

Application de la sismique hybride dans les sous-sols instables

par

Philippe CORBOZ¹ & Walter FREI²

Résumé.—CORBOZ P. & FREI W., 2013. Application de la sismique hybride dans les sous-sols instables. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 331-340.

La prospection par la méthode sismique hybride à haute résolution est recommandée au cours de la phase préliminaire d'un programme de caractérisation géotechnique d'un site, de préférence avant les opérations de forage et d'excavation, dans le but de détecter les zones critiques pour des investigations invasives complémentaires, tels que les forages. La combinaison des résultats de l'évaluation des profils de sismique réflexion et de sismique réfraction par inversion tomographique dans une représentation juxtaposée, i.e. la sismique hybride, permet d'optimiser la pertinence de l'interprétation. Les zones critiques d'ameublissement de la roche et de compacité réduite, liées à l'érosion intense et à la présence de failles tectoniques, sont identifiées de façon univoque. En utilisant les instruments de mesures appropriés, l'acquisition des données des deux méthodes mentionnées ci-dessus peut être réalisée en une seule opération de terrain, résultant en une réduction significative du temps et des coûts d'acquisition. Quatre exemples de cas d'études dans le domaine des dangers naturels où la sismique hybride a permis de déterminer des zones critiques dans des sous-sols instables sont présentés.

Mots clés: Sismique hybride, zones d'ameublissement, toit du rocher, faille, dangers naturels.

Abstract.—CORBOZ P. & FREI W., 2013. Hybrid seismic surveying for the detection of soil instability zones. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 331-340.

High resolution hybrid seismic surveying is recommended during the early phase of a geo-technical site characterization programme, preferably prior to drilling and excavation activities, with the objective of detecting critical zones for more detailed invasive follow-up investigations, such as boreholes. By combining in a joint representation the evaluation results of the seismic reflection profiling method and of the seismic refraction tomographic inversion, i.e. hybrid seismic surveying, most interpretation ambiguities are eliminated. Critical weakness zones of deconsolidated rock due to severe erosion and tectonic faulting are identified in a reliable manner. By using the appropriate recording instrumentation, the data acquisition of the two methods can be performed in one single

¹GeoExpert SA, CH-1213 Petit-Lancy; tél.: +41 (0)22 344 81 02.

E-mail: ph.corboz@geoexpert.ch

²GeoExpert AG, CH-8424 Embrach; tél.: +41 (0)71 652 60 70.

E-mail: w.frei@geoexpert.ch

field operation, which results in a significant reduction in time and costs for the field crews. Four case studies in the field of natural hazard assessments are presented, in which hybrid seismic surveying is instrumental for the identification of rock and soil instabilities in the subsurface.

Keywords: Hybrid seismic, weathering zones, bedrock surface, fault, natural hazards.

INTRODUCTION

Les relations directes entre d'une part les vitesses des ondes P de compression et des ondes S de cisaillement et d'autre part la qualité de la roche sont documentées dans la littérature (BARTON 2006). Bien que ces relations soient connues par les spécialistes en géomécanique, l'application systématique et en temps opportun de la prospection par sismique hybride à haute résolution pour la détection de zones d'ameublissement pour prévenir ou diagnostiquer les dangers naturels n'est pas encore partie intégrante des programmes de caractérisation de site.

DÉFINITION DE LA SISMIQUE HYBRIDE

La méthode d'exploration sismique la plus pertinente pour résoudre les études de cas dans le domaine environnemental est celle de la sismique hybride. Elle se base sur la combinaison des deux procédés de propagation d'ondes acoustiques les plus appliqués: la sismique réflexion et la sismique réfraction.

A l'aide de la sismique réflexion, les limites stratigraphiques et les caractéristiques tectoniques sont imagées par des signaux sismiques émis depuis la surface et réfléchis aux différentes interfaces dans une direction subverticale. La section sismique qui en résulte a l'apparence d'une image similaire à une radiographie qui décrit les structures souterraines de façon détaillée, aussi en grandes profondeurs (figure 1).

