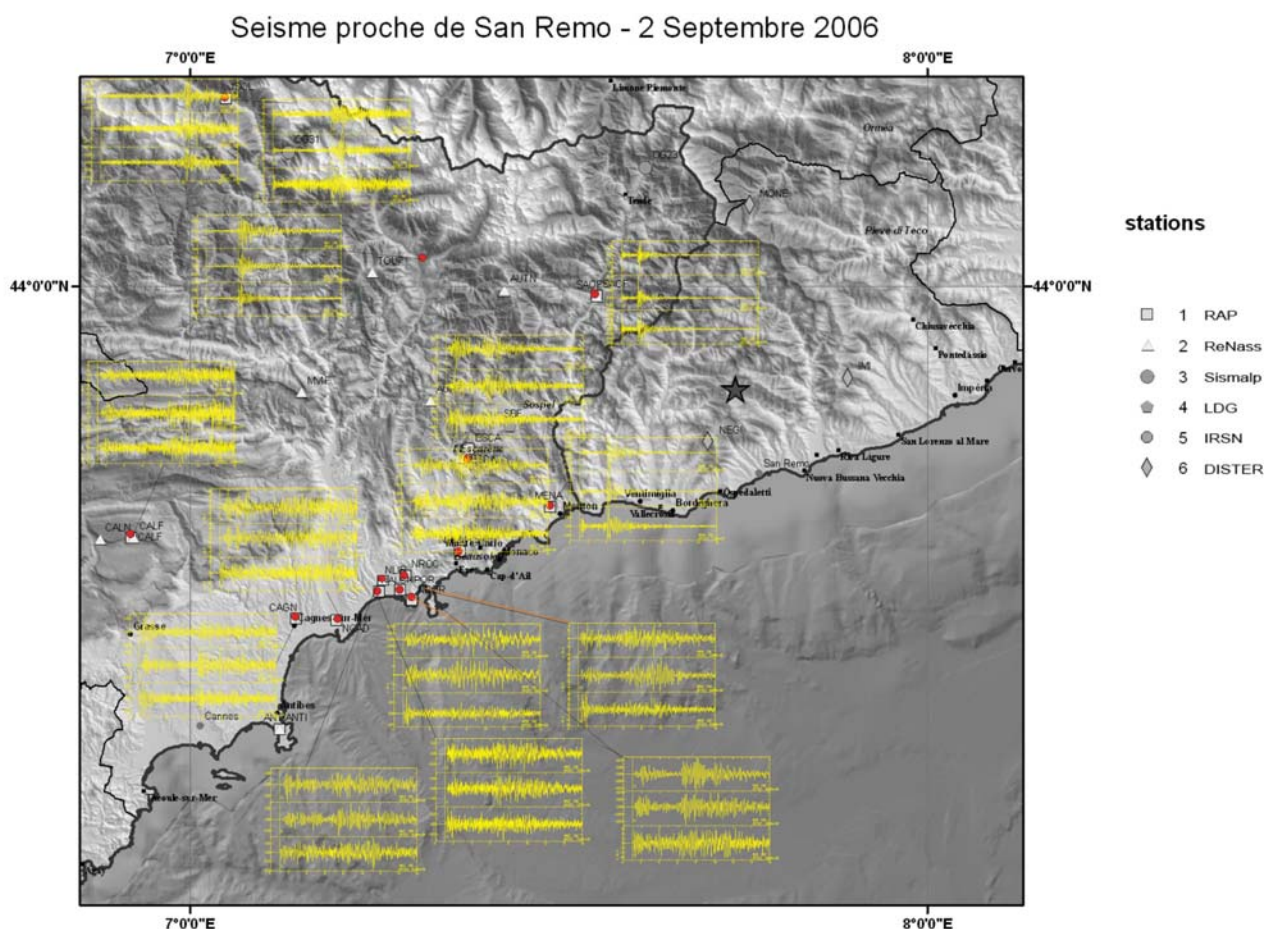


Figure 4 : Enregistrements accélérométriques du séisme du 2 septembre 2006 (M_l = 4.2 à Bordiguerra, Ligurie) sur les stations permanentes des Alpes Maritimes.

