

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

Cahier de suivi des actions de recherche (Octobre 2005)

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

Nous présentons pour chaque axe du projet de recherche les actions réalisées et les perspectives envisagées. Chaque paragraphe commencera par un encadré qui correspond aux actions de recherche et aux résultats escomptés, tels qu'ils ont été rédigés dans le projet.

B.1 Détection et imagerie des zones actives

(Coordination : Bertrand Delouis et Christophe Larroque)

Objectif : détecter de nouvelles failles susceptibles de générer un séisme

Actions de recherche :

Analyse géomorphologique à partir de :

- Travail de terrain
- Imagerie géophysique

Résultats escomptés :

- Etablir si les anomalies morphologiques observées au niveau de la basse vallée du Var témoignent effectivement de la présence de failles actives à prendre en compte pour l'évaluation de l'aléa sismique.
- Procéder à cette première étape indispensable de reconnaissance des failles actives de façon à préparer les études portant sur la quantification de leur potentiel sismogénique (magnitude maximale attendue, temps de récurrence, date du dernier séisme...).
- Imager les failles détectées par des techniques de géophysique de surface (géoradar, électrique).

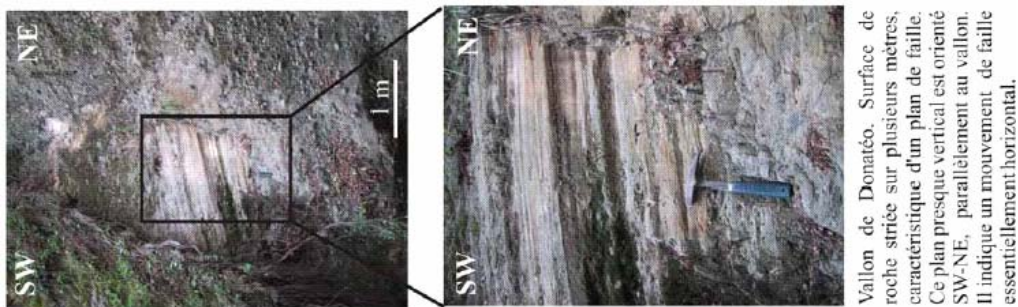
Etat d'avancement des actions de recherche

Les travaux réalisés durant la première phase de cet axe de recherche ont consisté essentiellement en **investigations de terrain** sur la rive gauche du Var, appuyées par **l'analyse de photos aériennes** de la région. L'objectif de ces investigations est la recherche d'indices de déformation et de fracturation dans les terrains conglomératiques relativement récents (Pliocène, c'est-à-dire âgés de quelques millions d'années). C'est au niveau de ces terrains que des anomalies de forme de relief avaient été repérées, anomalies suspectées être associées à la présence de failles ayant bougé à une époque relativement récente. Les surfaces exposées des conglomérats, telles que celles constituant les falaises au voisinage de la Nécropole de Nice, ou bien celles apparaissant le long des parois des ravins de St Sauveur, de Donaréo, de Lingostière, et de Magnan, ont été inspectées visuellement au cours de cinq journées passées sur le terrain.

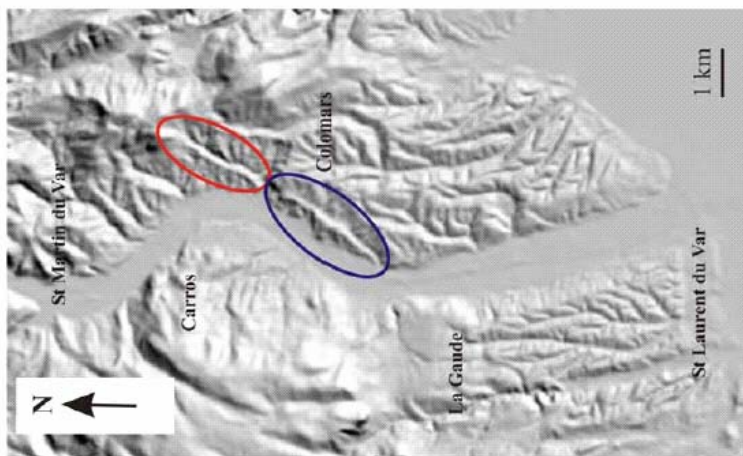
Une des premières conclusions que nous pouvons tirer de ces observations est la rareté des indices de fracturation dans les terrains conglomératiques. Il est toutefois à noter que certaines portions des vallons cités ne sont pas accessibles à l'observation géologique directe en raison de l'abondance de la végétation. Jusqu'à présent, les seuls indices du passage d'une faille ont été trouvés au niveau du vallon de Donaréo (voir Figure 1). Ce vallon, le plus étroit de la zone d'étude, présente des parois sub-verticales. On peut y observer de nombreuses fractures à peu près parallèles aux parois, ainsi qu'une assez forte proportion de galets fracturés. Des plans striés, témoignant d'un cisaillement de la roche, sont observables en plusieurs endroits au niveau de ces fractures. Le plus grand de ces plans striés est de taille pluri métrique (voir photos sur Figure 1), situé à proximité du Collet du Lingador (carte IGN

1/25000). Les mouvements de cisaillement sont majoritairement horizontaux, mais le sens de cisaillement (dextre ou senestre) n'est pas déterminé (manque de critères fiables observables).

Ces éléments viennent confirmer l'hypothèse de l'existence d'une faille, ou zone de faille, d'orientation NE-SW, localisée le long du vallon de Donaréo. Cette faille pourrait avoir joué un rôle dans le changement de direction du cours du Var qui présente à cet endroit un coude très marqué (au niveau de Carros, Castagniers, et Colomars).



Vallon de Donaréo. Surface de roche striée sur plusieurs mètres, caractéristique d'un plan de faille. Ce plan presque vertical est orienté SW-NE, parallèlement au vallon. Il indique un mouvement de faille essentiellement horizontal.



Représentation en ombrage du relief de la basse vallée du Var, secteur d'étude du projet PASSERELLE. Le vallon de St Sauveur est indiqué par l'ellipse bleue, le vallon de Donaréo par l'ellipse rouge. Les observations confirmant la présence d'une zone de faille sont situées dans le vallon de Donaréo qui coïncide avec le coude du Var.



Vallon de Donaréo, correspondant à un ravin extrêmement étroit présentant de nombreux indices confirmant la présence d'un "couloir" de faille: grandes fractures verticales, galets inclus dans la roche fracturés.

Figure 1 : Indices de faille active au niveau du vallon de Donaréo

Perspectives et difficultés

Ces investigations de terrain vont se poursuivre et nous allons définir les modalités de mise en œuvre des mesures géophysiques (profils électriques notamment) visant à détecter la présence de failles en profondeur. A l'heure actuelle, deux zones privilégiées sont considérées pour les campagnes de mesures géophysiques :

- 1) des profils NW-SE recoupant perpendiculairement le vallon de Donaréo,
- 2) des profils à peu près E-W recoupant le cours du Var, notamment la rive gauche (Est), entre La Gaude et St Laurent du Var.

Cette deuxième série de profils est motivée par la présence de terrasses alluviales soulevées sur la rive gauche. Une mission de reconnaissance visant à évaluer la faisabilité des profils géophysiques

considérés devrait avoir lieu à l'automne 2005. Parmi les difficultés à prévoir, notons la topographie très accidentée, localement quasi verticale, au niveau du Vallon de Donaréo, ainsi que la traversée du cours d'eau du Var.

B.2 Observation et enregistrement des séismes actuels

(Coordination : Anne Deschamps)

Objectif : Imager les failles actives en enregistrant la micro sismicité naturelle

Actions de recherche

- Déploiement d'une dizaine de stations temporaires pendant 6 mois
- Traitement des données (détection des événements sismiques, pointés, localisation).
- Discussion sur les données existantes pour caler le modèle de mouvement du sol proposé dans la partie B4 sur des données réelles.
- Discussion avec les opérationnels sur l'utilité d'avoir des mesures des mouvements du sol rapidement après un séisme ; il est important pour nous de connaître la marge d'incertitude et les délais de temps acceptables pour qu'un tel outil soit pertinent.

Résultats attendus :

- Carte de la microsismicité de la vallée du Var sur 6 mois.

