

## La Lettre du RAP

### Premier semestre 2022 – Numéro 34

- S'inscrire à la newsletter
- Ne plus recevoir la newsletter

Dans ce numéro estival, vous allez pouvoir :

- Page 1 : découvrir les activités et questionnements du groupe Gamma-G, l'un des 3 groupes de travail du RAP ;
- Page 2 : partir pour un petit voyage en Équateur, à la découverte de l'effet de site du bassin de Quito ;
- Page 4 : retrouver les brèves du réseau.

La communauté du RAP se prépare pour sa Biennale tant attendue qui aura lieu dans 4 mois. Après maints reports en 2020 et 2021 dus à la crise sanitaire du covid-19... cette fois-ci sera-t-elle la bonne ? Le suspense est à son comble !

Nous préparons d'ores et déjà le prochain numéro de la Lettre du RAP. Celle-ci est ouverte à toutes les personnes, chercheurs, ingénieurs, techniciens, étudiants, qui font la vie du réseau accélérométrique français, mais qui travaillent aussi sur l'estimation de l'aléa et du risque sismique en France, ou à l'étranger, pour partager nos trouvailles. Si vous souhaitez contribuer, par un petit ou un grand article, n'hésitez pas à [me contacter](#). Très bel été à tous,

*Emeline Maufroy, directrice du RAP*

## Nouvelles du GT RAP Gamma-G

### Comment prédire la réponse non-linéaire des sols ?

Sous forte sollicitation cyclique, les sols ont un comportement non-linéaire qui modifie leur réponse sismique. Les matériaux qui composent les sols et les structures de génie civil ont la particularité de se dégrader sous une telle sollicitation, et ainsi ne se comportent plus de façon linéaire en cas de mouvement sismique fort. Les processus physiques à l'origine du comportement non-linéaire des sols sont variés et complexes, ce qui pose question quant à la validité des modèles théoriques de propagation des ondes sismiques dans une structure ou un site. En effet, il n'existe pas de consensus international sur la façon de concilier les mesures acquises in-situ sous faible déformation (sous séisme modéré) avec les mesures de laboratoire réalisées sur des échantillons de taille réduite placés sous forte déformation.

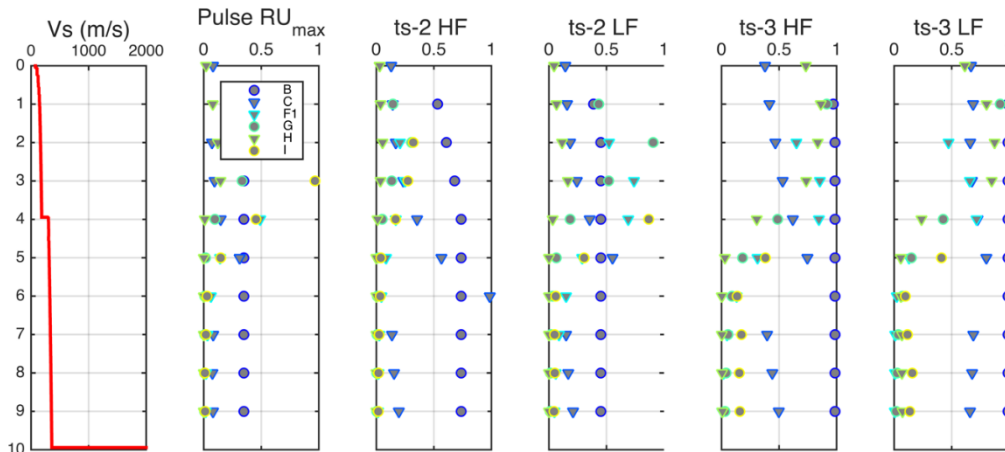
Le groupe de travail RAP Gamma-G, piloté par le Cerema, rassemble les partenaires français académiques et institutionnels comme CentraleSupélec, ESITC Paris, CEA, EDF, Géoazur, UCA, des entreprises privées comme GDS, Tractebel, et aussi des partenaires internationaux comme l'UnivAQ en Italie et EAFFIT en Colombie. Tous ces intervenants sont intéressés par cette problématique afin de pérenniser ce sujet de travail et de mener une réflexion communautaire sur les bonnes pratiques. Depuis 2020, le GT anime deux projets collaboratifs :

- L'organisation d'un benchmark national (nommé LICORNE) des méthodes numériques pour le calcul 1D de la réponse sismique non-linéaire des sols incluant les pressions d'eau ;
- La participation du GT au benchmark international de l'ESG avec deux méthodes purement empiriques de prédiction des mouvements forts.