B.3 Effets de site

(Coordination : Etienne Bertrand)

Afin d'illustrer les effets de site liés aux conditions géotechniques, plusieurs méthodes ont été appliquées à la zone d'étude durant le projet PASSERELLE. Ces méthodes se basent sur l'enregistrement de vibrations ambiantes ou de séismes. Elles permettent de retrouver notamment les fréquences auxquelles le mouvement du sol peut être amplifié lors d'un séisme. Les méthodes utilisées présentent l'avantage d'être peu onéreuses et simples à mettre en œuvre.

Vibrations ambiantes :

Les méthodes mises en œuvre ici supposent un milieu à géométrie 1D, c'est à dire que les paramètres géomécaniques caractérisant le sol ne varient qu'avec la profondeur et que les couches sédimentaires sont planes et horizontales. Cette hypothèse de départ est assez éloignée de la réalité de la vallée du Var mais en première approximation elle reste cependant valable.

Dans un premier temps, le calcul des rapports spectraux H/V selon un profil d'enregistrement au travers de la vallée a montré que :

- **Les fréquences d'amplification varient au travers de la vallée. Cette variation est bien corrélée avec la variation de l'épaisseur des sédiments.**
- **Ces fréquences sont relativement hautes (entre 1,6 Hz et 8 Hz).**

L'enregistrement de bruit de fond en réseau a nécessité un traitement un peu plus complexe. A partir de l'enregistrement simultané des vibrations ambiantes sur plusieurs capteurs répartis régulièrement, il est possible de retrouver les paramètres mécaniques du sol (profil de vitesse de propagation des ondes de cisaillement) en inversant la courbe de dispersion qui caractérise la propagation des ondes de surface au travers du réseau. En effet, pour un profil de vitesse donné, ces ondes se propagent avec une vitesse différente selon leur fréquence. Généralement, plus la fréquence est élevée et plus les ondes de surface se propagent lentement. L'expérience menée dans la vallée du Var a permis de :

- **Préciser le protocole d'application de la méthode. Elle a notamment montré l'utilité de données à priori.**
- **Montrer que la vitesse de propagation des ondes S dans les sédiments grossiers du Var et de l'Estéron est assez élevée (590 m/s en moyenne).**
- **Estimer que l'épaisseur de sédiments au centre de la vallée est de l'ordre de la centaine de mètres.**

Enregistrements de séismes :

La méthode consiste à enregistrer des séismes en divers points de la zone d'étude et de comparer les enregistrements entre une station dite de référence et les stations situées sur des zones susceptibles d'amplifier le signal sismique. Cette méthode a l'avantage d'être directe mais demande un certain temps de mise en œuvre car nécessite un grand nombre d'événements. Ce qui est d'autant plus le cas dans les Alpes Maritimes du fait de la faible sismicité. Durant les deux ans du projet, nous avons enregistré en continu les séismes de la région mais aussi les télé-séismes provenant des quatre coins du monde. Ceux-ci pourront également être exploités dans d'autres projets à venir. La constitution de la base de donnée a été effectuée à la fin de la deuxième année du projet et son exploitation ne fait que débuter. Cependant les premières observations montrent de très nettes différences entre les enregistrements aux stations installées sur le rocher et les stations situées dans la vallée du Var. Comme on s'y attend, les signaux sont amplifiés dans la vallée par rapport à ceux obtenus sur le rocher affleurant.

Nous avons proposé dans PASSERELLE une première approche pour évaluer les effets de site liés au remplissage sédimentaire de la vallée du Var. Les études menées durant ces deux années ont montré que de tels effets existaient bien dans la vallée. Pour aller plus loin il faut désormais analyser plus finement l'influence de la géométrie 3D du bassin. L'exploitation complète des enregistrements de séisme pourrait aider à cela. Une analyse plus détaillée des enregistrements de bruit de fond, tel que la fréquence d'amplification selon la direction de propagation des ondes de surface, pourrait également apporter des informations supplémentaires. Finalement des modélisations numériques permettraient de confirmer nos observations et d'extrapoler ces effets à un séisme plus important.