Etat d'avancement des actions de recherche

Dans le cadre du programme PASSERELLE, nous avons réalisé entre septembre 2004 et Mai 2005 une **campagne sismologique d'observation temporaire dans la basse vallée du Var** baptisée PASIS en implantant des stations sismologiques complémentaires aux stations qui composent le réseau permanent d'observation. Ce réseau assurait la possibilité de détecter et de bien localiser les événements sismiques de faible magnitude qui pouvaient avoir lieu pendant cette période dans la région couverte par le réseau et donc d'améliorer sur cette zone la sensibilité du réseau permanent. Le dispositif installé de **13 stations** avec un enregistrement en continu du mouvement du sol pendant toute la période et un traitement *a posteriori*, permet de détecter des événements de magnitude 0 et localiser tout événement de magnitude 0,5 alors que le réseau permanent ne localise en général que les événements de magnitude 1,5. L'installation et la maintenance ont été assurées par l'équipe de Géosciences Azur ainsi que la validation des données et leur dépouillement.

Le matériel déployé, les contraintes d'installation : chaque station temporaire est composée d'un sismomètre 3 composantes qui doit être enterré pour assurer le meilleur couplage possible avec le sol, d'un enregistreur local du signal numérique et d'un récepteur GPS qui assure synchronisation du temps en chaque point avec le temps universel. L'ensemble de l'instrumentation doit être protégée des intempéries. Ce matériel fonctionne sur des batteries 12Volts qui peuvent être alimentées soit par un chargeur sur le secteur, soit par des panneaux solaires lorsque le secteur n'est pas disponible dans les environs. Ce matériel, pour détecter la microsismicité, doit être installé dans des zones tranquilles, hors des grands axes routiers et de l'activité humaine et si possible sur le rocher. Pour des raisons évidentes de sécurité du matériel nous recherchons des sites sur propriété closes. Pour la fiabilité de l'enregistrement pendant la période hivernale, nous avons limité au maximum l'utilisation des panneaux solaires et avons recherché des sites où le secteur était disponible à proximité.

La définition de la géométrie du réseau, recherche des sites : étant donné le nombre d'instruments disponibles, la localisation de l'accident recherché et la résolution que nous souhaitons pour la localisation d'éventuels événements dans la région étudiée, nous avons défini une maille du réseau d'environ 5km. Puis nous avons recherché des sites au droit de ces mailles en tenant compte des critères importants pour l'installation d'une station : bruit, géologie, sécurité. Une équipe de Géosciences Azur a passé dix jours sur le terrain pour faire la reconnaissance, prendre les contacts nécessaires à l'obtention des autorisations. Nous nous sommes le plus souvent adressés aux mairies les plus proches des zones préalablement choisies sur la carte ; nous avons toujours reçu un accueil favorable et souvent des indications précieuses pour trouver le site qui correspondait à notre requête que ce soit chez un particulier, sur un terrain ou dans un bâtiment communal.

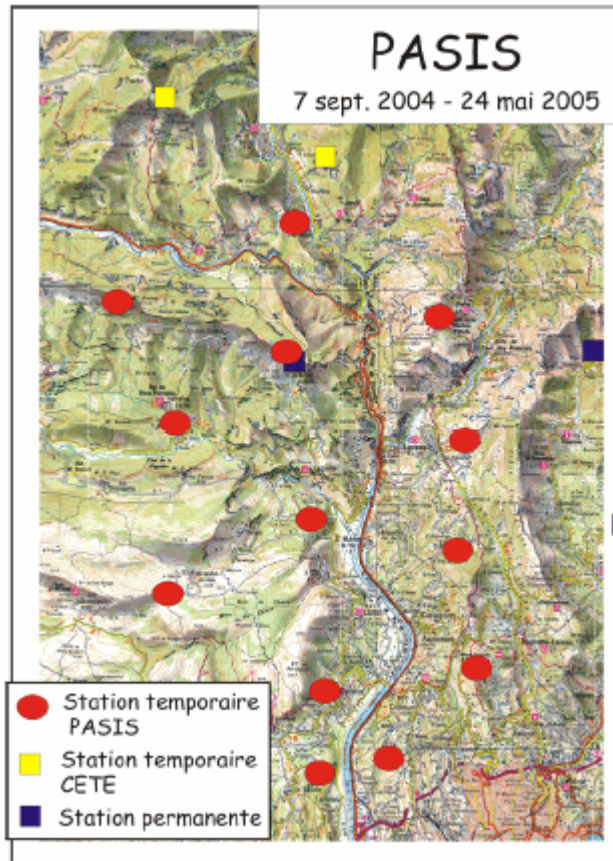


Figure 2 : Réseau de stations sismologiques installé durant 8 mois autour de la vallée du Var (campagne PASIS)

L'installation du réseau :

Une fois l'ensemble des sites choisis (première semaine de septembre), deux équipes de Géosciences Azur ont installé le matériel ; la mise en place du capteur pour une période de plus de 6 mois est un peu délicate car il faut à la fois assurer le couplage avec le sol et la protection contre l'humidité. La solution que nous avons adoptée, de faire une petite dalle en béton pour disposer le capteur au fond d'un bidon plastique enterré, a l'avantage d'être applicable sur presque tous les sites, mais prend un peu plus de temps. Elle permet aussi, là où les propriétaires y consentent, **de garder la trace de notre implantation ce qui est un atout au cas où nous aurions besoin de re-occuper le site en urgence**. Il faut ensuite agencer l'ensemble des composants de la station et de l'alimentation électrique en protégeant des intempéries (ou du passage des sangliers...) lorsque la station reste en extérieur. L'installation a été réalisée en une semaine (Figure 2). Pour chaque site une fiche a été constituée, comprenant non seulement le matériel installé et le mode de fonctionnement, mais aussi l'accès, la description géologique et les coordonnées des personnes à contacter en cas de problème ou de demande d'information. Ces documents sont des outils lors de la maintenance et de l'exploitation des données, mais aussi pour une intervention éventuelle au cas où nous aurions besoin de re-occuper les sites pour le suivi d'une crise sismique.

La maintenance :

Le réseau a été maintenu pendant **8 mois** sur le terrain. Une visite de chaque station a été effectuée chaque mois, sauf en février lors de la période de chute de neige importante, soit 6 fois 3 jours de travail pour 2 personnes de Géosciences Azur. Les visites régulières permettent de vérifier le bon état de marche des stations (en particulier l'état de l'alimentation électrique) et le changement du support d'enregistrement. Aussitôt les données au laboratoire, elles sont vérifiées pour détecter des pannes temporaires. Nous avons eu des pertes de plusieurs semaines de données sur certaines stations du fait de mauvaise alimentation électrique, de câbles sectionnés ou de dégradation du support d'enregistrement. Nous n'avons pas prévu la longue période de froid du mois de février (certaines stations étaient sur des points hauts comme le Mont Viale, la Madone d'Utelle ...) ; les batteries ont très mal fonctionné pendant cette période et nous n'avons pas eu la possibilité de modifier l'installation pour assurer le suivi de l'enregistrement.

Le démontage du réseau :

Il s'est effectué dans le courant du mois de Mai. Là où cela était possible le bidon plastique protégeant le capteur a été laissé pour une re-occupation possible ultérieure. Le matériel a été vérifié et éventuellement réparé. Une période de 8 mois en extérieur produit toujours une dégradation des connecteurs et de petites pannes.

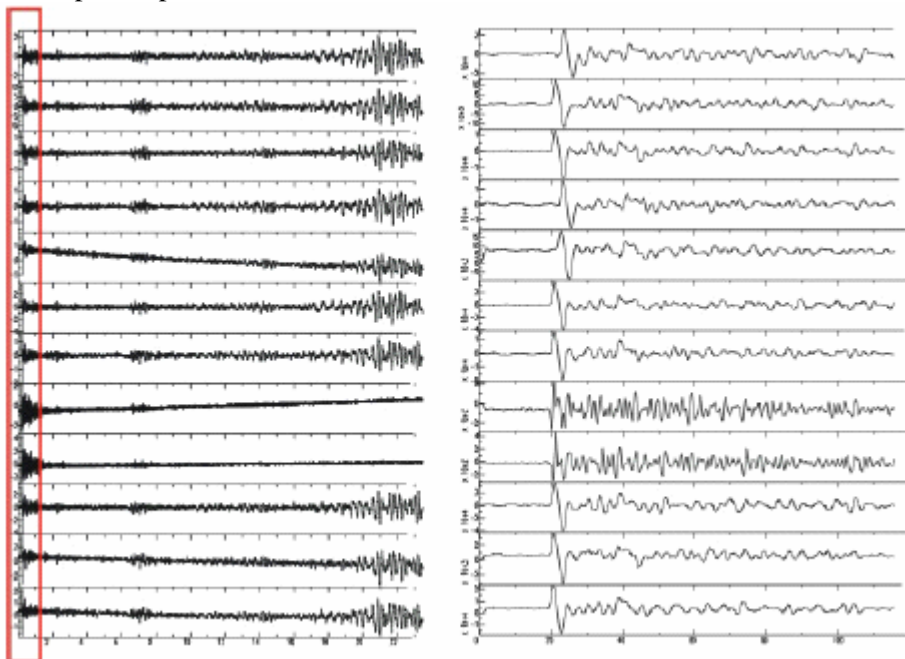


Figure 3 : séisme du 6 Décembre 2004 (Japon, M=6.7) enregistré sur les stations du réseau temporaire PASIS. A droite un zoom sur les ondes P (encadrées en rouge sur la figure de gauche).

