



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC

Office fédéral de l'énergie OFEN
Recherche énergétique

Rapport final

Exploration géophysique dans l'agglomération de Lausanne pour projet géothermique





Date : 18.10.2017

Lieu : Lausanne

Mandant :

Office fédéral de l'énergie OFEN
Programme de recherche R&D
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Cofinancement :

Direction de l'énergie du Canton de Vaud (DGE-DIREN)
Rue du Valentin 10, CH-1014 Lausanne

Mandataires :

Services industriels de Lausanne
Place Chauderon 23, CH-1003 Lausanne
www.lausanne.ch/sil

Auteurs :

Francesco Barone, Services industriels de Lausanne
francesco.barone@lausanne.ch

Responsable de domaine de l'OFEN : gunter.siddiqi@bfe.admin.ch

Chef de programme de l'OFEN : cweber@focus-e.ch

Numéro du contrat de l'OFEN : SI/501359-01

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

Office fédéral de l'énergie OFEN

Mühlestrasse 4, 3063 Ittigen, Adresse postale : 3003 Berne
Tél. +41 58 462 56 11 · fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.ofen.admin.ch



Sommaire

Sommaire	3
Résumé	5
Summary	5
Annexes.....	6
1. Introduction.....	7
2. Objectifs de l'étude.....	9
3. Planning	9
4. Autorisations.....	10
5. Vibrosismique.....	11
5.1 Le principe	11
5.2 Vibrateur	12
5.3 Géophone.....	13
5.4 Sismographe	14
5.5 Test pré-acquisition	14
6. Contrôle des vibrations.....	15
6.1 Introduction	15
6.2 Application au chantier	15
6.3 Monitoring	16
7. Résultats	16
8. Sécurité	21
9. Communication et médias.....	22
10. Conclusions	23
11. Suite des travaux.....	24
12. Remerciements	24





Résumé

Ce projet concerne la réalisation d'une campagne sismique (30 à 40 km de lignes) pour obtenir les informations nécessaires (accidents géologiques, profondeur de différentes couches géologiques) afin de vérifier l'intérêt de réaliser un forage géothermique de moyenne ou grande profondeur dans l'agglomération lausannoise. Cette campagne sismique s'est concentrée sur la prospection du sous-sol de l'Ouest lausannois, jusqu'à des profondeurs d'environ 4-5 km.

L'acquisition de données avec les moyens employés a permis d'atteindre les objectifs fixés, soit d'améliorer la connaissance du sous-sol par l'identification des différentes couches géologiques et de quelques accidents géologiques, certains hypothétiques d'autres plus clairement visibles.

Ces informations seront très utiles afin de définir les cibles prioritaires pour la réalisation d'un forage de moyenne ou grande profondeur.

Summary

The project is about a seismic survey (from 30 to 40 km total length of lines) to obtain the necessary information (geological accidents, depth of various geological layers) to verify the interest of drilling a medium-depth geothermal borehole in the Lausanne area.

The aim of this seismic survey is the exploration of the Western Lausanne's basement, up to about 4-5 km depth.

The survey allowed to reach the objectives, namely the improvement of the lithostratigraphy image by the identification of the different geological layers and faults, some of them being hypothetical and others more clearly visible.

These results will be very useful for the definition of the priority area to investigate and to define a target for a drilling in the medium depth or deeper target in the future.



Annexes

Annexe 1 : spécifications techniques des camions vibreurs

Annexe 2 : spécifications techniques des géophones

Annexe 3 : spécifications techniques des sismographes

Annexe 4 : rapport sur les tests et choix des paramètres d'acquisition



1. Introduction

En 2011, le Conseil Fédéral et le Parlement suisse ont pris la décision de principe pour la sortie progressive de l'énergie nucléaire. Le 21 mai 2017, cette décision de principe a été confirmée par la votation populaire de la nouvelle Loi sur l'Energie dont le projet a été accepté par le peuple suisse. Cette décision nécessite une transformation radicale du système énergétique suisse d'ici 2050. Pour ce faire, le Conseil Fédéral mise entre autres mesures sur l'exploitation des potentiels existants en matière d'énergie renouvelable. Une intensification de l'utilisation de l'énergie géothermique fait partie des stratégies prometteuses pour assurer cette transition.

La Municipalité de Lausanne a ratifié la Convention des maires pour la promotion de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables lancée à l'initiative de la Commission Européenne le 10 février 2009. Lausanne s'est ainsi engagée à atteindre pour l'ensemble du territoire communal d'ici 2020 les objectifs dits des « 3x20 » : augmentation de 20 % de l'efficacité énergétique, réduction de 20 % des émissions de CO₂ et atteinte d'une part de 20 % de sources renouvelables dans le mix énergétique global.

L'exploration du sous-sol profond représente une étape déterminante pour vérifier l'intérêt de réaliser des projets géothermiques.

Le présent rapport porte sur la campagne de prospection géophysique par sismique réflexion effectuée en juillet 2016 sur le territoire de l'agglomération lausannoise.

Les campagnes de prospection géophysique menées au XXe siècle visaient à trouver du gaz ou du pétrole, ressources qu'il n'est pas envisageable d'exploiter dans un contexte urbain. Les zones d'agglomération n'ont donc pas fait l'objet de campagnes de ce type. L'agglomération lausannoise ne fait pas exception. En matière de connaissance du sous-sol profond, elle correspond à une tache aveugle : les lignes sismiques explorées s'arrêtent en bordure d'agglomération.



Figure 1: état des lignes sismiques avant la prospection SiL-2016 (source : ARConseil)



Pour y remédier, les SiL ont proposé d'explorer le sous-sol avec 4 lignes d'environ 10 kilomètres chacune (LS-01 à 04), disposées selon le plan ci-dessous:

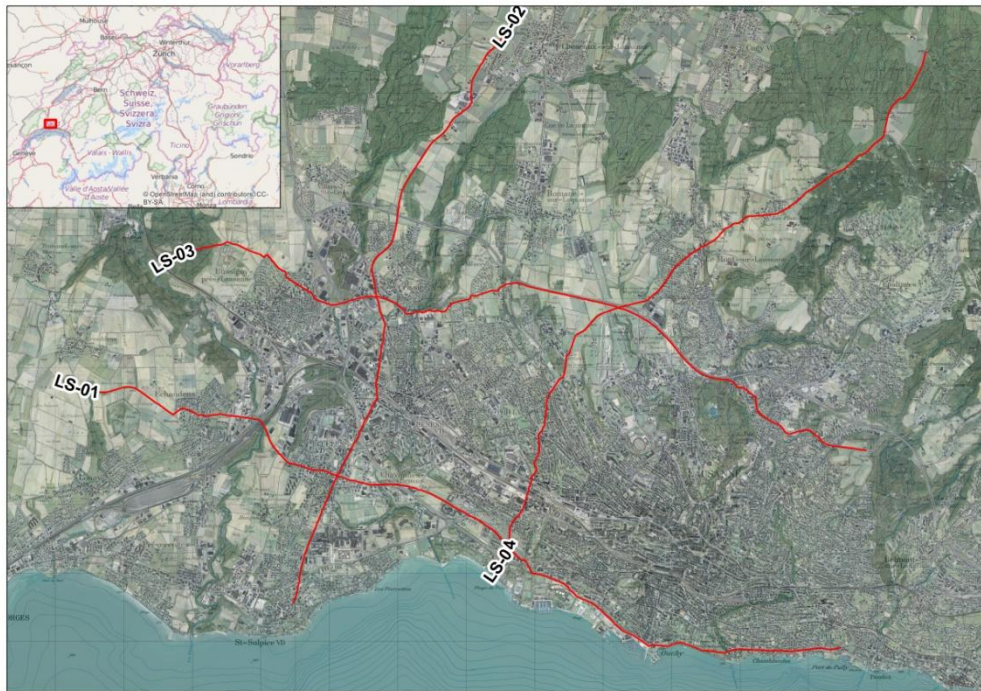


Figure 2: lignes sismiques de la prospection SiL-2016 (source : Geo2X SA)

Pour permettre une bonne interprétation, les lignes d'une campagne géophysique doivent se croiser de manière orthogonale, recouper ou prolonger d'anciennes lignes déjà connues et recouper de manière orthogonale également les lignes de failles (accidents géologiques) supposées. La proposition ci-dessus a été élaborée par le géologue conseil des SiL sur ces bases.