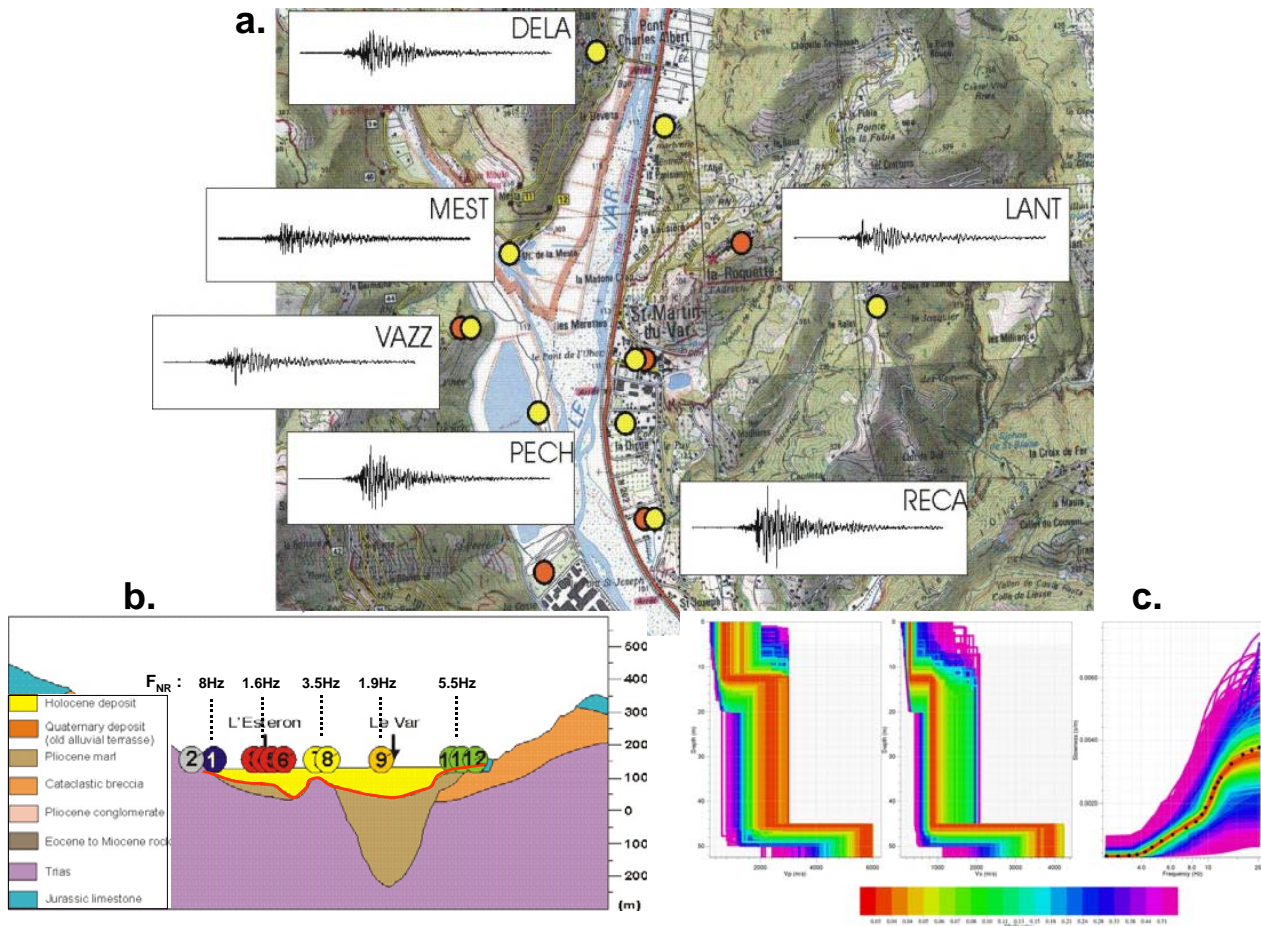


Figure 5 : Principaux résultats obtenus dans l'axe B3 :