Les informations proches de la surface (< 50 m) issues de l'analyse de vitesses durant le traitement des données de la sismique réflexion ne sont pas suffisamment précises pour être utilisées à des fins géotechniques. Une façon plus adéquate d'extraire la distribution des vitesses des ondes P dans le sous-sol passe par l'inversion tomographique des ondes de réfraction. Cette méthode permet d'obtenir le champ des vitesses sismiques en analysant les temps des premières arrivées des ondes réfractées aux différentes interfaces. La figure 2 montre le chemin parcouru par une onde sismique de réfraction après avoir plongé dans le sous-sol. Selon l'angle d'incidence sur la limite entre deux couches, une partie de l'énergie sonore se propage le long de la limite de couche en tant qu'onde réfractée et remonte depuis cette limite jusqu'à la surface.

Aussi bien la sismique réflexion que la sismique réfraction par inversion tomographique ont, en tant que procédé individuel, leurs avantages et inconvénients selon le cas à résoudre, résumés dans le tableau 1.

Lors du traitement de données de sismique réflexion, plusieurs étapes sont nécessaires afin d'obtenir une coupe profondeur du sous-sol (SHERIFF 2002). Après mise en géométrie des traces sismiques, celles-ci sont éditées en fonction de leur qualité. Selon la topographie du site, des corrections statiques sont appliquées avant d'améliorer la qualité du signal par

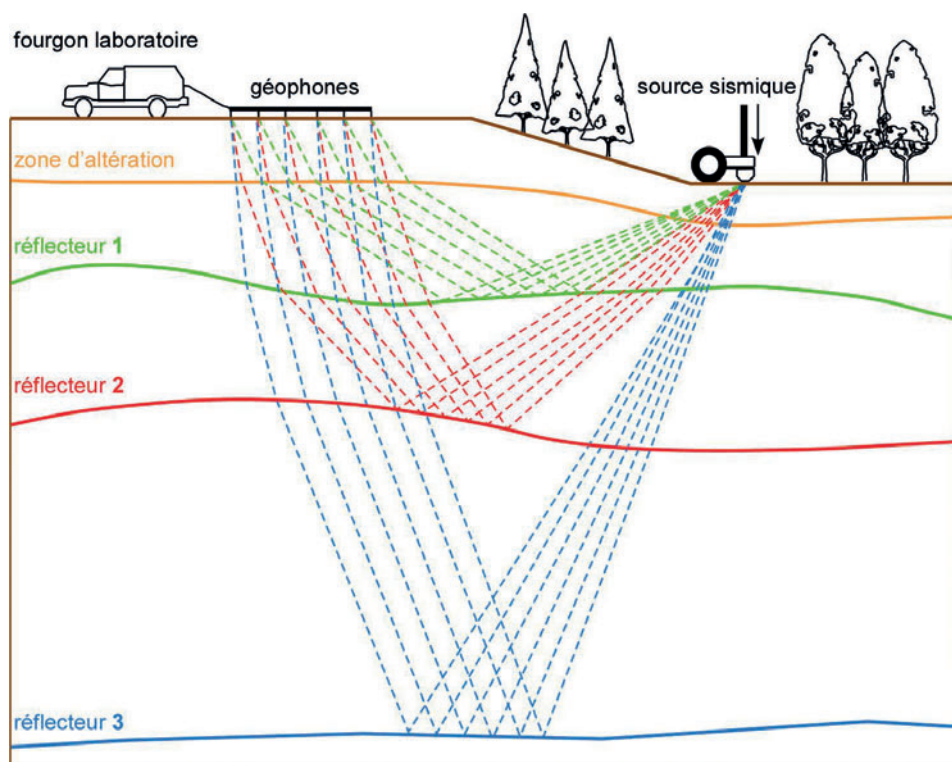


Figure 1.—Dispositif d'acquisition par sismique réflexion avec la propagation des ondes qui en résultent.