L'analyse des données :

Nous avons collecté 130Go octets de données brutes correspondant à l'enregistrement du mouvement du sol sur les 3 composantes à 125 points par sec sur les 13 sites sélectionnés.

Sur ces données, stockées en plusieurs exemplaires sur des supports informatiques au laboratoire Géosciences Azur, nous avons appliqué un certain nombre de procédures pour détecter des événements sismiques et extraire le signal leur correspondant.

- La première étape est le contrôle des horloges des stations. La localisation des séismes est basée sur les temps d'arrivée des ondes à chaque station. Ce temps doit être commun à toutes les stations du réseau. C'est pour cela que nous utilisons des récepteurs GPS comme temps de référence. Le fonctionnement en continu de ces GPS doit être contrôlé avant l'interprétation des signaux.
- La seconde étape est la recherche sur chaque station de signaux qui puisse être associés à un événement sismique. Le mouvement du sol produit par un petit séisme n'est pas toujours très différentiable du signal produit par les activités humaines à proximité de la station. Par contre un séisme est vu quasi simultanément par plusieurs stations alors qu'un bruit local n'est vu que sur une station. Nous utilisons donc la recherche de coïncidence sur une plage de temps de 10 sec, de mouvements anormaux détectés sur plusieurs stations pour sélectionner des plages horaires qui pourraient correspondre à des séismes. Différents paramétrages ont été appliqués pour tenir compte des différents types de séismes qui peuvent être enregistrés et nous avons vérifié sur un certain nombre de traces individuelles que cette procédure nous permettait bien d'extraire tous les signaux significatifs, cohérents sur plusieurs stations. Durant la période de 8 mois d'enregistrement nous avons ainsi défini 556 plages de temps susceptibles de correspondre à un séisme. Nous intéressant aux séismes locaux, qui provoquent des mouvements du sol de haute fréquence (10 à 20 Hz) principalement et de courte durée (moins d'une minute), nous avons limité les tranches horaires à 2 minutes.
- Les signaux ainsi sélectionnés ont été visualisés. Ils ont été classés ainsi en 5 catégories selon la source potentielle :
 - 275 traces correspondent à 71 séismes mondiaux de forte magnitude (téléséisme) répertoriés dans le catalogue du NEIC. En général plusieurs tranches horaires sélectionnées correspondent au même séisme. Nous aurions pu éviter la sélection des ces événements avec un choix de paramètres différent. Mais la très forte activité sismique mondiale pendant la période de octobre-décembre

2004, nous procure là des données qui nous permettront de mieux préciser les caractéristiques de la croûte terrestre dans la région étudiée (voir Figure 3 pour un exemple d'enregistrement).

- 34 séismes régionaux en majorité dans les Alpes Italiennes au Nord-Est de la région étudiée, répertoriés dans le catalogue du ReNaSS.
- 4 événements locaux, localisés dans la partie nord du réseau, eux aussi répertoriés dans le catalogue du ReNaSS.
- 32 tirs de carrière : plusieurs carrières en activité sont effet aux environs proches – moins de 50km – de la zone étudiée. Ces événements ne sont pas répertoriés dans les catalogues de sismicité. Pour éviter toute confusion entre un tir de carrière et un séisme local superficiel, nous pensons aller chercher auprès des ces entreprises la confirmation de ce catalogue. Il nous permettra en particulier de vérifier que nous ne classons pas comme tir un séisme, mais aussi que notre réseau a bien fonctionné et était capable de détecter tout événement dans son voisinage.
- 2 événements inexpliqués qui pourraient correspondre au passage d'un avion du nord vers le sud.
- 209 fenêtres de temps correspondent à du bruit : l'algorithme réglé pour un maximum de sensibilité n'est pas assez robuste pour différencier un véritable séisme de bruit arrivant au même moment en plusieurs stations. Ces signaux ont été éliminés de l'ensemble des données sur lesquelles nous allons travaillé.

Bilan et perspectives

La campagne PASIS durant laquelle 13 stations temporaires ont été installées autour de la basse vallée du Var pendant une période de 8 mois s'est bien déroulée. Malheureusement la sismicité régionale et locale a été très faible durant cette période et nous n'avons pas collecté de données permettant de répondre clairement à la question de la présence d'une faille active sous la région étudiée. On peut même dire que pendant cette période, il n'y a pas eu d'activité détectable par le réseau sur un accident de cette région, la limite de détectabilité par le réseau temporaire étant d'un ordre de magnitude inférieur à la limite admise pour le réseau permanent ReNaSS. Par contre nous avons collecté des données (télé-séismes et séismes régionaux) qui nous permettront de mieux décrire la croûte terrestre sous cette région, en particulier de contraindre la variation de son épaisseur qui varie de 15km en bord de mer à 32km à St Etienne de Tinée. Cette information est importante dans les modèles géodynamiques qui permettent de mieux comprendre la répartition des contraintes dans la croûte et donc les lieux potentiels de localisation des séismes.

Nous avons noué des contacts qui pourront simplifier l'installation d'un nouveau réseau temporaire en cas de besoin et avons constaté qu'il y avait un réel intérêt des différentes personnes que nous avons rencontré sur le terrain (particuliers, maires ou employés municipaux) à s'informer et comprendre les recherches en cours.

B.3 Effets de site

(Coordination : Etienne Bertrand)

Objectif : Quantifier les effets de site dans la plaine du Var en utilisant plusieurs méthodes

Actions de recherche :

- Campagne de mesure de bruit de fond en réseau : déploiement de la centrale d'acquisition du CETE sur le point de mesure;
- Inversion des données de réseau afin de déterminer les propriétés géophysiques des terrains dans les 100 mètres de couverture sous le point d'expérimentation, en particulier la vitesse de propagation des ondes de cisaillement;
- Une dizaine de mesures du bruit de fond sismique selon la méthode « H/V bruit de fond » sur le site d'intérêt.
- Calcul des rapports spectraux H/V à partir des données acquises durant cette campagne pour connaître les caractéristiques fréquentielle d'un éventuel effet de site;
- Corrélation des résultats géophysiques avec des données géotechniques éventuellement présente dans la Banque de Donnée du Sous-sol au droit du site ou à proximité immédiate;
- Modélisation numérique de l'effet de site par Cyberquake et Cesar-LCPC et comparaison du résultat avec les mesures faites sur le terrain.

Résultats escomptés : le travail envisagé permettra de mieux cerner les effets de site lithologiques liés au remplissage alluvionnaire de la vallée du Var en se basant sur un point de contrôle.

Etat d'avancement des actions de recherche

Le 19 septembre 1985, le séisme de Michoacan ne causa que des dégâts modérés près de son épicerie mais engendra de sérieux dommages à Mexico City, à 350km de là. Une importante amplification de la sollicitation sismique est à l'origine de l'aggravation des effets du séisme sur la ville de Mexico. En effet, les mouvements sismiques sont modifiés selon les conditions géologiques de la sub-surface (présence de couches sédimentaires ou alluvionnaires par exemple). Il peut notamment se produire à cette échelle des amplifications des mouvements du sol qu'on appelle effets de site.

Il y a un effet de site lorsque la rhéologie des sols et la topographie superficielle et souterraine, peuvent atténuer ou au contraire amplifier les secousses sismiques. On distingue les effets de site topographiques dus au relief, et les effets de site lithologiques dus à la composition et à la géométrie des couches superficielles.

L'amplification des ondes sismiques est liée à un effet de résonance provoqué principalement par un contraste d'impédance entre une couche sédimentaire et le substratum rocheux. Les ondes traversant un tel milieu sont piégées ce qui conduit, à certaines fréquences, à une amplification des secousses sismiques. L'amplification sera maximale à des fréquences particulières appelées fréquences de résonance. Pour un remplissage tabulaire, la fréquence est liée à l'épaisseur des sédiments ainsi qu'à la vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans le milieu par la formule :

$$F_0 = \frac{V_s}{4H}$$

Cependant, cette amplification va également dépendre de la géométrie du bassin dans lequel se retrouvent piégées les ondes. Dans le cas où la couche sédimentaire est délimitée « brutalement » à ses extrémités, pour des bassins sédimentaires encaissés comme Nice ou Grenoble par exemple, des ondes vont être diffractées aux extrémités du bassin et vont se propager d'un bord à l'autre.