- exemple d'un enregistrement de séisme (séisme du 20/12/2005, $M_I=3,5$ à Saint Sauveur sur Tinée), noter la différence d'amplitude entre la station LANT (au rocher) et les stations dans la vallée ;
- estimation de la fréquence de résonance au travers de la vallée à partir de la méthode H/V et comparaison avec une coupe interprétative (Guglielmi, 1993). Plus l'épaisseur des sédiments est grande, plus la fréquence d'amplification observée est basse ;
- profil de vitesse dans les alluvions déduit des enregistrements en réseau dans la vallée de l'Estéron (V_s moyen de 590 m/s ; profondeur du substratum rocheux : 47 m).

B.4 Simulation des mouvements du sol

(Coordination : Françoise Courboux)

Dans cette dernière partie du projet, nous avons travaillé principalement sur l'application des méthodes de simulation développées précédemment qui permettent à partir d'un séisme modéré de simuler un événement plus fort dans notre région. Ces valeurs ont été comparées aux normes parasismiques existantes. Notons que cette partie du projet est fortement liée aux actions entreprises au sein du groupement d'intérêt scientifique CURARE. Nous avons également testé les possibilités d'extrapolation de nos résultats sur les points de mesure existant vers des sites proches non instrumentés.

Notons que les très beaux enregistrements que nous avons obtenus du dernier séisme qui a eu lieu dans la région Ligure le 2 septembre 2006 nous ont permis de travailler sur un nouveau séisme de scénario non prévu dans le projet.

A l'aide du code de sommation de petits séismes (Kohrs-Sansorny et al, 2005) développé dans le laboratoire Géosciences Azur, nous avons réalisé trois scénarii sismiques (Figure 6) :

- Le séisme de Blausasc : séisme de magnitude 5.7 à terre à 15 km de la ville de Nice, simulé en utilisant le séisme du 19 décembre 2000 (M_w 3.4) comme Fonction de Green Empirique (FGE).
- Le séisme de Nice : séisme de magnitude 6.3 en mer à 30 km de la ville de Nice, simulé en utilisant le séisme du 25 février 2001 ($M_w=4.6$) comme FGE.
- Le séisme de San Remo : séisme de magnitude 6.2 à terre à 40 km de la ville de Nice, simulé en utilisant le séisme du 2 septembre 2006 ($M_w=4.2$) comme FGE.

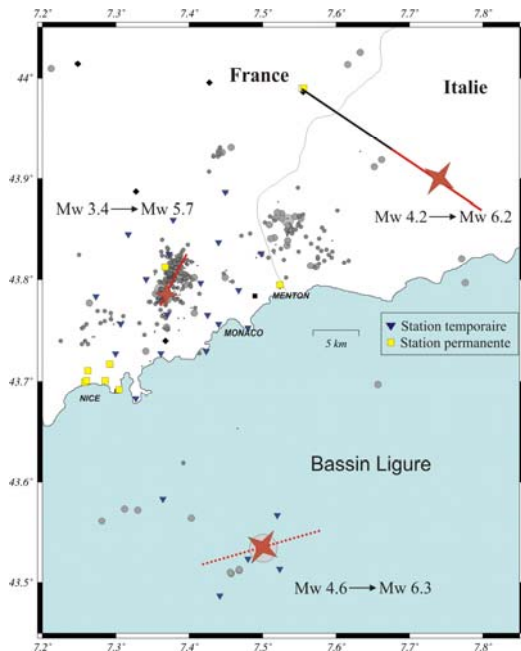


Figure 6 : Localisation des trois séismes de référence. Les points gris correspondent à la sismicité enregistrée durant les six mois de la campagne SALAM. Les traits rouges correspondent à la longueur de faille activée dans nos simulations.