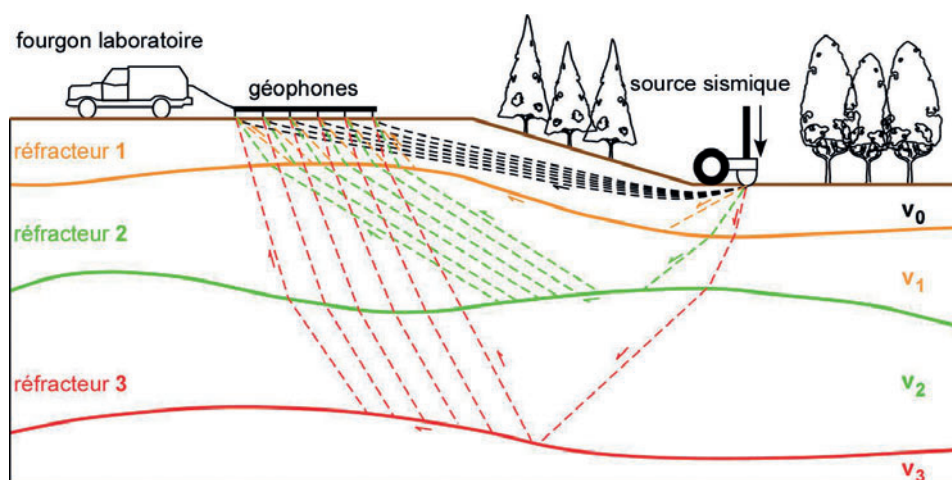


Figure 2.—Dispositif de mesure et propagation des ondes pour la sismique réfraction.

Tableau 1. – Comparaison des avantages et inconvénients des différentes méthodes sismiques.

	sismique réflexion	sismique réfraction
Capacité de résolution en faible profondeur (< 10 m)	limité	bon
Capacité de résolution en grande profondeur (> 40 m)	bon	mauvais
Profondeur d'investigation	élevé	limité
Indice de compacité du rocher / rippabilité (rippability)	mauvais	bon
Détection d'inversions de vitesse (hidden layers)	mauvais	bon
Détection de zones de failles / ruptures	bon	limité

rapport au bruit à l'aide de filtres de fréquence ou de vitesse par exemple. Une analyse de vitesse est ensuite effectuée pour déterminer la vitesse des réflexions sous forme d'hyperboles ce qui permet d'appliquer la correction due aux différences de temps de parcours des ondes pour chaque point-milieu commun (CMP: Common-Mid-Point). Une fois la sommation (*stacking*) en couverture multiple effectuée, l'image obtenue peut-être migrée ou convertie de temps (*time section*) en profondeur (*depth section*) pour obtenir l'image finale.

La méthode de traitement par réfraction tomographique (tomographie des ondes plongeantes, *diving wave* ou *curved ray path tomography*) permet de dériver le champ de gradient de la répartition des vitesses, aussi pour des situations géologiques complexes. Par rapport aux dérivations classiques de modèles de sismique réfraction, les résultats des procédés tomographiques (LECOMTE 2000) ne sont plus soumis aux influences subjectives et, par conséquent, améliorent la précision. Le champ de vitesse sismique représente directement la distribution de la solidité de la roche dans le sous-sol, ce qui facilite l'identification de zones fracturées et de formations rocheuses. L'inversion des données se déroule en deux étapes par dérivation analytique d'un modèle initial pour la distribution des vitesses (procédé CMP tridimensionnel) suivi d'une modélisation itérative d'éléments finis (WHITE 1989).

Bien qu'ils proviennent du même jeu de données, les résultats de la sismique réflexion et réfraction sont totalement indépendants les uns des autres. La juxtaposition adéquate de ces deux résultats pour l'interprétation restitue une image où les avantages d'une méthode compensent les inconvénients de l'autre. La pertinence des résultats est ainsi nettement améliorée.