La plaine du Var est constituée de dépôts fluviaux quaternaires d'épaisseur variable alternant des sables, des argiles des galets et des graviers. Ce remplissage sédimentaire peut donc entraîner une amplification non négligeable des mouvements sismiques. D'autre part, le relief encadrant cette vallée peut également être localement le lieu d'amplification importantes.

Pour caractériser ces amplifications et analyser les variations pouvant exister au travers de la vallée, plusieurs expérimentations ont été lancées en 2005. D'une part une campagne sismologique a été mise en place pour permettre, notamment, l'application de la méthode site/référence. D'autre part, un profil de mesure de bruit de fond a été réalisé au travers de la vallée, à la hauteur de l'embouchure de l'Estéron. Ces mesures nous ont permis de calculer des rapports spectraux H/V en une dizaine de points.

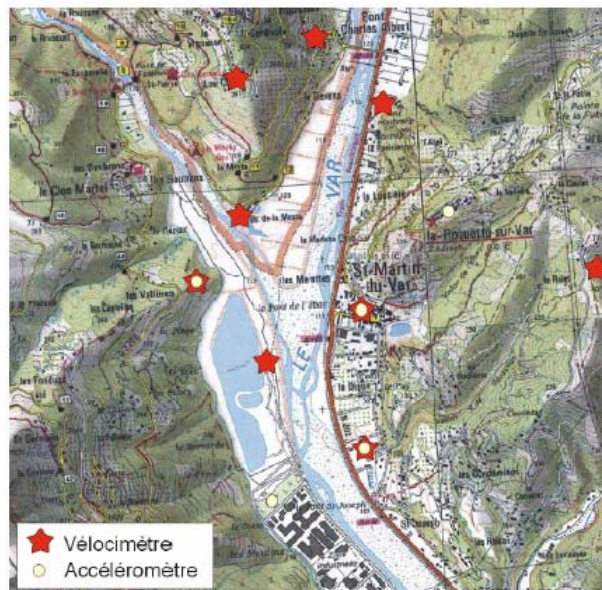


Figure 4 : Réseau ultra-dense de stations sismologiques temporaires pour l'étude des effets de site

Enregistrement de séismes

Une campagne d'enregistrement sismologique sur une zone restreinte a été lancée début 2005. Un réseau temporaire dense (Figure 4), formé de 9 stations vélocimétriques et 5 stations

accélérométriques, a été déployé autour de Saint Martin du Var. Les stations ont été mises en place progressivement depuis le mois de Mars 2005. La phase d'acquisition est en cours. Si un séisme survient, il pourra être traité dans le cadre de ce projet.

L'objectif de ce réseau est d'enregistrer des séismes afin de comparer les signaux obtenus d'une station à l'autre et analyser les amplifications éventuelles liées à la topographie ou à la rhéologie des sols.

La méthode mise en application ici a été décrite pour la première fois par Borchardt et Gibbs en 1970. Elle consiste à comparer les enregistrements obtenus à ceux d'une station de référence placée directement sur le rocher horizontal affleurant. Les signaux acquis sont dans un premier temps traités numériquement par transformés de Fourier pour obtenir leur spectre en fréquence. Ensuite les rapports entre les spectres de la station de référence et les spectres au site étudié sont calculés. Ces rapports spectraux varient, pour un même site, d'un séisme à l'autre en fonction notamment de la source du séisme (mécanisme au foyer, azimuth, distance épacentrale, magnitude). Pour s'affranchir de ces effets et estimer la fonction de transfert du site, il est donc indispensable d'effectuer une moyenne des rapports spectraux obtenus à partir de plusieurs séismes.

Enregistrement de bruit de fond

Les bases de la méthode « H/V bruit de fond » ont été établies dès les années 1950 au Japon (voir Aki, 1957 et Aki, 1993). Cette méthode est aujourd'hui de plus en plus utilisée pour identifier les sites présentant des risques d'amplification sismique afin de déterminer les fréquences de résonance. Son succès est dû à son faible coût d'utilisation ainsi qu'à sa simplicité de mise en œuvre. Sur le plan de l'expérimentation, la méthode consiste à poser un capteur de vibration tri-directionnel sur le sol à étudier (Figure 5). Le bruit ambiant est alors enregistré par une station d'acquisition sismologique durant quelques minutes.



Figure 5 : Capteur et station d'enregistrement utilisés pour l'enregistrement du bruit de fond.

Le traitement des trois traces sismiques (vertical, nord-sud et est-ouest) obtenues par enregistrement est le suivant :

- 1- Pour chaque enregistrement on recherche d'abord des fenêtres de signal dans lesquelles le signal est le plus stable (stationnaire) possible (Figure 6). Un traitement spectral est alors appliqué sur ces fenêtres;
- 2- **H** représente l'amplitude spectrale lissée des composantes horizontales du bruit de fond sismique, obtenue par combinaison de l'amplitude spectrale des deux voies nord-sud et est-ouest;
- 3- **V** représente l'amplitude spectrale lissée de la voie verticale du même enregistrement;
- 4- Le rapport entre ces deux amplitudes spectrales est effectué sur plusieurs fenêtres de temps et le rapport moyen est donné en résultat (Figure 7).

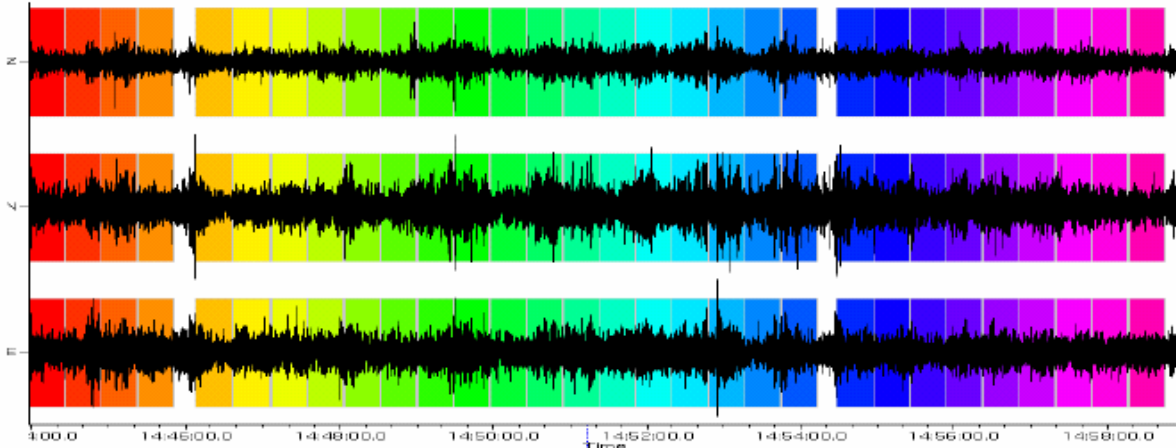


Figure 6 : Sélection des fenêtres stationnaires au point n°9.

S'il existe un effet de site au point de mesure, la courbe résultante du traitement présente un pic à une fréquence correspondant à la fréquence de résonance (Figure 7). Ces courbes sont généralement plates sur des sites à rocher affleurant.

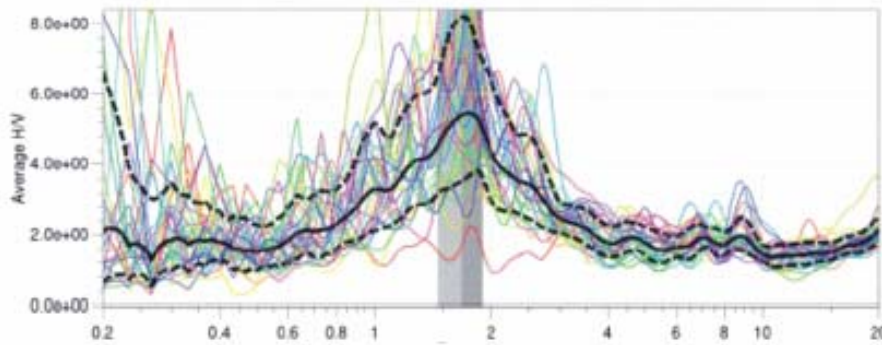


Figure 7 : Moyenne sur toutes les fenêtres des rapports H/V (Point n°9). 16 points de mesures ont été effectués.