Chaque simulation permet d'obtenir une multitude d'accélérogrammes correspondant à un séisme susceptible de générer des dégâts dans le département. A partir de ces données complètes, il est facile d'obtenir des cartes de PGA (accélération maximale du sol) ou de PGV (vitesse maximale du sol) en différents points du département. Notons que nous avons fait le choix de considérer que la chute de contrainte du petit et du gros séisme étaient identiques ce qui nous conduit à des estimations minimales du mouvement du sol attendu. Dans le cas d'un séisme réel, les valeurs pourraient être plus élevées. La figure 7 montre la répartition des PGA sur les différents points du département correspondant à un séisme de magnitude 6.2 qui aurait lieu sur la faille de Saorge-Taggia bien connue, proche de nos frontières. Dans ce cas de figure, les zones les plus proches de l'Italie seraient bien sûr les plus touchées. Les effets de site que nous avons étudiés avec d'autres scénarii sont toujours présents dans la ville de Nice et également dans la vieille ville de Cagnes sur Mer (château) où l'on soupçonne un effet de site dû à la topographie.

Séisme de San Remo
Carte de PGA en m/s²

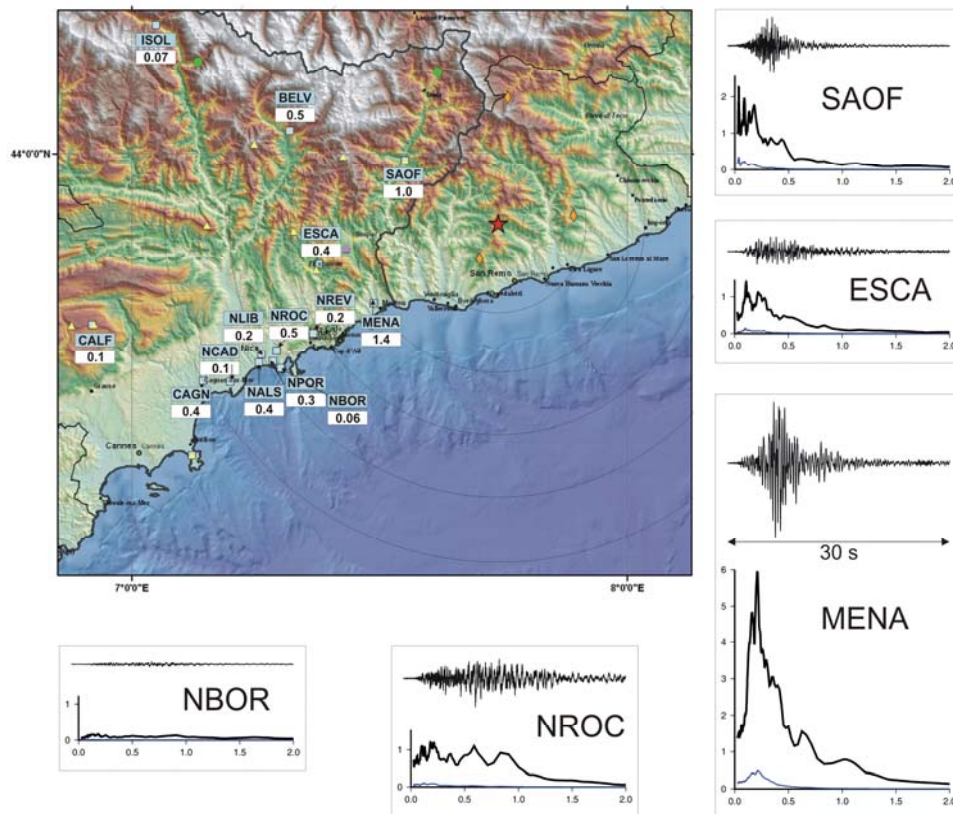


Figure 7 : Simulation des mouvements forts du sol produits par le séisme de San Remo. Pour chaque station du réseau RAP à Nice et à Menton sont représentés un accélérogramme correspondant à une réalisation « moyenne » et le spectre de réponse accélération-période moyen.

Comme cela était prévu dans le projet, nous avons ensuite utilisé le logiciel Cyberquake pour simuler les effets de site à une dimension dans la ville de Nice et les comparer aux résultats que nous obtenions (Figure 8). Le but de ce travail était de tester la validité d'une extrapolation de nos simulations vers des points du département non dotés de capteurs sismologiques. Les résultats sont assez clairs : ils montrent que dans le cas de site simples et bien connus, une modélisation à une dimension permet de rendre compte de la plupart des effets d'amplification observés, mais dans la majorité des cas (sites plus complexes et sous-sol mal connus), ces simulation sous-estiment fortement l'effet de site.