La juxtaposition s'effectue par superposition transparente du champ de vitesses des ondes de réfraction sur la coupe de sismique réflexion, ce qui permet une corrélation directe des résultats des deux méthodes.

APPLICATIONS EN DANGERS NATURELS

La sismique hybride à haute résolution appliquée au domaine des dangers naturels s'avère adéquate pour identifier le toit du rocher ou déterminer l'étendue d'une zone d'ameublissement en cas de glissement de terrain ou de construction souterraine en terrain supposé instable. En milieu karstique, les caves, les dolines et les failles tectoniques peuvent également être mises en évidence.



Figure 3.—Affaissement de la route de l'Arlberg proche de Strengen (Tyrol).

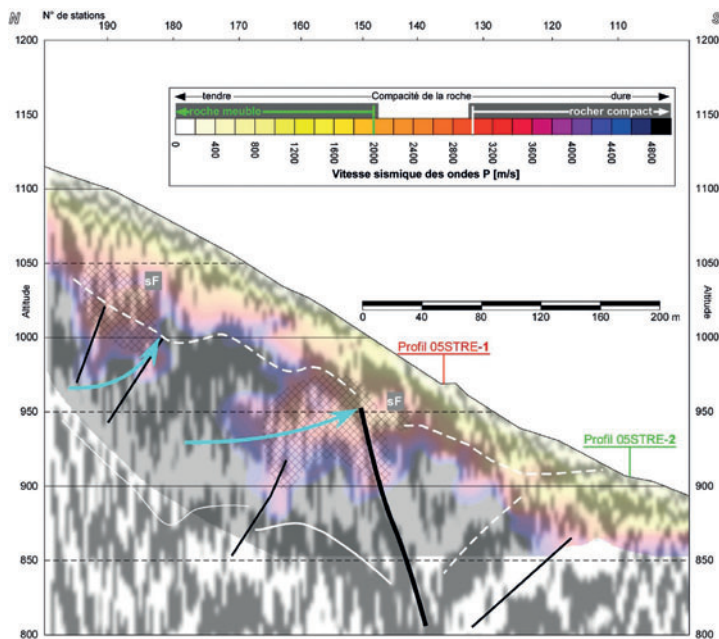


Figure 4.—Interprétation de la coupe de sismique hybride sur la pente instable. Les failles (traits noirs) qui perturbent la continuité des réflecteurs (traits blancs) sont à mettre en corrélation avec des zones d'ameublissement (quadrillage) mises en évidence par de faibles vitesses sismiques. Les aménagements d'eau supposés sont représentés par des flèches; le symbole «sF» signifie la présence de masse rocheuse «flottante».

Glissement de terrain

Suite à de fortes pluies survenues fin août 2005, une section longue de 300 m de la route de l'Arlberg (Tyrol) a progressivement glissé de 8 m pendant trois mois (figure 3).

Le but de l'étude sismique hybride est non seulement de déterminer le cours du toit du rocher mais également de détecter en faible profondeur les zones d'ameublissement à la perméabilité élevée et de cartographier les zones de failles et les discontinuités qui contribuent à la venue d'eau dans la zone de glissement (figure 4).

L'ensemble des résultats de l'étude sismique a permis de dresser un plan de l'étendue des failles sur la zone de glissement et ainsi de prendre les mesures adaptées pour la remise en place et l'entretien de la route.

Construction en roche meuble

Dans le cadre de la construction d'une nouvelle conduite forcée d'une usine hydroélectrique, l'étude sismique a pour but de cartographier le toit du rocher. Même si le tracé prévu se situe dans de la molasse compacte, la présence de roche meuble et moins stable n'est pas exclue par le maître d'œuvre.

Les deux profils mesurés dans le cadre de cette étude sismique ont mis en évidence les zones de roche meuble à risque d'un point de vue géotechnique pour la construction de la conduite souterraine (figure 5).