Ces deux exercices incluent des études de cas réels avec une comparaison entre prédictions et observations, pour notamment offrir un retour d'expérience sur l'observation du comportement non-linéaire des sols par l'accélérométrie. Il s'agit également d'illustrer comment l'association des données empiriques et numériques participe à améliorer la compréhension du processus non-linéaire et sa prise en compte dans la réglementation EC8.

Le projet LICORNE a démarré la seconde itération de la phase de vérification sur des profils de sols canoniques. La Figure 1 ci-dessous illustre la variabilité de la réponse des différentes équipes lors de la première itération, sur l'évaluation de la pression interstitielle maximale le long du profil de sol.

► Contact pour participer aux activités et aux réunions du GT : [Julie Régnier](#)



« Figure 1. Profils de la pression interstitielle maximale calculée par les différentes équipes en fonction de différentes séries temporelles en accélération : pulse, accélérogrammes réels avec un contenu haute fréquence (HF) ou basse fréquence (LF), échelonnés à différents niveaux ts-2 (3.6 m/s<sup>2</sup>) et ts-3 (8.6 m/s<sup>2</sup>). La propagation est calculée dans la colonne de sol représentée par le profil de vitesse des ondes de cisaillement en rouge.

## FOCUS

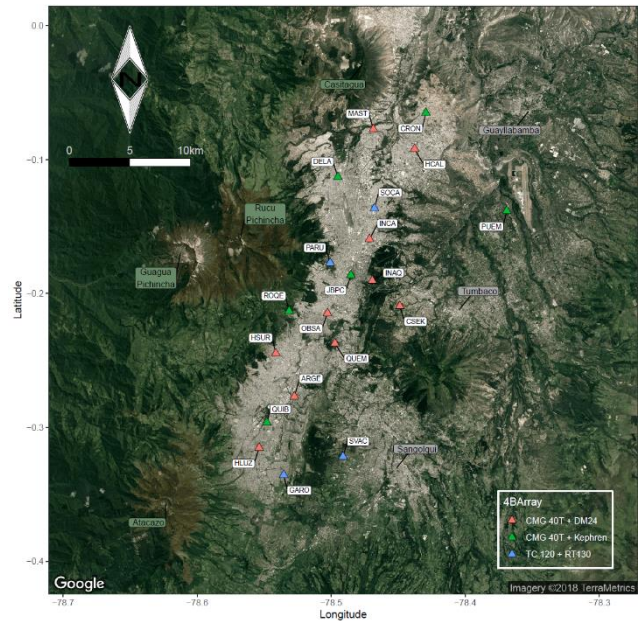
### QUITO du Nord au Sud : une réponse sismique asymétrique

La partie sud de Quito, capitale de l'Équateur, amplifie les ondes sismiques à basse fréquence (~0.3-0.4 Hz). Quelles causes ? Quelles conséquences ?

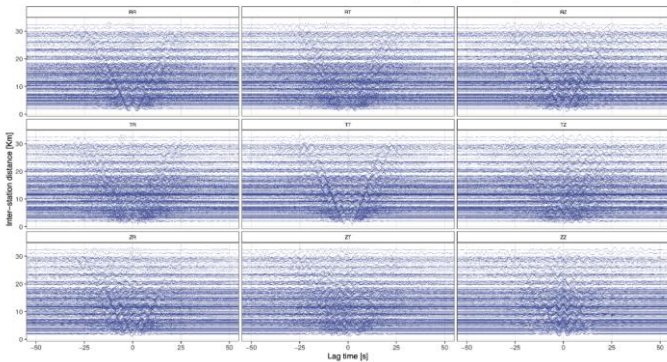
**Une capitale à haut risque :** Quito, située dans une vallée andine à 2800 mètres d'altitude, est construite sur un bassin rempli de dépôts sédimentaires et volcaniques, lui-même formé par la présence d'une faille chevauchante active (*piggy-back basin*) qui passe sous la ville. La ville est également menacée par des séismes crustaux de magnitude 7 ou plus engendrés par de grandes failles décrochantes, et par des mégaséismes de magnitude supérieure à 8 formés sur l'interface de subduction à 180 km de distance. Quito est actuellement peuplée de trois millions d'habitants et c'est une capitale en pleine expansion (construction d'un métro, agrandissement de la zone urbaine...). Un code parasismique existe mais il ne concerne qu'une toute petite partie des constructions de la ville.