Les aspects techniques relatifs aux méthodes d'acquisition et les résultats de cette campagne ainsi que les recommandations pour des campagnes futures, en milieux urbains, seront traités dans le cadre de ce rapport.



2. Objectifs de l'étude

Les acquisitions sismiques prévues par cette campagne, avaient comme objectif d'améliorer la connaissance de la géologie locale, sous l'agglomération lausannoise, en particulier de localiser les roches compétentes et les zones de failles, qui constituent des cibles préférentielles pour des projets géothermiques.

Cette étude s'insère dans une phase préliminaire de prospection visant à estimer le potentiel des ressources géothermiques, en déterminant la litho-stratigraphie et en précisant le positionnement des accidents tectoniques sur une profondeur allant jusqu'à 4-5 km.

3. Planning

L'ensemble de l'acquisition s'est déroulé sur environ 2 semaines dans de très bonnes conditions météorologiques et sans accident, selon le planning prévisionnel.

Ci-dessous est reporté le tableau résumant l'avancement des travaux :

Date	Réalisation
06.06.16	Démarrage de l'implantation topographique et du permittage auprès des privés
03.07.16	Journée de présentation publique du projet à Bellerive
04.07.16	Mobilisation et tests des paramètres d'acquisition
04-05.07.16	Acquisition de la ligne LS-02
06-07.07.16	Acquisition de la ligne LS-04
08-09.07.16	Acquisition de la ligne LS-01
11-12.07.16	Acquisition de la ligne LS-03
14.07.16	Démobilisation des équipes et du matériel

Tableau 1: avancement des travaux d'acquisition sur les 4 lignes sismiques

Cependant, l'acquisition des profils sismiques, tout en restant l'étape emblématique de ce projet, ne représente que la phase finale d'un projet qui s'est finalement déroulé sur plusieurs mois.

Seules les opérations sur l'autoroute ont été pénalisées par des consignes reçues en dernière minute de la DGMR (Direction Générale de la Mobilité et des Routes), qui avait pourtant été informée et avait donné son autorisation. En conséquent, la partie finale de la ligne LS-03 n'a pas pu être acquise sur environ un kilomètre et une partie des données, particulièrement en proche sub-surface, est manquante.

Les arguments qui plaident en faveur d'un chantier d'acquisition durant la saison estivale sont multiples. En effet, de manière générale, en période estivale la circulation et donc la perturbation induite par un tel chantier sur le trafic est limitée. En outre, la pluie, qui pourrait perturber les mesures des vibrations est aussi plus rare en été.

La figure ci-dessous résume graphiquement les étapes du projet, qui ont été menées parfois en parallèle afin de pouvoir réaliser la campagne durant l'été :

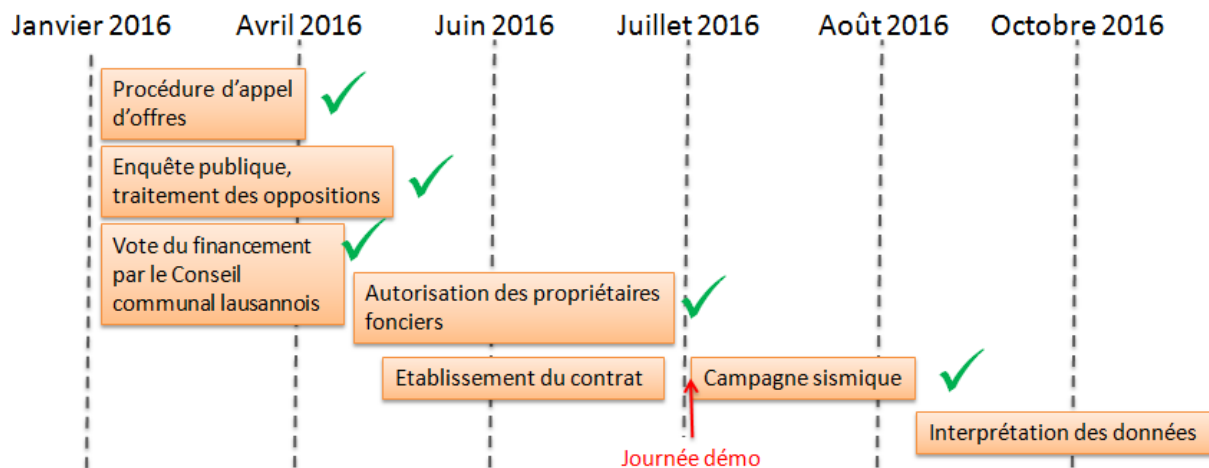


Figure 3: planning prévisionnel et avancement des travaux

4. Autorisations

S'agissant d'une campagne de prospection en sous-sol, le Canton de Vaud, qui est le propriétaire du sous-sol, a été consulté très en amont du chantier.

Les méthodes de prospection sont les mêmes que pour la recherche d'hydrocarbures, par analogie, le cadre légal qui s'applique est celui de la Loi sur les hydrocarbures (LHydr), qui prévoit une mise à l'enquête du projet, bien qu'il s'agisse d'une méthode de prospection non invasive.

Ci-dessous est reporté schématiquement le parcours administratif de la demande jusqu'à l'obtention de l'autorisation de prospection :

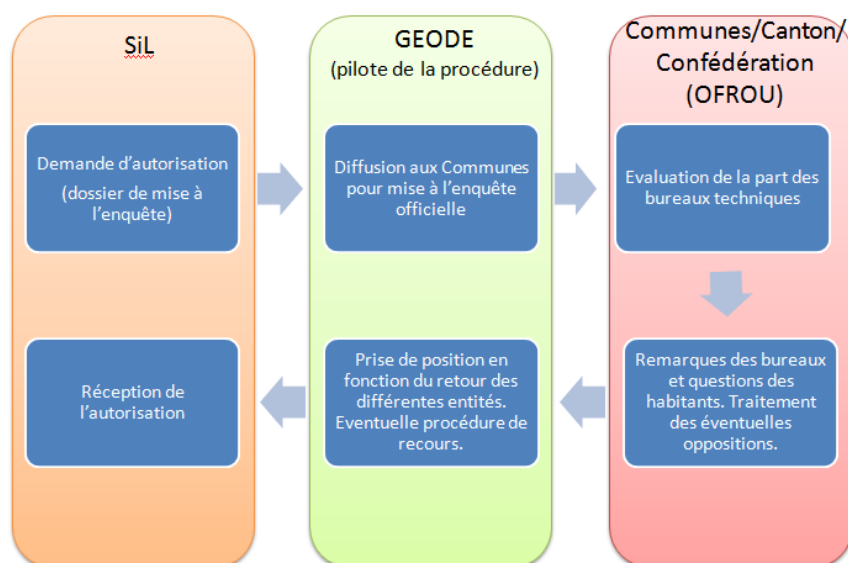


Figure 4: organisation et déroulement de la mise à l'enquête



L'Office Fédéral des Routes a également été consulté dans le cadre de cette mise à l'enquête car une partie du parcours des camions, sur la ligne LS-3, était prévue sur l'autoroute.