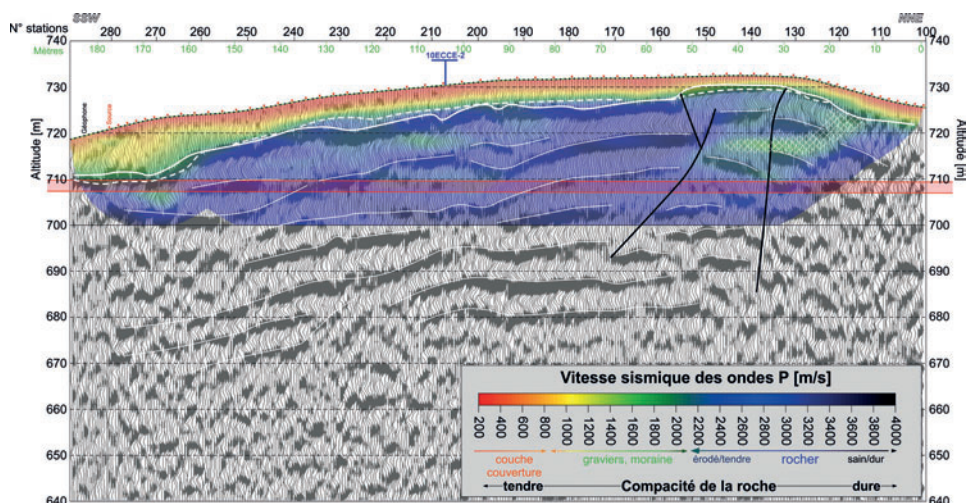


Figure 5.—Coupe de sismique hybride interprétée, dans l'axe de la conduite prévue (alt. 710 m). La ligne blanche supérieure indique le toit du rocher. Celui-ci est mis en évidence aussi bien par le champ de vitesse issu de la sismique réfraction que par l'image structurale de la sismique réflexion. Les lignes blanches fines indiquent les limites de couche et une zone d'ameublissement au toit du projet (quadrillage). En noir, les principales failles sont nettement visibles.

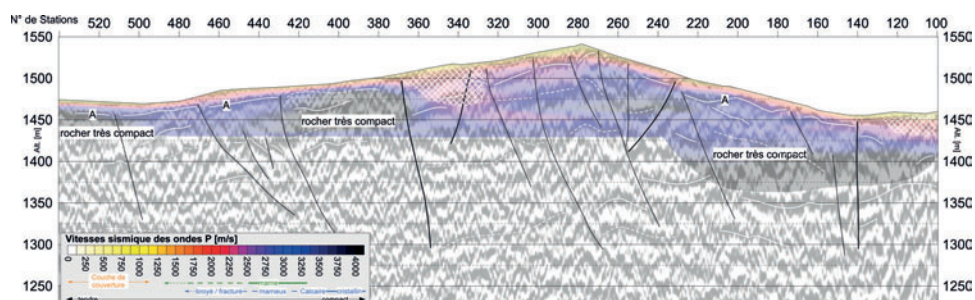


Figure 6.—Coupe de sismique hybride en terrain karstique. L'interprétation indique le toit du rocher compact (ligne blanche «A») identifié sur tout le profil de façon discontinue. De nombreuses failles (traits noirs) sont visibles ainsi que des zones d'ameublissement (quadrillage) à mettre en relation avec la présence de dolines en surface et de cavités karstiques.