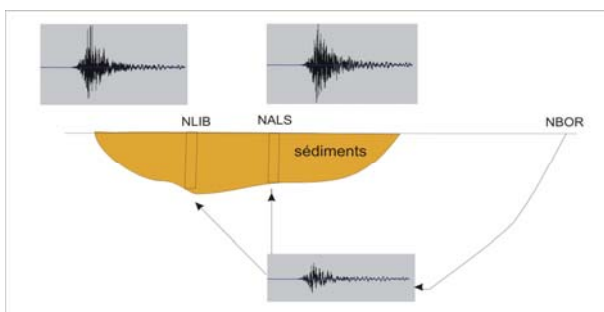


Figure 8: Principe de la modélisation utilisée. Le signal simulé à la station NBOR par la méthode de sommation des fonctions de Green empiriques est injecté à la base d'une colonne de sédiment représentant le sous-sol sous chaque station. L'effet de site 1D est calculé par une méthode linéaire simple.

Cette étude montre que si l'on souhaite obtenir des informations plus denses sur les mouvements du sol attendus il est nécessaire de déployer une instrumentation plus importante sur le terrain. Un projet de recherche en cours (ANR QSHA) a pour but de comparer également nos résultats à des simulations de la propagation des ondes en 3 dimensions.

B.5 Glissements de terrains

(Coordinateur : Thomas Lebourg)

Etude temporelle des variations de résistivité électriques et couplage avec des données hydrogéologiques sur le glissement de terrain du Pra de Julian (Vence 06).

Les méthodes de tomographie électrique que nous avons employées pour imager les structures géologiques et les limites du glissement de Vence (20052) ont été réemployées afin de rechercher les éventuelles variations d'eau dans le massif instable. Nous nous sommes concentrés sur la variabilité journalière des niveaux d'eau dans le sous sol, car c'est l'eau présente dans la masse géologique qui déclenche, accélère et favorise le mouvement du glissement de Vence.

La tomographie électrique mesure la résistivité en différents points du sous-sol, or les formations géologiques se distinguent par leur résistivité en fonction de leur nature (lithologie, porosité, compaction...) la composition et la teneur en eau qu'elles contiennent. Or, la teneur en eau est le seul facteur qui peut entraîner des variations de résistivité observables à l'échelle journalière, et même horaire, dans les formations perméables ou dans les zones où l'eau peut circuler (fractures ou surface de rupture).

Peut-on établir un couplage entre un modèle de variation temporelle de résistivité du sous-sol et sa teneur en eau ? Et surtout peut on associer au mouvement de terrain, une variable précurseur qui donne un signal « d'alarme » prérupturel : un niveau d'eau théorique d'instabilité vs un signal électrique ?

La solution envisagée pour répondre à la question dégagée par cette problématique a nécessité les moyens suivants :

- la mise en place d'une flûte électrique permanente de 24 électrodes et sur 120m de long,
- Des données hydrogéologiques : précipitations, variations des niveaux piézométriques.

Nous avons au cours de cette année obtenu de très nombreuses données de tomographie électrique et nous sommes encore dans une phase de traitement des données électriques. Actuellement nous essayons d'élaborer une chaîne de traitement automatique afin de pouvoir à distance traiter, interpréter, discuter les résultats au jour le jour.

Nous présentons ici le type de résultat obtenu qui nécessite encore des validations en terme de couplage hydrogéologique et pseudosection de résistivité.