Les fréquences de résonance relevées se répartissent entre 1,6 et 8 Hz. On remarque également que les résultats montrent une nette diminution de la fréquence entre les bords et le centre des deux vallées de l'Estéron et du Var (Figure 8). Cette baisse est en bon accord avec un épaissement des alluvions vers le centre des vallées.

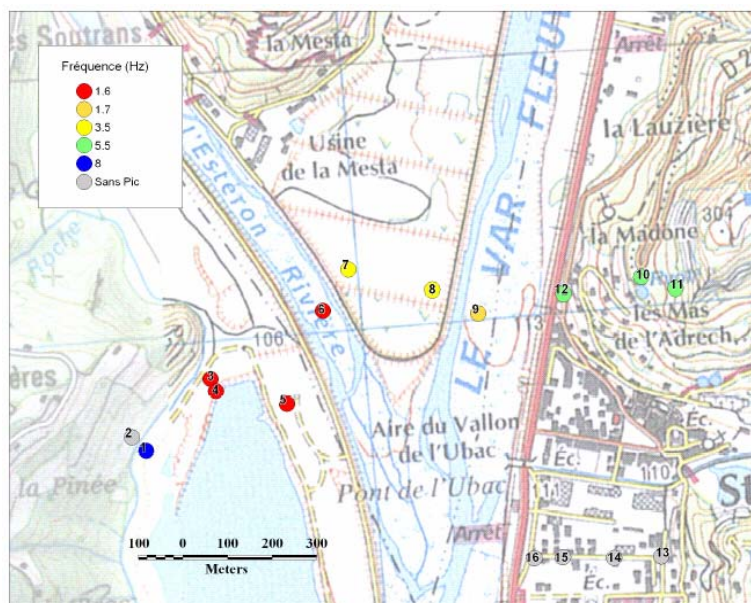


Figure 8 : Résultats des points de mesure de bruit de fond.

Perspectives

La campagne d'enregistrement de séisme se poursuit et devrait se terminer à la fin du projet PASSERELLE. D'ici là, les données recueillies devront être traitées et corrélées aux résultats obtenus d'ores et déjà avec la méthode H/V bruit de fond.

Une campagne de mesure de bruit de fond en réseau a déjà été réalisée dans la zone d'étude en juillet 2005. En complément des données géotechniques et géophysique rassemblées, elle permettra de préciser la géométrie et les caractéristiques mécaniques des dépôts sédimentaires de la vallée. Finalement, des modélisations numériques de la réponse sismique des colonnes de sol 1D et de modèles 2D vont nous permettre d'analyser l'influence de la géométrie du bassin sédimentaire sur les effets de site.

B.4 Simulation des mouvements du sol

(Coordination : Françoise Courboux)

Objectif : simuler les mouvements du sols qui serait produits par un séisme important

Actions de recherche :

- Compilation des données existantes en vue d'affiner les lois d'atténuation.
- simulation d'un séisme de magnitude 6 en mer et 5.5 à terre avec la méthode de sommation de petits séismes en différents points du département.
- modélisation de la propagation des ondes sur la zone de la vallée du Var par différentes méthodes.

Résultats escomptés :

- outil de modélisation grossier du mouvement produit par un séisme en tout point du département.
- carte d'accélération statique du sol en prenant en compte les lois d'atténuation
- accélérogrammes simulés pour un séisme de magnitude 6 en Mer au niveau des points de mesure du RAP.

Etat d'avancement des actions de recherche

Cet axe du projet comporte plusieurs aspects qui n'ont pas tous été abordés dans cette première phase de l'étude.

Notre travail s'est concentré durant l'année 2004-2005 sur les méthodes de simulation de mouvements du sol qui seraient générés par un hypothétique futur séisme. La partie méthodologique du travail ainsi que les premières validations et applications à des données de Nice sont présentées dans ce qui suit.

Le travail sur les lois d'atténuation n'a pas pu progresser puisque très peu de données nouvelles ont été enregistrées.

Méthode

Pour simuler les mouvements du sol produits par un séisme, nous avons développé deux codes basés sur la méthode des fonctions de Green empiriques. Cette méthode consiste à additionner les enregistrements de petits séismes décalés dans le temps afin de reproduire la propagation de la rupture (Figure 9). Chacun de ces petits séismes intègre les effets de propagation entre la source et la station. Cette méthode est particulièrement efficace car elle prend en compte non seulement les effets de propagation entre la source et la station, mais aussi les effets de sites et les effets d'atténuations.

Pour simuler de manière réaliste les mouvements du sol produits par un séisme, cette méthode nécessite un schéma de sommation approprié. Pour mettre en place un tel schéma, nous avons testé différentes manières de représenter la source sismique en temps à travers deux codes indépendants. Le premier code est un code dit « stochastique ». Il repose sur une représentation temporelle de la source sismique. Les enregistrements des petits séismes sont sommés entre eux suivant un schéma stochastique bien précis. Ce code nécessite la connaissance de peu de paramètres. Il peut donc être utilisé pour obtenir une estimation des mouvements du sol, même dans des cas où l'on possède très peu d'informations sur un séisme attendu. Ce code a fait l'objet d'un article publié en août 2005 dans la revue internationale « Bulletin of the Seismological Society of America » (Kohrs-Sansorny et al., 2005). Le second code est un code dit « stochasto-cinématique ». Il repose sur une représentation spatio-temporelle de la source sismique. Les enregistrements des petits séismes sont sommés entre eux de manière à reproduire la cinématique de la rupture. Ce code nécessite la connaissance de plusieurs paramètres notamment le point de nucléation, la vitesse de rupture... Il permet de simuler différents scénarios de séismes, en reconstituant en partie les effets de directivité. Ces deux codes ont été testés numériquement et sur des données réelles (Mexique et Italie). Ils intègrent les dernières avancées dans

ce domaine et permettent ainsi de simuler de manière réaliste les mouvements du sol aussi bien en temps que dans le domaine fréquentiel.

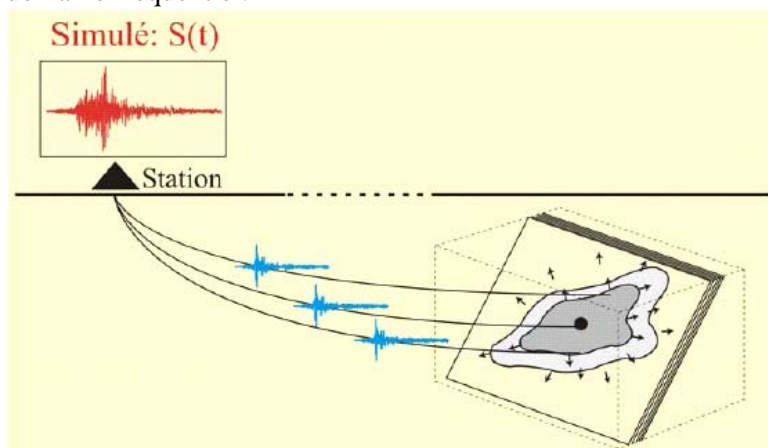


Figure 9 : La méthode des fonctions de Green empirique : simulation des mouvements du sol produits par un séisme important par sommation des enregistrements d'un petit séisme.

Sélection de données

Pour appliquer ces codes à la région niçoise, il a fallu dans un premier temps caractériser les séismes de référence. Deux séismes ont été pris comme référence : un séisme de magnitude 5.7 situé à terre à 10 km de la ville de Nice et un séisme de magnitude 6.3 situé en mer à 25 km de Nice. Pour choisir ces séismes, nous nous sommes appuyés sur la sismicité récente de la région et notamment à terre sur la crise de Blausasc, et en mer sur le séisme du 25 février 2001 (Figure 10). La crise sismique de Blausasc est caractérisée par près de 300 petits séismes de faible magnitude en 6 mois, dont un séisme de magnitude 3.4 sur une zone qui est habituellement plutôt calme. Grâce au réseau temporaire SALAM déployé pendant cette même période, une localisation fine de ces événements a pu être possible et permettre ainsi l'identification d'une faille active d'environ 6 km de long. Cette faille serait la racine en profondeur de la faille Peille-Laghet estimée à une longueur de 20 km et pouvant générer un séisme de magnitude supérieur à 6 (Couboulex et al., 2003). Les deux séismes pris comme référence peuvent être rapprochés des deux séismes les plus importants dans la région : le séisme Nissart de 1564 à terre et le séisme Ligure de 1887 en mer.