**Un effet de site à basse fréquence dans le sud :** [Laurendeau et al. \(2017\)](#) ont montré, grâce aux enregistrements de séismes sur le réseau accélérométrique permanent, que le bassin de Quito amplifie les ondes sismiques à basse fréquence (~0.3-0.4 Hz) dans le sud de la ville uniquement.

**À quoi est due cette amplification ?** Pour le comprendre un réseau de 20 stations vélocimétriques est installé dans le bassin (Fig. 2) et enregistre les séismes et le bruit ambiant pendant plus d'un an (projet ANR REMAKE).



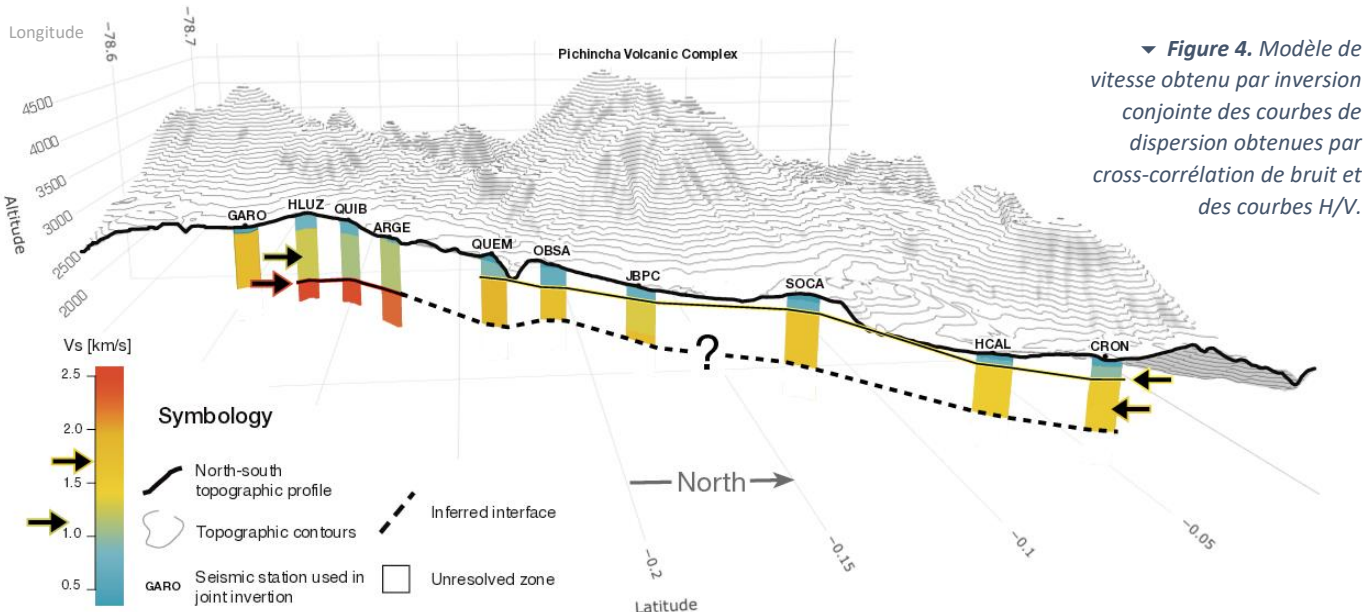
▲ Figure 2. Réseau vélocimétrique temporaire (2016-2018).



◀ Figure 3. Cross-corrélation de bruit (1 an de données, 0.1-2 Hz).

[Pacheco et al. \(2022\)](#) analysent les cross-corrélations de bruit ambiant (Fig. 3) et les rapports H/V, et proposent le premier modèle profond du bassin de Quito. Dans la partie sud de la ville, un fort contraste de vitesse apparaît de manière marquée à 1500 m de profondeur (Fig. 4, trait noir indiqué par une flèche) qui explique bien l'amplification des ondes à 0.3 Hz.

**Pourquoi cet effet d'amplification n'existe-t-il pas au nord ?** Cette interface profonde bien marquée au sud (trait noir sous les stations HLUZ, QUIB et ARGE) existe certainement aussi au nord (traits pointillés), même si elle n'est pas mise en évidence par les



▼ Figure 4. Modèle de vitesse obtenu par inversion conjointe des courbes de dispersion obtenues par cross-corrélation de bruit et des courbes H/V.