Avant la mise à l'enquête et comme reporté sur le planning au chapitre précédent, des présentations visant à informer les communes concernées ont été faites en début d'année 2016. Nous avons pu également profiter de certaines séances de coordination techniques intercommunales pour présenter les aspects plus techniques et pratiques de mise en œuvre de ce chantier.

Sur demande du Canton, une demande formelle d'autorisation de traverser les parcelles, privées et communales, avec les camions vibreurs a également été faite avant la mise à l'enquête, qui s'est déroulée selon les attentes. Seules deux oppositions ont été déposées et ont aussi été retirées suite à des échanges entre les SiL, les mandataires des SiL et les opposants, qui demandaient principalement à être rassurés par rapport aux éventuels dégâts.

Des demandes ultérieures d'autorisation sur des parcelles privées ont été faites par le mandataire des SiL afin d'avoir l'autorisation de positionner les géophones (instruments de mesure, traités au chapitre suivant) sur certaines parcelles privées. L'ensemble des propriétaires concernés a donné son accord. Des arrangements ont pu être trouvés avec les exploitants des quelques rares parcelles agricoles traversées pour l'implantation des géophones uniquement.

5. Vibrosismique

5.1 Le principe

Afin d'imager le sous-sol, la méthode de prospection faisant recours à la sismique représente l'une des méthodes le plus fréquemment utilisée en milieu sédimentaire, qui correspond au contexte géologique de l'agglomération lausannoise. Cette méthode consiste à envoyer dans le sous-sol, à plusieurs reprises, des ondes sismiques d'une durée de quelques secondes, générées par camions vibreurs, puis à « écouter » avec des géophones les ondes qui se réfléchissent sur les différentes couches géologiques. Suite à chaque « tir », série d'ondes envoyées, les camions se déplacent sur la ligne d'une distance définie au préalable en fonction de la résolution voulue, et envoient une nouvelle série d'ondes sismiques.

Le principe est résumé schématiquement par l'image suivante :

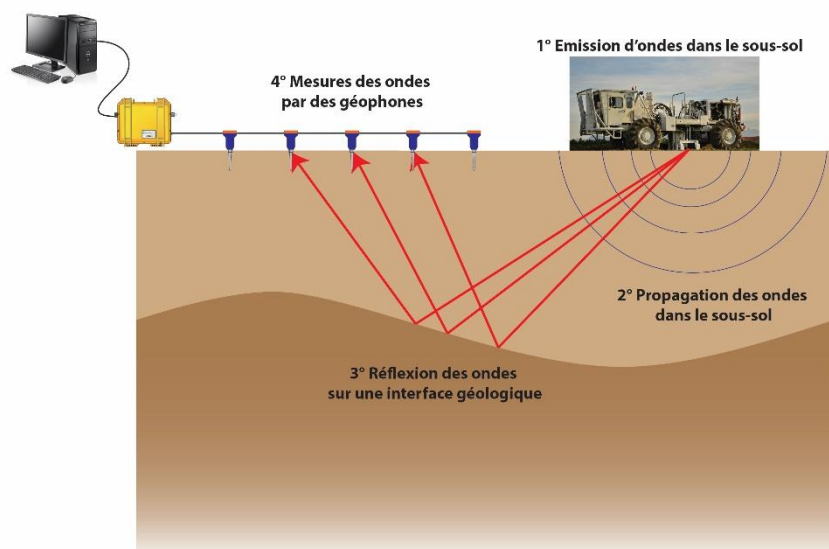




Figure 5: principe de la prospection sismique (source: SiL)

Comme expliqué précédemment, suite à l'émission des ondes sismiques, les camions se déplacent afin de générer une nouvelle série d'ondes sismiques. Idéalement, les dispositifs permettant l'enregistrement des ondes sismiques réfléchies (les géophones) devraient se trouver sur tout le territoire à prospecter. Pour des questions économiques et de logistique, il n'est pas possible d'instrumenter tout le territoire.

S'agissant de la campagne lausannoise, le choix s'est porté sur une prospection en deux dimensions (le long d'une ligne), qui consiste à disposer les géophones le long des parcours des camions. Leur nombre a été optimisé en fonction des objectifs de la campagne.

La figure ci-dessous représente la géométrie d'acquisition employée pour cette campagne :

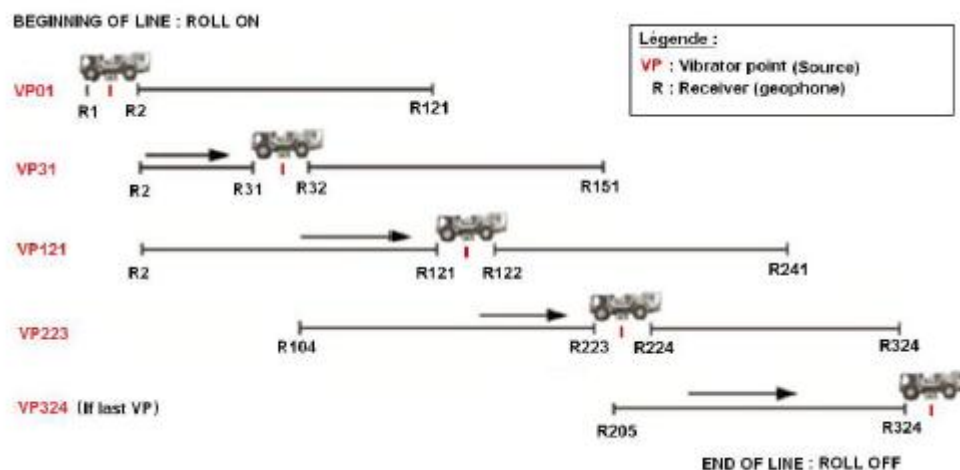


Figure 6: géométrie d'acquisition (source : Geo2X SA)

Pour cette campagne, au début de la ligne, la ligne active était constituée de 120 géophones, qui se trouvaient « devant » la source. En fonction de l'avancement des camions, les géophones ont été déplacés afin de garantir une ligne active d'environ 6 km en amont et en aval de la source, c'est-à-dire avec un écartement entre géophones de 25 m.

5.2 Vibrateur

L'objectif de cette campagne consistait à imager le sous-sol jusqu'à une profondeur de 4 à 5 km. Pour ce faire, deux vibrateurs IVI mark 4 ont été employés. Ce type de vibrateur a été choisi, car il possède un peak force de 48'000 livres (24 tonnes), ce qui le rend à même de travailler en environnement urbain ou périurbain, tout en garantissant une profondeur d'investigation suffisante pour les objectifs requis.