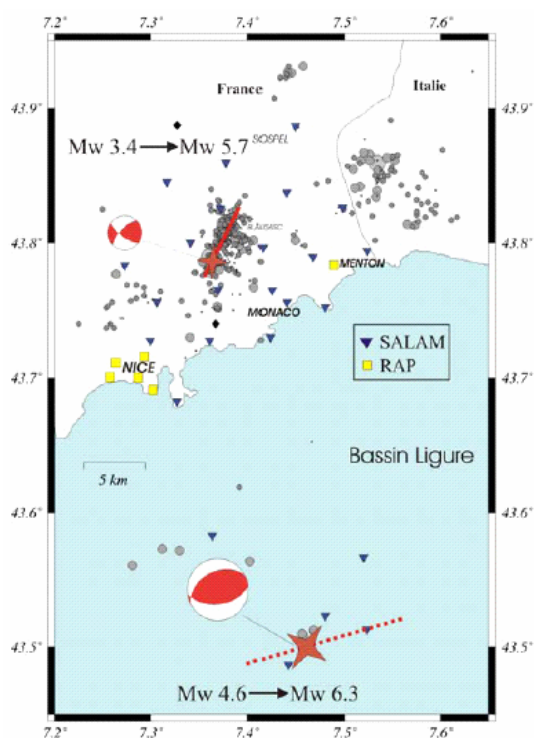


Figure 10 : Localisation et mécanismes au foyer des deux séismes de références pour la ville de Nice. Les points correspondent à la sismicité enregistrée durant les six mois de la campagne SALAM.

Validation sur un petit séisme

Pour simuler les mouvements du sol susceptibles d'être produits par les séismes de référence, nous avons dans un premier temps utilisé le code stochastique. Une première étape a été de tester ce code sur le séisme de Blausasc (Mw 3.4, 19 décembre 2000). Nous avons sélectionné comme fonction de Green empirique un petit séisme de magnitude 2.3. Les simulations obtenues (Figure 11) reproduisent plutôt bien les mouvements du sol observés, aussi bien en temps que dans le domaine spectral (spectre de Fourier et spectres de réponse) pour les 3 stations de notre étude (voir le cas de la station ROCA ci-dessous).

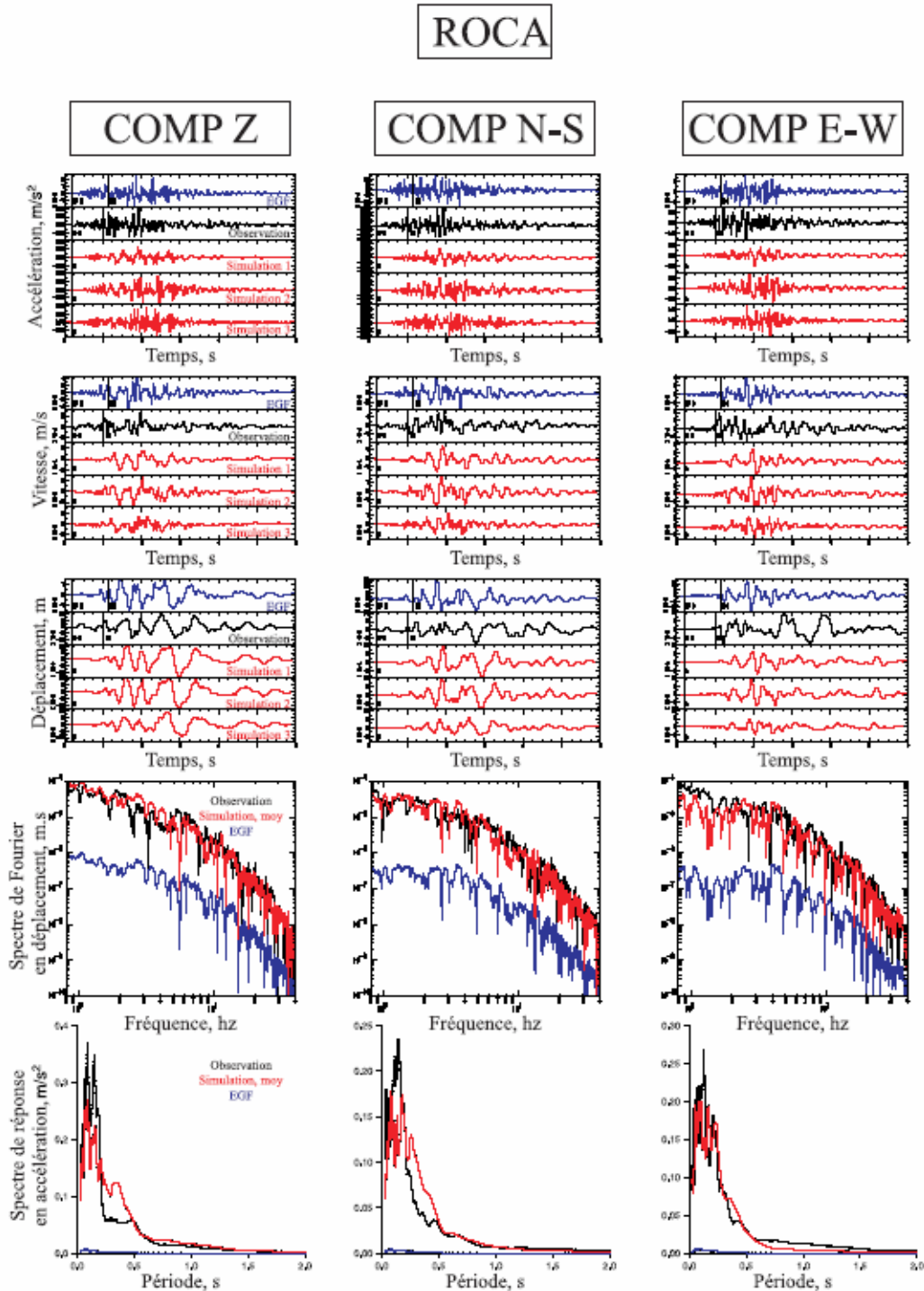


Figure 11 : Simulation du séisme de Blausasc (19 décembre 2000, Mw=3.4, 10 km au nord de Nice) sur la station ROCA. Pour chaque composante sont représentés : l'accélération, la vitesse, le déplacement, le spectre de Fourier en déplacement et le spectre de réponse pour le petit séisme (en bleu), le choc principal (en noir) et les simulés (en rouge).

Simulation d'un séisme de magnitude 6.3 en mer au large de Nice en quelques points de la ville de Nice.

Les résultats des simulations pour le séisme de référence en mer (sous condition d'une chute de contrainte constante) sont ici synthétisés sous la forme de points de PGA sur une carte, le PGA étant l'accélération maximale du sol (Figure 12). Les PGA sont ici exprimés en m/s^2 . D'autres indicateurs seront utilisés dans les études futures. Si on se concentre sur la ville de Nice, on constate que de forts effets d'amplifications sont attendus notamment sur le site Alsace-Lorraine situé sur des sédiments comparativement au site du mont Boron située au Rocher. Ces effets d'amplifications sont observables non seulement au niveau du PGA, avec des facteurs d'amplification de l'ordre de 6, mais aussi sur différentes gammes de fréquences. On note ainsi des amplifications qui atteignent un facteur 4 entre $[0,0.5s[$ et 10 entre $[0.5,1.5 s]$. Si on assimile un immeuble de 5 étages à un oscillateur de période propre 0.5s, l'accélération en haut de cet immeuble serait de l'ordre de $4 m/s^2$ soit 0.4 g. Ces niveaux d'amplifications sont comparables aux études sur les effets de sites menées dans la région.

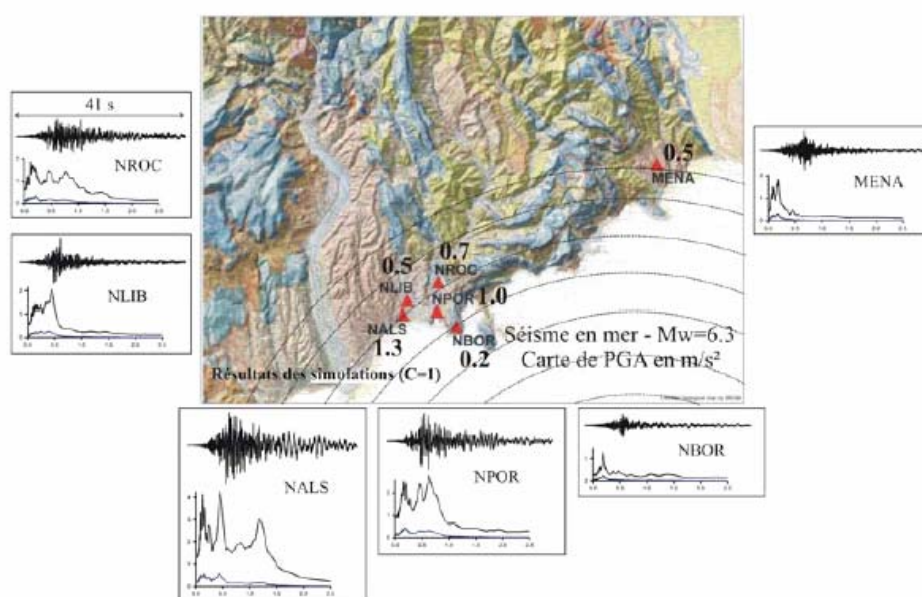


Figure 12 : Simulation des mouvements forts du sol produits par le séisme en mer sous l'hypothèse d'une chute de contrainte identique pour le séisme de référence et son EGF. Pour chaque station du réseau RAP sont représentés un accélérogramme correspondant à une réalisation et le spectre de réponse accélération-période moyen. Les spectres de réponse du petit séisme utilisé comme fonction de Green empirique sont représentés en bleu.