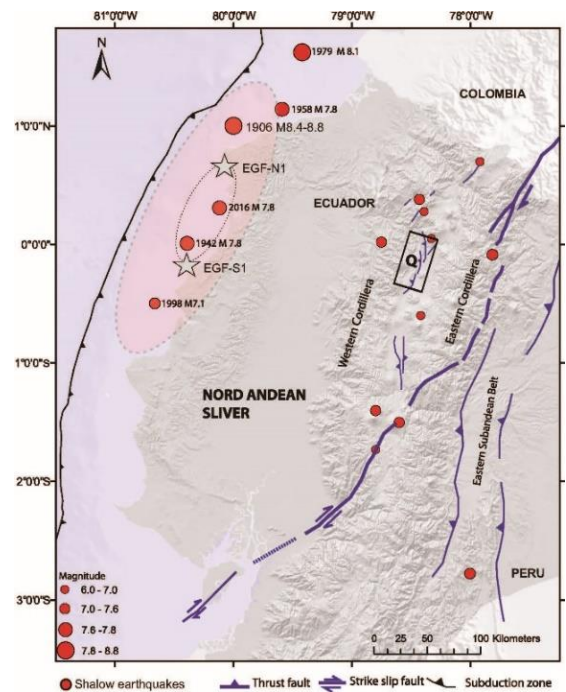
rapports spectraux ni par l'inversion des courbes de dispersion. C'est le résultat obtenu à partir d'une analyse d'autocorrélation de bruit et de séismes (Pacheco *et al*, thèse soutenue en avril 2022 et publication en cours). L'hypothèse proposée est qu'une large coulée volcanique au nord de la ville empêcherait l'effet d'amplification d'agir, et protégerait le nord de la ville de cet effet de site basse fréquence.

### Quel effet aurait un mégaséisme de subduction à Quito en prenant en compte cet effet de site ?

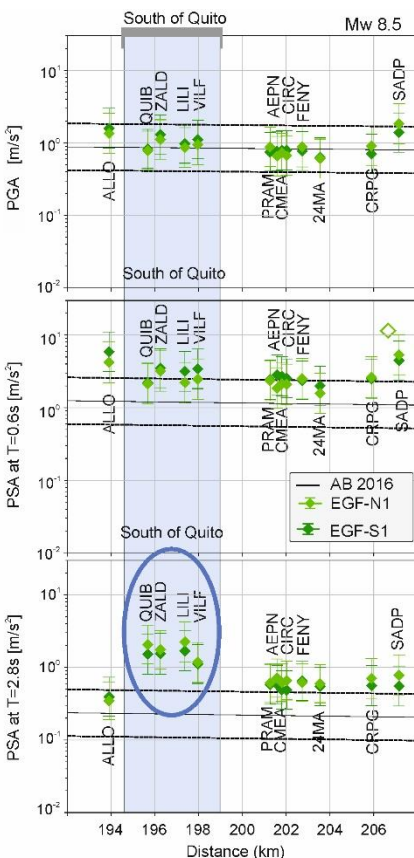
Le but de cette étude est d'estimer les mouvements du sol que pourrait générer un mégaséisme de subduction (similaire au séisme d'Esmeralda qui a eu lieu en 1906), dans la ville de Quito (Fig. 5). Pour cela, Courboux *et al.* (2022) proposent une méthode stochastique de sommation de fonctions de Green empiriques qui impose une variabilité de la chute de contrainte basée sur les fonctions source de la base de données globale SCARDEC (Vallée & Douet 2016).

Dans une première étape de validation, les signaux de quatre séismes de magnitude 5.8 à 6 sont utilisés comme fonctions de Green empiriques pour simuler un grand nombre de séismes de magnitude  $M_w$  7.8 sur l'interface de subduction. Les résultats des simulations (moyenne et variabilité) sont comparés aux signaux du séisme de Pedernales ( $M_w$  7.8 en 2016) sur les 12 stations accélérométriques permanentes de Quito. Les enregistrements sont en excellente adéquation avec les simulations et soulignent la forte amplification au sud de la ville.

Dans une deuxième étape, des séismes plus forts de magnitudes 8.2 et 8.5 sont simulés sur la zone de subduction. À haute fréquence, les résultats sont compatibles avec les prédictions obtenues (traits noirs pointillés, Fig. 6) par les modèles empiriques d'Abrahamson (2016). À basse fréquence (période = 2.8 s, c.a.d.  $f \approx 0.35$  Hz), les valeurs obtenues sont 10 fois supérieures à celles prévues dans le sud de la ville (Fig. 6, ellipse bleue).



▲ Figure 5. Position des séismes utilisés comme fonctions de Green empiriques (étoiles). Q = Quito



◀ Figure 6. Valeurs du spectre de réponse à différentes périodes sur les stations du réseau accélérométrique permanent. En vert les simulations (moyenne et écart type), en traits noirs les prédictions de la GMPE d'Abrahamson (2016).