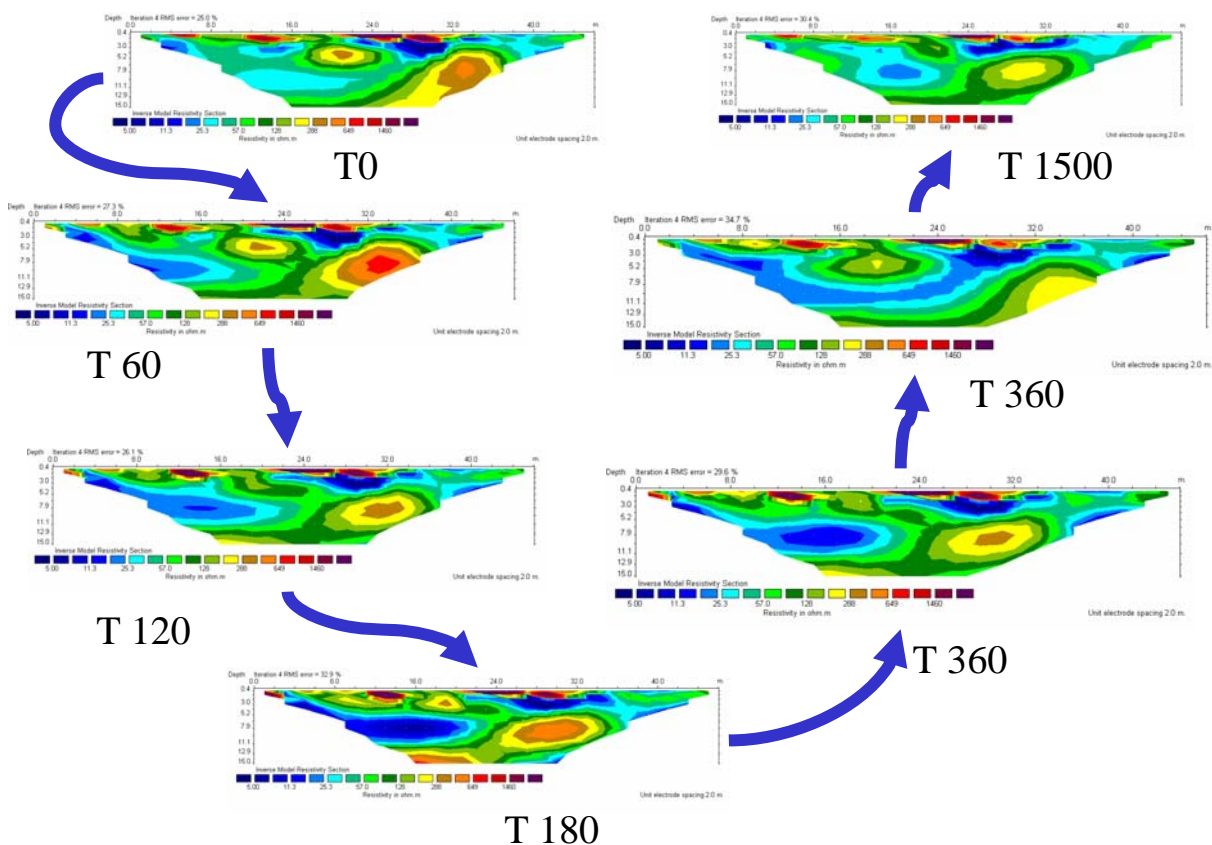


Figure 9 : Infiltration de l'eau dans le massif de Vence. Les temps sont en minutes et la couleur bleu correspond à l'eau s'infiltrant dans le glissement.

En conclusion, nous pouvons si nous prenons le temps et si nous investissons assez de moyen dans ce type d'expérience avoir un suivi quotidien, ainsi que les temps de transits de l'eau dans le massif et ainsi définir à un intervalle de confiance près le niveau d'eau critique précurseur du mouvement.

Contacts :

Responsables du projet

- Françoise Courboux : UMR Géosciences Azur 6526, CNRS, UNSA, UPMC, IRD, 250 av Einstein 06560 Valbonne, tel 04 92 94 26 12, télécopie : 04 92 94 26 10, mël : courboux@geoazur.unice.fr
- Anne-Marie Duval : CETE Méditerranée, ERA 06 « Risque Sismique » service « Risques Naturels et Géotechnique », 56 bd Stalingrad, 06300 Nice. Tel : 04 92 00 81 67, mël : anne-marie.duval@equipement.gouv.fr