Perspectives

Les premiers résultats de la simulation d'un séisme de magnitude 6.3 en mer sont encourageants. Cependant les valeurs obtenues sont très dépendantes de la chute de contrainte utilisée pour le séisme à simuler, et ce paramètre est mal contraint. Le choix de ce paramètre constitue la difficulté majeure de la mise en place de cette méthode. Il pourra nous le pensons être amélioré par des avancées théoriques sur la source sismique.

Les perspectives qui s'ouvrent à nous pour la deuxième partie du projet sont :

- la simulation d'un séisme à terre de magnitude 5.5 au niveau de la faille de Blausasc nouvellement découverte (Courboulex et al, 2003), au niveau de tous les points instrumentés du département.
- la comparaison des résultats obtenus à différentes stations en fonction de la source et du site d'enregistrement
- la comparaison avec d'autres types de modélisation de la propagation des ondes.

B.5 Phénomènes induits : les glissements de terrains

(Coordinateur : Thomas Lebourg)

Actions de recherche :

- Cartographie de la lithologie, de l'état de fracturation des signes d'instabilités
- Tomographie 2D du glissement de terrain de Vence
- Suivi temporel des profils 2D
- Inventaire de l'ensemble des mesures réalisées sur le site et évaluation des paramètres les plus pertinents à prendre en compte dans la base de données.
- Réalisation d'essais mécaniques au niveau des interfaces de ruptures
- Compilation des variables caractérisant le mouvement de versant et des paramètres d'accélération du sol dans un modèle de stabilité (si disponible)

Résultats escomptés :

- Suivi de l'évolution dans le temps des systèmes d'alimentations en eau du massif,
- Caractérisation probabiliste de la rhéologie,
- Elaboration d'un début de base de donnée type, si possible géoréférencée, compilant l'ensemble des données acquises sur le site,
- Quantification des corrélations entre les paramètres et variables mesurés sur le site.

Etat d'avancement des actions de recherche :

Problématique

Cette étude du glissement de terrain du lieu-dit "Pra de Julian" (commune de Vence) a été réalisée dans une optique de recherche scientifique à propos des mouvements gravitaires et leur caractérisation par la géophysique électrique.

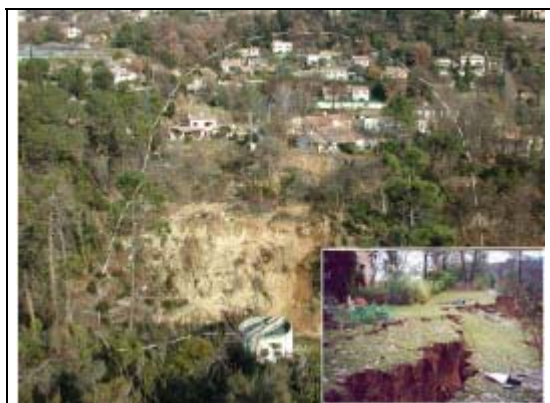


Figure 13 : Vue d'ensemble et de détail du glissement de terrain « Pra de Julian »

La démarche de prospection repose essentiellement sur la réalisation de profils électriques :

- dipôle-dipôle : profondeur de prospection de l'ordre de la cinquantaine de mètres (dépendant du montage employé) permettant une imagerie du sous-sol avec une très bonne résolution sur les trente à quarante premiers mètres de profondeur. Ce type de montage est donc tout à fait adapté à l'étude de discontinuités géologiques peu profondes de type surface de rupture, changement lithologique à faible profondeur, et surtout zone de circulation préférentielle de fluides, qui est un facteur primordial dans l'étude des instabilités gravitaires.

- pôle-pôle : la profondeur de prospection est beaucoup plus importante (de l'ordre de la centaine de mètres). Ce type de montage est adaptés pour l'étude du substratum et permettra de s'assurer de l'inexistence d'une zone de rupture plus profonde.

Les objectifs de cette campagne de prospection sont donc :

- d'établir la structure lithologique du sous-sol au niveau de l'ensemble de la zone instable;
- de caractériser la surface de rupture;
- de s'assurer de la bonne homogénéité du substratum.

Dispositif expérimental

a/ profil du chemin du Pioulier : montage à 24 électrodes espacées de 10m. : Une séquence dipôle-dipôle et une séquence pôle-pôle (Figure 14),

b/ profil du chemin du Poutaouchoun B : montage à 24 électrodes espacées de 10m. : dipôle-dipôle (Figure 15),

c/ profil bas : montage à 48 électrodes espacées de 5m. : dipôle-dipôle (Figure 16).

Interprétation

Concernant les profils électriques, les montages de type dipôle-dipôle donnent une image des 25 à 30 premiers mètres de profondeur avec une bonne résolution. Pour cette raison, l'étude de la surface de rupture et de l'ensemble des discontinuités géologiques reliées au mécanisme du mouvement considéré se fera essentiellement au travers de l'analyse des données obtenues en dipôle/dipôle. Le profil pôle/dipôle permettra, quant à lui, d'étudier l'assise profonde du terrain en mouvement (substratum) et donc de s'assurer de la bonne homogénéité du sol en profondeur (pas de surface de rupture plus profonde).

L'ensemble des profils réalisés montre une corrélation très nette avec les données de forage. La discontinuité sable argileux (et matériaux à faible cohésion) avec les calcaires massifs est très nettement marquée par une signature électrique de contraste de résistivité :

- sable argileux et matériaux à faible cohésion : ρ de l'ordre de 350 Ohm.m,
- calcaire massif : ρ de l'ordre de 750 à plus de 1000 Ohm.m.

La transition entre ces 2 types de matériaux se caractérise par un passage par des éléments plus cohésifs et plus siliceux (grès...).

Ce contraste de résistivité permet donc de caractériser assez finement la lithologie du sous-sol et donc de permettre d'obtenir une connaissance de ce dernier de façon beaucoup plus étendue que ne le permet les forages.

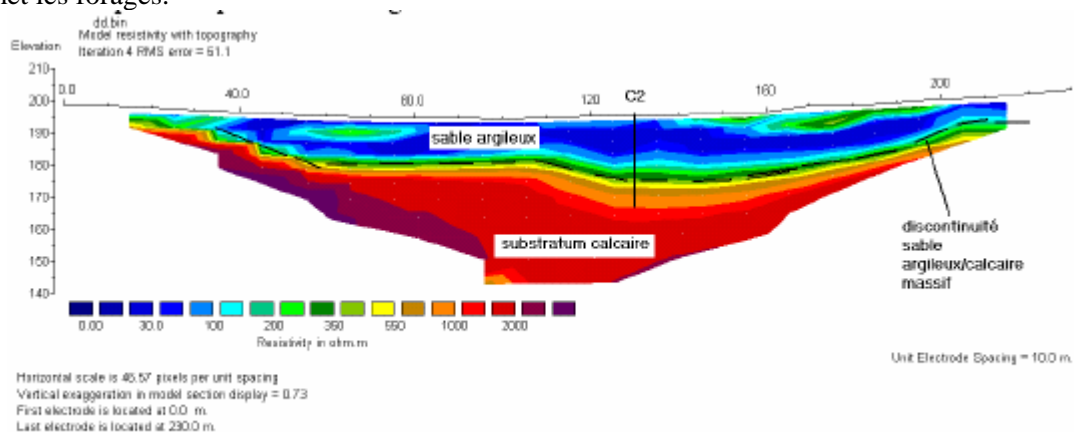


Figure 14 : profil pôle-pôle du chemin du Pioulier

Concernant l'interprétation géologique, la transition argile/calcaire caractérisée se traduit par un contraste de cohésion élevée mais surtout une différence de perméabilité donc de comportement vis-à-vis de la circulation des fluides déterminantes en matière de mouvement gravitaire :

- Sable argileux : capacité d'absorption et d'adsorption élevée ;
- Calcaire massif : la perméabilité n'est pas une perméabilité structurale mais une perméabilité de fracture.