Figure 7: exemple de camion vibreur (source : Geo2X SA)

Les spécifications détaillées de ce vibreur sont fournies en annexe 1.

5.3 Géophone

Les géophones sont des instruments qui permettent de mesurer en surface les vibrations qui remontent après réflexion sur les différentes couches du sous-sol.

On emploie en général des « bretelles » de géophones (6 par bretelle dans ce cas) qui sont déployées sur quelques mètres dans le but d'augmenter le rapport signal/bruit et d'atténuer les ondes de surface ainsi que les effets locaux.



Figure 8: une bretelle de géophones implantée lors de la campagne SiL-2016 (source : Geo2X SA)



Les spécifications des géophones employés se trouvent en annexe 2.

5.4 Sismographe

Pour cette campagne l'entreprise mandatée a investi dans un système d'acquisition sans fil dont les spécifications techniques sont précisées en annexe 3.

Ce choix s'est révélé opportun. En effet, malgré une phase de mise en service et mise au point plus conséquente, ce système a permis de s'affranchir de toutes les problématiques liées au passage de câbles, notamment dans les carrefours, les traversées de voies de tram, etc.



Figure 9: bretelle de géophones reliée a un sismographe sans fils (source : Geo2X SA)

5.5 Test pré-acquisition

Avant de démarrer la « production », il est fondamental de réaliser des tests sur la première partie de la ligne afin de déterminer les bons paramètres, comme par exemple la fréquence et la durée des sweep (vibrations) à utiliser tout au long de la campagne.

La détermination de ces paramètres dépend principalement des conditions géologiques et de l'environnement avoisinant. Le but est de sortir la meilleure image possible du sous-sol.

Dans le cadre de cette campagne, les tests ont été effectués sur la partie nord de la ligne LS-02, à Cheseaux-sur-Lausanne. Un expert géophysicien, M. Rosselli, présent sur site, a participé au choix des tests et à la validation des paramètres d'acquisition. Son rapport est disponible en annexe 4.



6. Contrôle des vibrations

6.1 Introduction

Durant les campagnes de vibrosismique, une source génère des vibrations qui se propagent dans le sous-sol et par extension dans les constructions avoisinantes. Ces vibrations, si elles dépassent un certain seuil, peuvent nuire à l'intégrité des structures (bâtiments, conduites, etc.). Lors de chantiers pouvant provoquer des vibrations (les coups de mines, engins de chantier ou circulation routière par exemple), le respect de la norme SN640-312A, en vigueur en Suisse, permet de limiter les risques d'endommagement aux infrastructures.

Les camions vibrateurs employés dans le cadre de cette campagne sont assimilables à des machines de chantier.

Des distances de sécurité sont calculées sur la base des valeurs indicatives de cette norme et un contrôle des vibrations réelles est effectué lors de toute l'acquisition sismique.

La norme SN640-312A emploie la valeur maximale de la vitesse particulière (valeur maximale du vecteur de vitesse, exprimée en mm/s), comme grandeur déterminante pour apprécier les effets des ébranlements sur le bâti. Le respect de la valeur limite de la vitesse particulière permet de prévenir les dégâts aux infrastructures.

Les valeurs limites de vitesse particulières applicables sont définies en fonction des classes de sensibilité des infrastructures (de « très peu sensible » à « particulièrement sensible »), du nombre de sollicitations (de « occasionnellement » à « en permanence ») et du domaine de fréquence des vibrations (de la basse « 8-30 Hz » à la haute fréquence « 60-150 Hz »).

6.2 Application au chantier

En ce qui concerne le degré de sensibilité des infrastructures, il dépend du type d'infrastructure (pont, galerie, monument historique...), de ses matériaux et de son état de conservation.

En milieu urbain, très dense et construit aussi bien en surface que dans le sous-sol (galeries, canalisations...), une attention particulière a été prise afin de recenser les monuments et les infrastructures souterraines potentiellement critiques.

Par rapport au nombre de sollicitations, les chantiers de vibrosismique sont considérés comme des chantiers mobiles. En tant que tels, le nombre de vibrations est toujours inférieur à 10 pour une infrastructure. Il s'agit donc de sollicitations à considérer, selon la norme, comme « occasionnelles ».

Et finalement, en ce qui concerne le domaine des fréquences, les fréquences émises par les vibrateurs couvrent en général une bande de 8 à 100 Hz. Les valeurs de vitesse particulière les plus élevées sont enregistrées pour les fréquences les plus basses. La classe des fréquences les plus basses (8-30 Hz) a donc été sélectionnée dans le cadre de cette campagne pour l'évaluation de la distance de sécurité.

La prise en compte des paramètres ci-dessous et l'application de la norme SN640-312A ont permis de dresser le tableau suivant :



Sensibilité	Valeur indicative [mm/s]	Distance minimale [m] High Drive	Distance minimale [m] Low Drive
1	45	2	1
2	30	3	1.5
3	15	4.5	2.5
4	7.5	7	3.5

Tableau 2: distances minimales calculées en fonction du degré de sensibilité afin de respecter les valeurs indicatives de vitesse particulaire, selon norme SN640 312a (source : Geo2X SA)

Les vibrations « low drive » correspondent à une puissance diminuée de 50% par rapport aux vibrations « high drive ». Les distances de sécurité sont adaptées à cette puissance diminuée.

La vitesse particulaire changeant d'un milieu à l'autre, les vitesses et distances minimales indiquées ci-dessus sont valables pour ce chantier et éventuellement d'autres qui seraient réalisés dans un même contexte. Il est donc fortement recommandé de faire une vérification préalable avec l'entreprise en charge du chantier pour définir les bons paramètres.

Pour les bâtiments historiques et protégés, la distance minimale a été doublée (15 m) pour éviter tous dommages.

6.3 Monitoring

Afin de vérifier la conformité des vibrations avec les valeurs indicatives présentées ci-dessus, une mesure systématique de la vitesse particulaire maximale sur l'infrastructure la plus proche des vibreurs a été effectuée tout au long de la campagne.

En cas de rapprochement significatif ou de dépassement localisé des valeurs, le chargé du contrôle des vibrations communique immédiatement aux camions la nécessité d'adapter la puissance de la vibration émise.

Ce contrôle est effectué avec un appareil portatif qui est posé au sol et enregistre les vibrations sur trois axes perpendiculaires (longitudinal, transversal et vertical).

La somme des trois axes est considérée comme valeur maximale de la vitesse particulaire.

Les mesures effectuées tout au long de la campagne ont permis de garantir un respect strict de la norme SN640 312a.

7. Résultats

Pour chaque profil sismique plusieurs sections ont été produites, en temps et profondeur (sur l'axe des ordonnées).