**Un effet à prendre en compte pour le futur.** Cet effet de site à basse fréquence est particulièrement préoccupant pour les structures de grande dimension. Pour le moment, dans le sud de la ville, les immeubles sont de faible hauteur. Il est donc encore temps d'adapter les normes pour les constructions futures.

► Contact : [Françoise Courboux](#)

Études réalisées par des chercheurs de l'institut de Géophysique de Quito, de Géoazur (CNRS, IRD, OCA, UCA), du Cerema, de l'IRSN et de l'Université Gustave Eiffel, dans le cadre du projet ANR REMAKE porté par l'IRD. Deux étudiants en thèse ont travaillé sur le sujet : Daniel Pacheco (contrat IRD ARTS) et David Castro-Cruz (contrat Cerema).

#### Pour en savoir plus :

- Pacheco D., Mercerat E.D., Courboux F., Bonilla L.F., Laurendeau A., and Alvarado A. (2022). Profiling the Quito basin (Ecuador) using seismic ambient noise. *Geophys. J. Int.*, 228(2), 1419-1437.
- Courboux F., Castro-Cruz D.A., Laurendeau A., Bonilla L.F., Alvarado A., and Bertrand E. (2022). Ground motion simulations in Quito (Ecuador) due to major earthquakes from the subduction zone. *Geophys. J. Int.*, 229(3), 2192-2208.
- Laurendeau A., Courboux F., Bonilla L.F., Alvarado A., Naya V.A., Guéguen P., Mercerat E.D., Singaicho J.C., Bertrand E., Perrault M., Barros J.G., and Ruiz M. (2017). Low-frequency seismic amplification in the Quito Basin (Ecuador) revealed by accelerometric recordings of the RENAC network. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 107, 2917-2926.

## La prochaine Biennale du RAP aura (enfin) lieu du 8 au 10 novembre 2022 à Vogüé en Ardèche

Retrouvez le programme de l'événement [sur ce lien](#). Dix-sept présentations scientifiques sont prévues sur le thème de l'aléa et du risque sismique, depuis les séismes récents sur le territoire français jusqu'à leur impact sur les structures, en passant par les estimations du mouvement du sol. Le programme prévoit également plusieurs temps de discussion et une session technique plénière. Exactement trois ans après le séisme exceptionnel du Teil (M<sub>L</sub> 5.2 le 11 novembre 2019), ces journées scientifiques et techniques seront l'occasion de faire le point sur les nouvelles connaissances que cet événement nous aura permis d'acquérir. L'appel à contributions sous forme de posters ou speed-talks aura lieu auprès des inscrits courant septembre 2022.



Photo-souvenir des participants à la précédente Biennale du RAP, le 8 novembre 2018 à Lourdes.

## Brèves

### ACCÈS AUX DONNÉES

Retrouvez les liens utiles pour l'accès aux données du RAP [SUR CETTE PAGE](#).  
Pour les mentions à faire apparaître lors de l'utilisation de données RAP dans vos publications, [C'EST PAR ICI](#).  
Pour plus d'information sur le système d'information du RAP, [C'EST PAR-LÀ](#).

### DERNIÈRES PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

Vous pouvez retrouver la liste des publications 1998-2022 utilisant des données du RAP [SUR CETTE PAGE](#).  
Si une publication est absente de cette liste, n'hésitez pas à [le signaler](#).

Les données paramétriques de mouvement du sol fort, récoltées depuis 1996 pour les séismes majeurs des territoires de l'hexagone et de l'outre-mer, sont disponibles au format **flatfile** :

#### FLATFILE HEXAGONE



données RAP et RLBP  
disponible au téléchargement dans l'[entrepôt des produits Résif](#)  
ou sur la plateforme [RESORCE](#)  
► Contact : [Paola Traversa](#) ou [Emeline Maufroy](#)

#### FLATFILE ANTILLES



données RAP et WI  
– en cours de construction, mise à disposition prévue en 2023 –  
► Contact : [Rémy Burlot](#) ou [Emeline Maufroy](#)

#### FLATFILE EUROPE



émis par le [service ESM](#) de Orfeus (données RAP uniquement)

### Organigramme 2022 du RAP [SUR CETTE PAGE](#)

Rédacteurs de ce numéro 34 : COURBOULEX Françoise (Géoazur),  
HOLLENDER Fabrice (CEA/ISTerre), MAUFROY Emeline (ISTerre),  
REGNIER Julie (Cerema).