La circulation des eaux d'infiltration va donc pouvoir être concentrée au niveau de cette discontinuité. Il est très probable que l'augmentation de la pression interstitielle à ce niveau représente une surface de glissement potentielle.

En mettant en parallèle la cartographie de la limite du glissement et la coupe interprétative relative au dipôle-dipôle ainsi que les données des forages, on constate la forte corrélation entre la limite cartée sur le terrain et la limite modélisée par la tomographie électrique.

dipôle- dipôle:

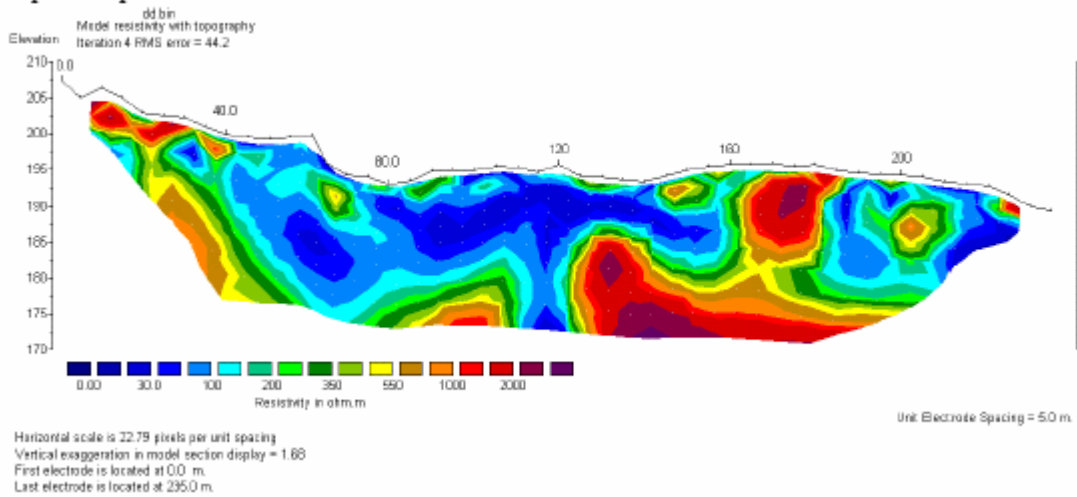


Figure 15 : profil dipôle-dipôle du chemin du chemin du Poutaouchoun B

Il est important de noter que l'arrêt brutal apparent de la surface de rupture à l'aplomb de l'électrode placée à 160m ne correspond pas à une réalité géologique mais elle est relative à l'irrégularité du dispositif expérimental. En effet, n'ayant pu obtenir l'autorisation d'entrer dans la propriété de Mr et Mme X, le tronçon du montage allant de 160 à 240m est placé à 90° de la première partie du dispositif (cf : carte de localisation des profils). La modélisation est donc exacte d'un point de vue imagerie géologique mais elle ne permet plus de mettre en avant la propagation de la surface de rupture. Dans le cadre de notre étude et en ce qui concerne ce profil, on pourra ne tenir compte que de l'image obtenue sur la section 0 à 160m.

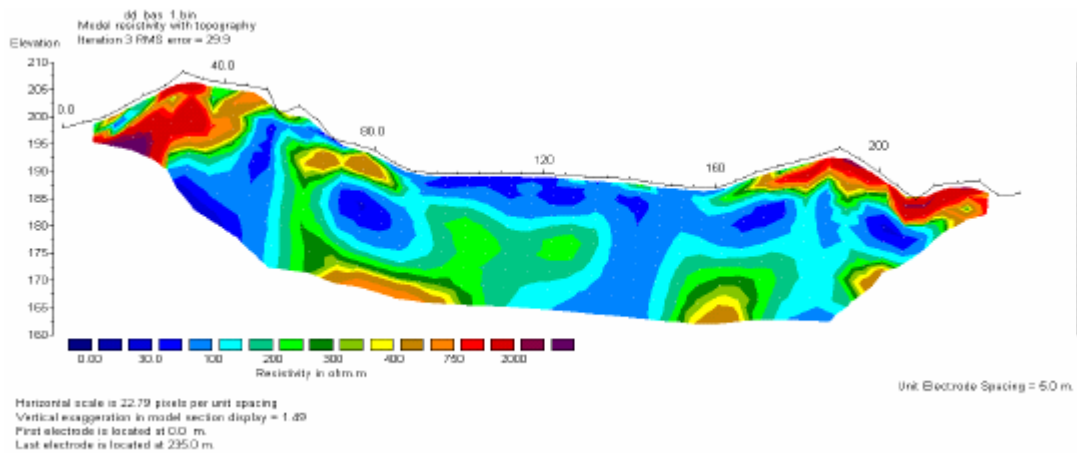


Figure 16 : profil bas dipôle-dipôle

Remarques :

On notera la bonne homogénéité du substratum calcaire mise en évidence par le profil de grande profondeur (pôle-dipôle). On pourra donc rejeter l'hypothèse d'une surface d'arrachement plus profonde que celle reliée à la discontinuité lithologique sable argileux/calcaire.

La mise en évidence d'une structure de type faillé par les deux profils dipôle-dipôle situés au pied du glissement. Cette structure cachée par le bourrelet du glissement a été rendue visible grâce à la tomographie électrique et n'aurait pas pu être accessible par une étude cartographique de terrain classique. On rappelle également qu'une faille constitue une zone de circulation préférentielle de fluides et donc est très intéressante dans une étude d'instabilité gravitaire.

Synthèse des résultats

L'étude géophysique a donc permis de caractériser une discontinuité géologique, physique et mécanique entre des terrains argileux et une assise calcaire :

Lithologie	Résistivité (en $\Omega.m$)	Cohésion	Comportement vis-à-vis des fluides
Sable argileux	Faible De l'ordre de 350 $\Omega.m$	Faible	Favorable à l'écoulement
Substratum (calcaire)	Forte De l'ordre de 1000 $\Omega.m$	Forte	Réfractaire à l'écoulement, sauf au regard des fractures...

L'interface entre ces deux structures représente la surface de glissement car elle constitue une zone de drainage des eaux d'infiltration. Lorsque le sol est à saturation, l'augmentation de la pression interstitielle au niveau de cette interface va permettre le glissement de la masse argileuse sus-jacente dont le poids volumique aura parallèlement augmentée grâce à sa capacité d'absorption et d'adsorption. Pour progresser vers la compréhension plus précise du mécanisme du glissement mais également sur les perspectives d'évolution, il serait intéressant d'axer la suite de l'étude sur une analyse précise des paramètres physiques et mécaniques des matériaux mis en jeu.

Conclusion

L'étude du glissement de terrain du lieu-dit « Pra de Julian » a présenté un intérêt certain en termes de recherche scientifique. Sa particularité ne réside pas dans le mécanisme rupture ou sa cinétique, mais dans son accessibilité et son instrumentation complète (prisme laser, forages, inclinomètres, piézomètres...); et c'est dans cette optique qu'il s'est présenté comme un site expérimental tout à fait en adéquation avec l'application de la tomographie électrique à l'étude des instabilités gravitaires.

Comme l'a montré ce rapport, la prospection électrique représente un atout certain dans l'étude des mouvements gravitaires. Non seulement on aura pu mettre en avant la très bonne résolution de la modélisation grâce notamment aux données de forage, mais il est également indéniable que ce type d'étude géophysique présente un avantage plus que certain par rapport à des méthodes « plus classiques » :

- Modélisation très fine de la surface de rupture ainsi que des zones de circulation préférentielle de fluides,
- Imagerie de certaines structures géologiques difficilement décelables (faille dans le cas de notre étude),
- la facilité de mise en œuvre du dispositif expérimental permet aussi une étude structurale du sous-sol beaucoup de plus grande ampleur que ne le permettent les forages par exemple.

Il est évident qu'en termes de pétrographie les données de carottage restent les plus précises, mais toujours dans l'optique d'étude des instabilités gravitaires, l'importance est donnée à la modélisation la plus fine et la plus large possible de tous types de discontinuités géologiques.

Perspectives

Nous envisageons au cours de l'année 2005/2006 de réaliser des mesures de suivi temporel sur un profil bien déterminé afin de suivre l'évolution des résistivités en fonction du temps versus la pluviométrie. Ce suivi permettra de mettre en évidence les secteurs préférentiels d'écoulement des eaux intimement liées à l'accélération de la cinétique du glissement.