Les résultats sont reportés ci-dessous. Pour chaque ligne les sections temps et profondeur sont proposées :

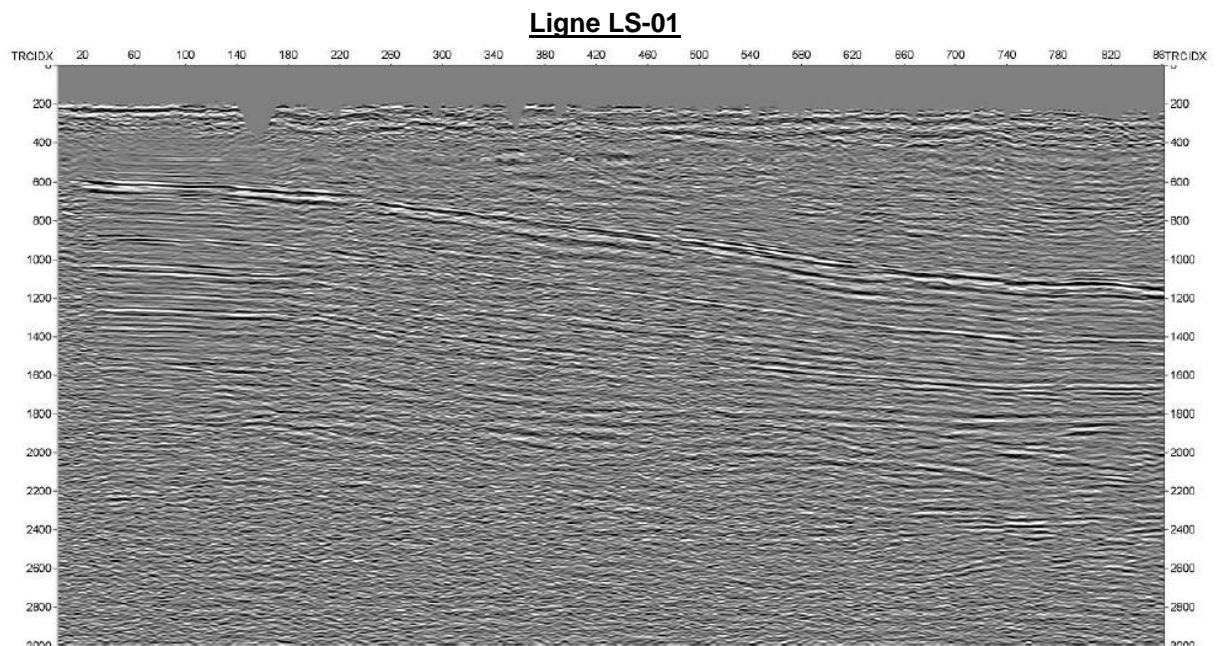


Figure 10: ligne LS-01, temps double

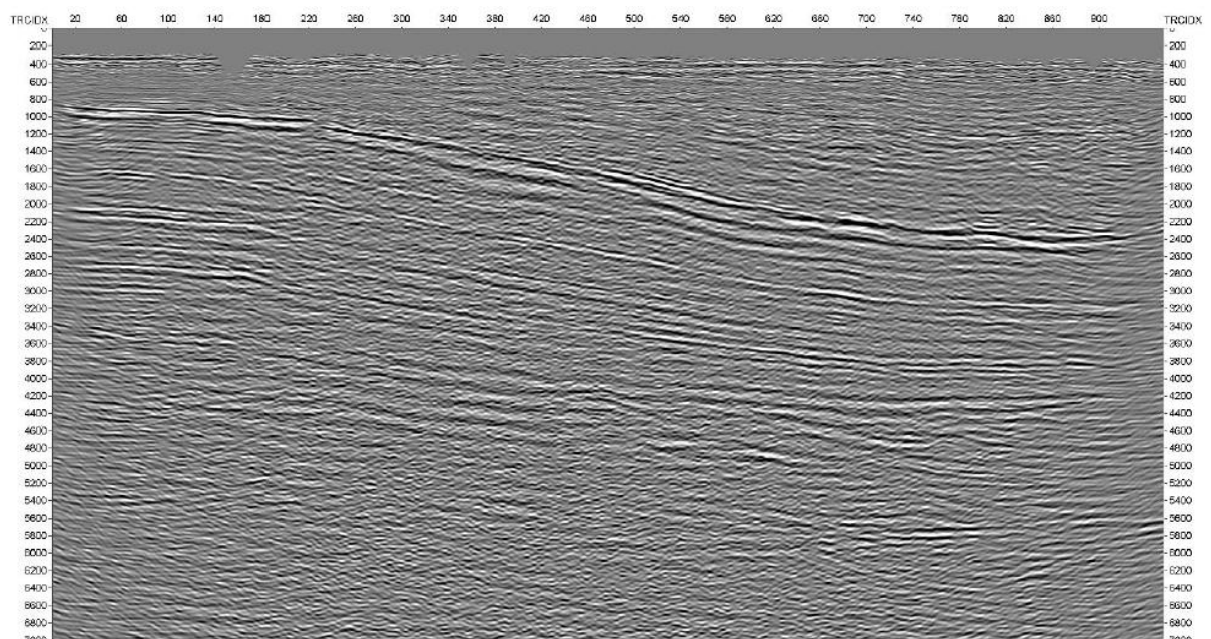


Figure 11: ligne LS-01, profondeur

Cette section présente des réflecteurs très marqués dès 600ms/800m dans sa première partie. Ce premier réflecteur, correspondant sans doute à la base de la Molasse, s'approfondit fortement dans la seconde portion de ce profil. Des réflecteurs sont observables jusqu'à environ 5500 m, soit la base du Mésozoïque qui était l'objectif de cette campagne.