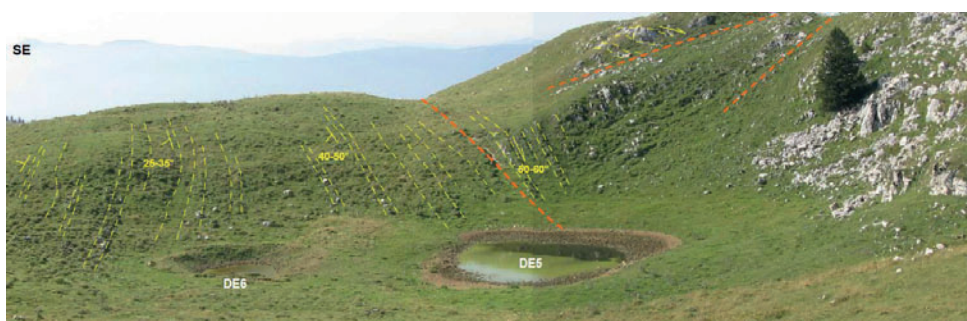


Figure 7.—Vue d'une partie de la zone d'investigation en milieu karstique (dolines DE5 et DE6, failles). Les observations géologiques de terrain ont pu être corrélées avec les résultats des mesures sismiques.

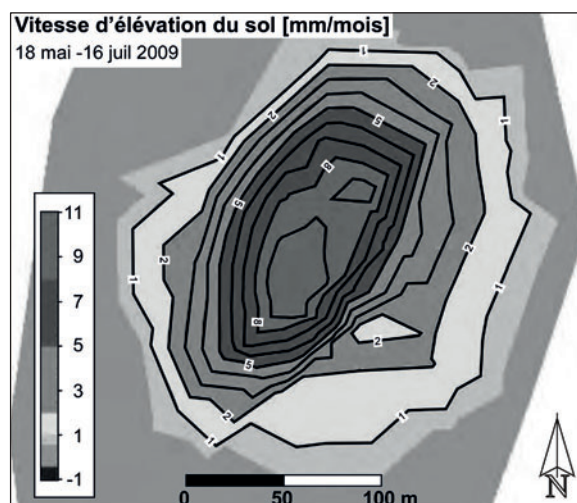


Figure 8.—Carte de la vieille ville de Staufen concernée par le soulèvement du sol indiqué par des isolignes d'élévation. Les profils sismiques recoupent cette zone d'élévation.

Risque de cavités karstiques

Sur les crêtes du Haut-Jura, des mesures de sismique hybride sont effectuées en vue de la construction d'un barrage. Dans ce but, il s'agit de déterminer les structures principales dans le rocher (failles, karst) et la présence, le cas échéant, de zones d'ameublissement.

Suite aux mesures sismiques, un géologue familiarisé avec le terrain investigué a pu confirmer l'interprétation géophysique (figure 6) et la compléter avec ses observations de terrains (figure 7). Les informations fournies par l'étude sismique a permis ainsi d'obtenir un modèle géologique précis concernant les grandes structures tectoniques et karstiques.

Soulèvement du sous-sol

La ville de Staufen-en-Brigau (Bade-Wurtemberg, Allemagne) a mandaté une étude de sismique hybride pour cartographier des zones de failles dans le centre historique de la ville suite à un soulèvement du sol (figure 8). Ce phénomène serait apparu suite à des forages (pour l'installation de sondes géothermiques) ayant causé l'infiltration d'eau dans une couche d'anhydrite puis le gonflement de celle-ci au contact de l'eau. Les nombreuses mesures menées depuis 2008 et les tentatives pour comprendre cette catastrophe sont détaillées dans le rapport publié par le district de Fribourg-en-Brigau (REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG 2010).

Les résultats de l'étude sismique (figure 9 et figure 10) ont été intégrés dans un modèle géologique 3D qui tente de décrire les processus qui ont conduit au soulèvement du sol en vieille ville de Staufen.

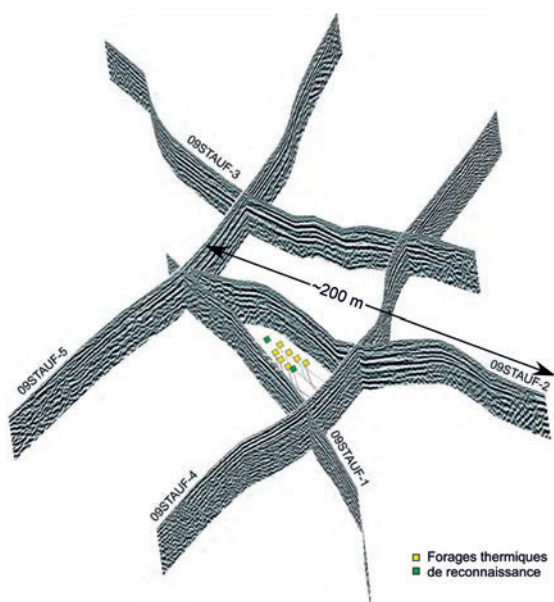


Figure 9.—Les cinq profils sismiques d'une longueur totale de 1400 m acquis à Staufen sont représentés en 3D.

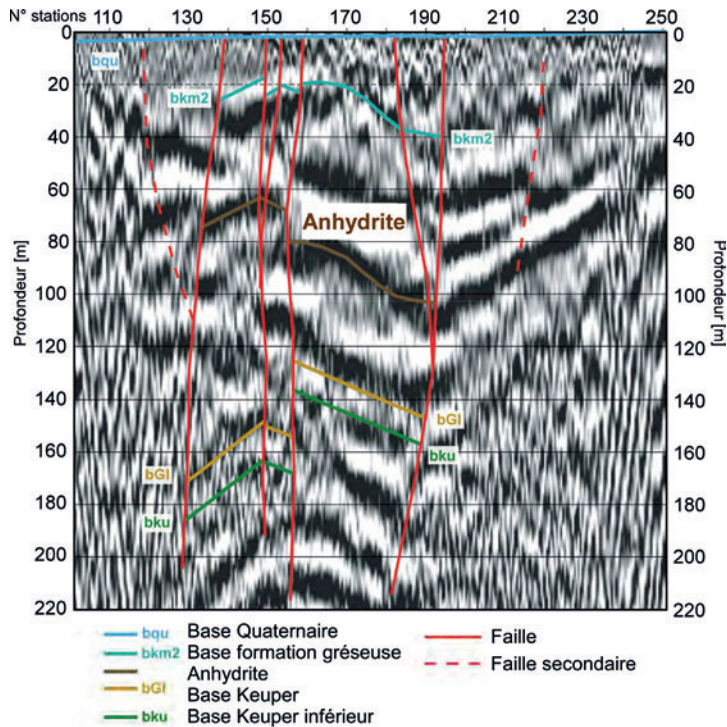


Figure 10.–La sismique réflexion à travers la vieille ville de Staufen fait apparaître plusieurs failles dans des formations très perturbées.

CONCLUSION

Afin d'évaluer la situation géotechnique au stade préliminaire d'un programme de caractérisation de site, la méthode de prospection par sismique hybride s'avère être un choix approprié au vu des résultats obtenus dans les différents exemples présentés ci-dessus.

De plus, la sismique hybride se révèle un outil performant permettant d'évaluer la situation dans des terrains instables aussi bien avant qu'après l'occurrence d'un événement naturel dangereux.

RÉFÉRENCES

- BARTON N., 2006. Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy. Taylor & Francis, UK & Netherlands. 729p.
- LECOMTE I., JOYSDAL H., DAHLE G.A. & PEDERSEN O.C., 2000. Improving modeling and inversion in refraction seismics with a first-order Eikonal solver. Geophysical Prospecting, volume 48, pp. 437-454.
- REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG, 2010. Geologische Untersuchungen von Baugrundhebungen im Bereich des Erdwärmesondenfeldes beim Rathaus in der historischen Altstadt von Staufen i. Br. Az.: 94-4763//10-563, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, 302p.

- SHERIFF E. R., 2002. Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics. Fourth Edition, Soc. Expl. Geophys. 429p.
- WHITE D. J., 1989. Two-Dimensional Seismic Refraction Tomography. *Geophysical Journal International*, volume 97, Issue 2, pp. 223–245.