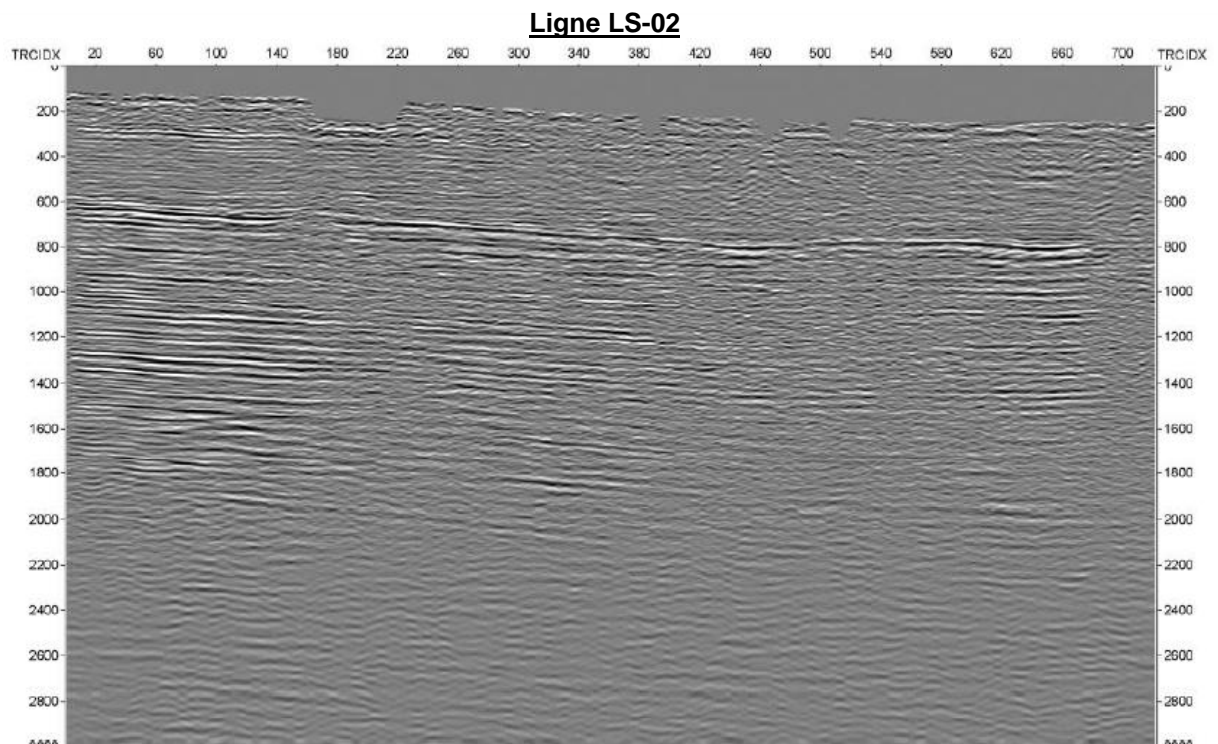


Figure 12: ligne LS-02, temps double

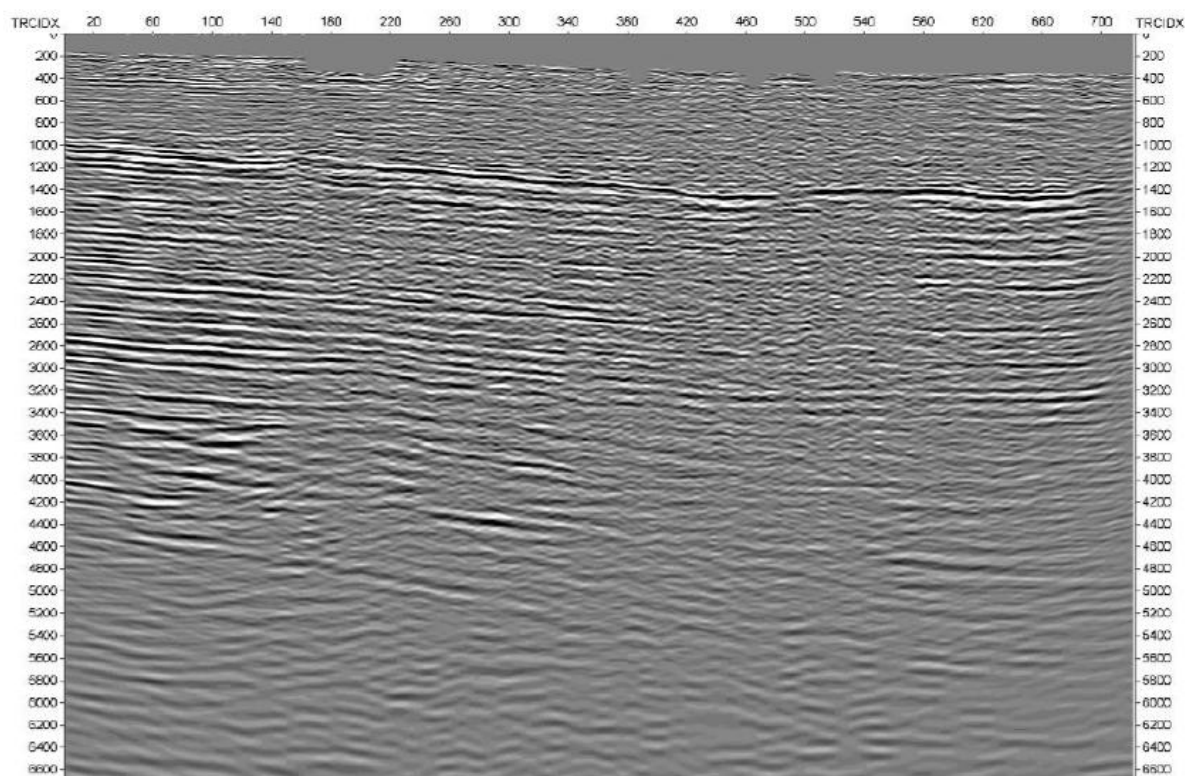


Figure 13: ligne LS-02, profondeur

Cette section présente des réflecteurs très marqués dès 600ms/800m dans sa première partie. Ce premier réflecteur, correspondant sans doute à la base de la Molasse, s'approfondit légèrement dans



la seconde portion de ce profil. Des réflecteurs sont observables jusqu'à environ 5000 m, soit la base du Mésozoïque qui était l'objectif de cette campagne.

Ligne LS-03

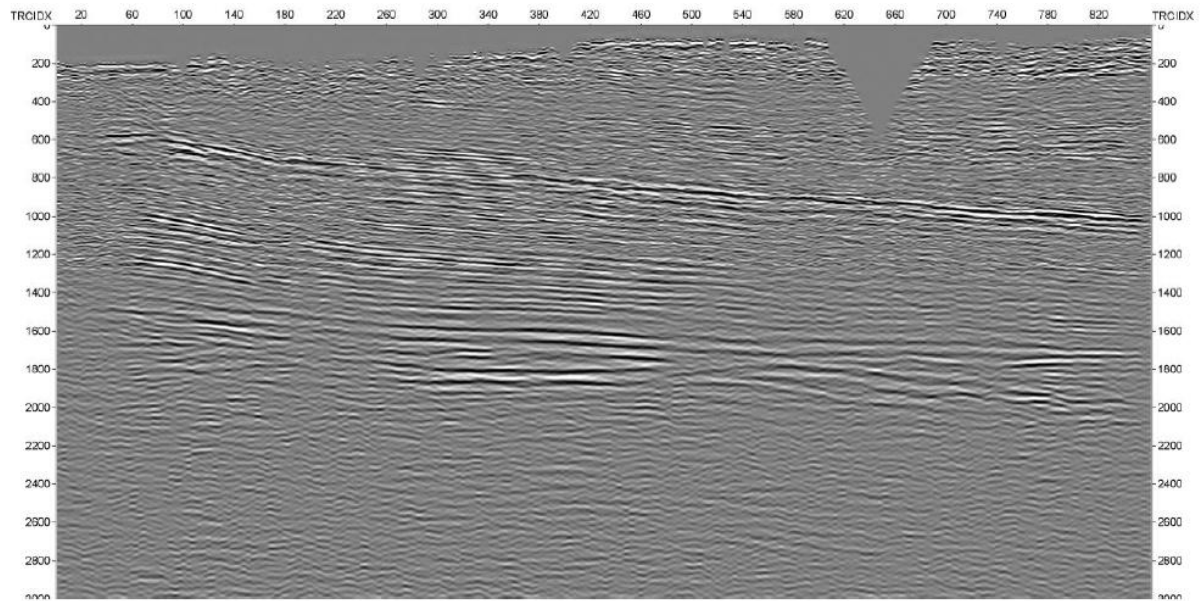


Figure 14: ligne LS-03, temps double

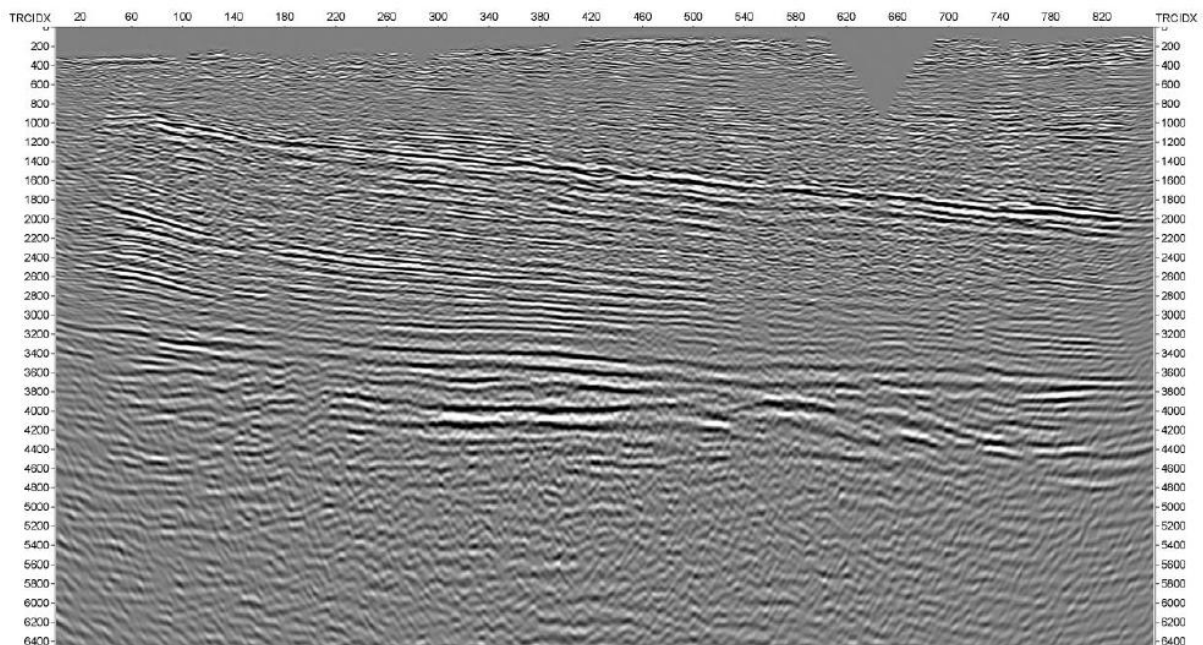


Figure 15: ligne LS-03, profondeur

Cette section présente des réflecteurs très bien marqués dès 600ms/800m dans sa première partie. Ce premier réflecteur, correspondant sans doute à la base de la Molasse, s'approfondit régulièrement dans la seconde portion de ce profil. De nombreux réflecteurs avec un pendage régulier sont visibles dans les unités secondaires. Des réflecteurs sont observables jusqu'à environ 4500 m, soit la base du Mésozoïque qui était l'objectif de cette campagne.



La forme en « V » dans la seconde partie de la ligne correspond au manque de vibrations sur une partie de l'autoroute.

Ligne LS-04

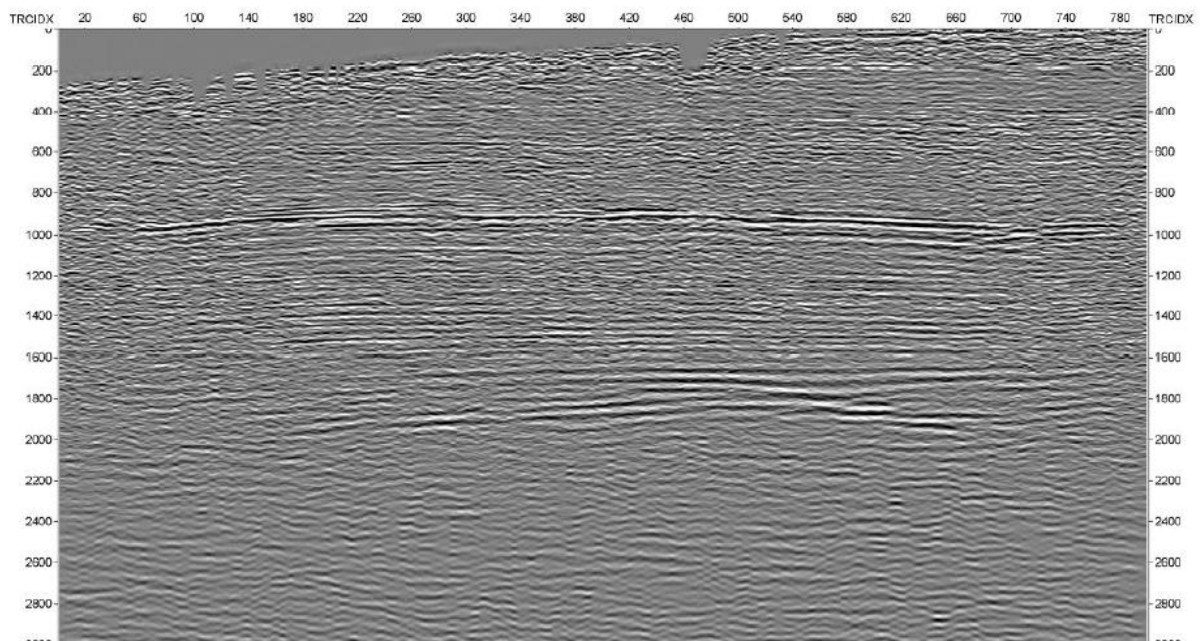


Figure 16: ligne LS-04, temps double

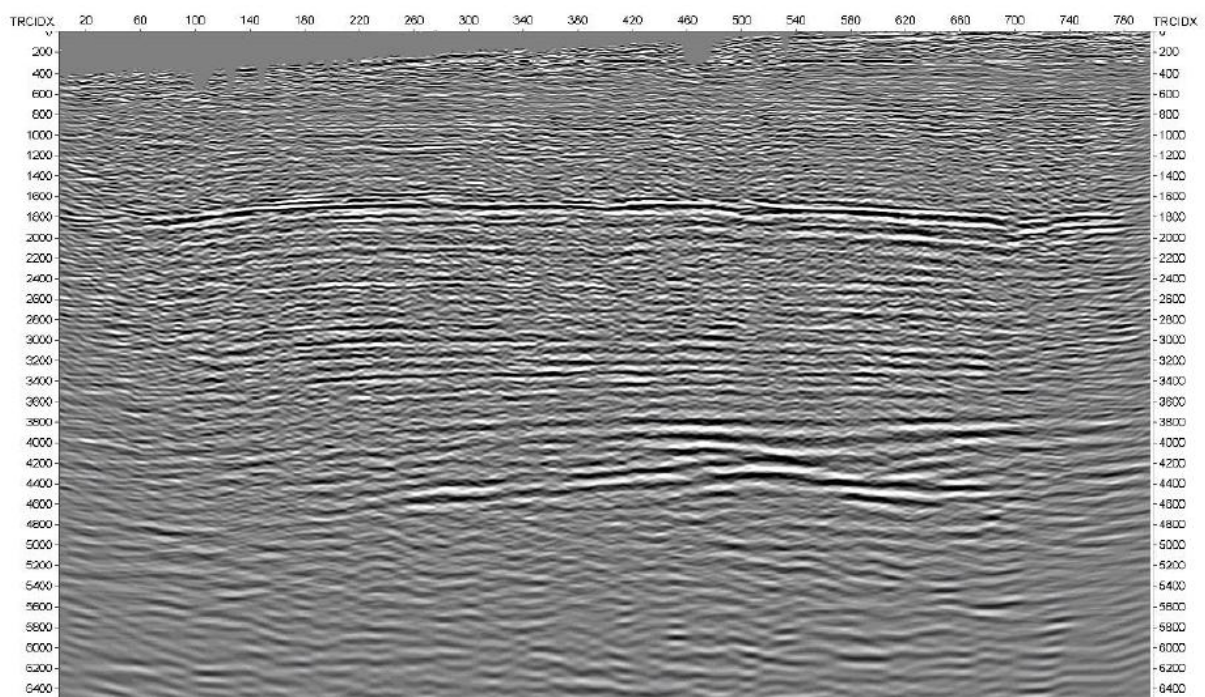


Figure 17: ligne LS-04, profondeur



Cette section présente des réflecteurs très marqués dès 1000ms/1500m dans sa première partie. Ce premier réflecteur, correspondant sans doute à la base de la Molasse, ondule légèrement dans la seconde portion de ce profil. Des réflecteurs sont observables jusqu'à environ 4500 m, soit la base du Mésozoïque qui était l'objectif de cette campagne.

8. Sécurité

La mise en œuvre d'une campagne d'acquisition vibrosismique, tout particulièrement en milieu urbain, requiert la mise en place de procédures strictes de sécurité par rapport aux dangers suivants :

- circulation, travail au bord de route à fort trafic, parfois à grande vitesse ;
- travaux mécaniques, en particulier sur les camions ;
- exposition au bruit, venant principalement des camions ;
- météo (grande chaleur, protection contre le soleil).

Toute personne intervenant ou visitant l'acquisition a reçu une présentation de ces différents dangers. L'ensemble des travailleurs (plus de 25 personnes) a reçu les équipements de sécurité obligatoires, soit :

- pantalons réfléchissants ;
- gilets réfléchissants.

Un briefing de sécurité quotidien, effectué avant le départ des équipes, a permis de rappeler les responsabilités de chacun et un échange d'informations entre le personnel et l'encadrement.

En ce qui concerne la signalétique de ce chantier, qui est finalement un chantier hybride entre un chantier mobile et un chantier fixe, la mise en place d'une signalétique claire autour des vibrateurs s'est avérée nécessaire et essentielle au bon déroulement en toute sécurité d'une acquisition sismique le long de routes à fort trafic. Du personnel dédié à cette sécurisation a été mobilisé. La circulation alternée au niveau des vibrateurs a été mise en place et gérée par deux personnes, en habits réfléchissants, équipées de panneaux et de radios.

Pour augmenter la visibilité de l'obstacle formé par le convoi, l'ensemble des véhicules avant et après le convoi, était équipé de gyrophares et de bandes réfléchissantes.



Figure 18: exemple de signalisation lors de l'acquisition sur le tronçon de l'autoroute (source : Geo2X SA)

9. Communication et médias

Le bon déroulement de l'acquisition sismique a notamment été assuré par une importante campagne de communication de la part des SiL et du Canton, dans le cadre aussi de la mise à l'enquête, qui a été finalement aussi un canal de communication, depuis le tout début du projet.

Le concept de communication validé par le Canton et mis en place par les SiL a notamment comporté :

- la distribution de tous-ménages à l'ensemble des riverains des lignes sismiques (dans un périmètre de 40 mètres), soit un total de plus de 40'000 courriers distribués ;
- l'organisation d'une journée de présentation, permettant au public d'expérimenter les vibrations émises par les camions vibreurs et de discuter avec les spécialistes ainsi que de tester la sensibilité des instruments de mesure ;
- la distribution par les équipes de terrain de brochures de présentation du projet ;
- l'accueil sur le terrain de deux équipes de télévision (RTS et La Télé).



Figure 19: journée de démonstration avant le début de la campagne source: Geo2X SA)

10. Conclusions

La campagne de prospection par sismique réflexion menée durant l'été 2016 s'est déroulée sans accident et dans de bonnes conditions météorologiques.

L'acquisition de données sur les 4 lignes sismiques, sur un total de plus de 40 km, a permis d'atteindre les objectifs fixés, soit d'améliorer la connaissance du sous-sol de l'agglomération lausannoise en termes d'accidents géologiques et de profondeur des différentes couches géologiques, qui sont des informations préliminaires afin de vérifier l'intérêt de réaliser un forage géothermique de moyenne ou grande profondeur dans l'agglomération lausannoise.

Les objectifs géologiques à atteindre, notamment le Mésozoïque, définis avant le début de la campagne, ont pu être imagés de façon satisfaisante, jusqu'à des profondeurs d'environ 4-5 km. La source sismique sélectionnée s'est donc avérée suffisante pour atteindre les objectifs.

Cependant, pour des projets futurs en milieu urbain, le retour d'expérience de ce projet montre qu'il serait préférable de procéder à des acquisitions plutôt nocturnes afin de permettre un meilleur rapport signal/bruit.

En effet, les mesures effectuées ont montré que la tranche horaire entre 2h et 5h du matin était la plus favorable.

Le bruit de fond causé par le trafic, en particulier sur les routes cantonales rapides (par exemple l'axe Cheseaux-sur-Lausanne - Crissier) a fortement impacté la qualité des mesures, sans compter que le personnel était aussi exposé à un danger plus élevé durant les opérations de pose et dépose des géophones. Il serait donc préférable, pour de futures acquisitions, de privilégier des routes moins rapides.



Le choix d'un matériel sans fil, bien que nécessitant une phase de rodage plus importante et des adaptations dans les procédures de travail de la part de l'entreprise, a été un des éléments clef du bon déroulement de cette campagne urbaine. A posteriori, cette campagne n'aurait pas pu se dérouler aussi efficacement et avec si peu d'impact sur le trafic avec du matériel câblé.

A relever aussi que la communication intensive depuis les toutes premières phases du projet jusqu'à la fin du chantier, les démarches de permittage et l'appui des communes traversées et du Canton ont permis un déroulement sans accroc majeur et un bon accueil des équipes par la population.

A noter que l'obligation d'obtenir l'autorisation de prospection en surface en passant par une mise à l'enquête, a été également un canal de communication très important qui a permis de mettre en contact les services techniques des différentes communes avec les SiL et leur mandataires afin d'anticiper certains problèmes techniques et garantir la coordination avec les multiples chantiers urbains qui se déroulent aussi pendant la période estivale.

Les procédures de contrôle de conformité des vibrations émises lors de cette campagne ont permis de montrer que la norme SN640 312a a été respectée en tout temps, grâce aussi à l'adaptation dynamique de la puissance des vibrations en fonction du contexte.

11. Suite des travaux

A l'issue de cette campagne sismique un travail très important sera mené sur l'interprétation des résultats. Il est possible que, dans le cadre de cette interprétation, un reprocessing des données s'avérera nécessaire dans but d'améliorer les images en tentant de mettre en exergue certains horizons prioritaires et les accidents géologiques pressentis.

En fonction des résultats, les phases suivantes concerneront probablement l'évaluation des cibles géothermiques prioritaires sur les zones qui présentent un potentiel de valorisation intéressant. Il s'agira donc de coordonner la ressource, en profondeur, avec les opportunités de valorisation, en surface.

Le modèle hydrogéologique 3D, qui sera développé sur la base des interprétations des données (qui sont en 2D sur les lignes), constituera un outil fondamental pour l'évaluation des différents scénarios d'exploitation de la ressource.

12. Remerciements

L'Office fédéral de l'énergie et la Direction Générale de l'Environnement du canton de Vaud sont remerciés pour le soutien financier accordé à ce projet.

Je tiens à remercier également la division Géologie Sols et Déchets du canton de Vaud pour la coordination et la gestion de la procédure de mise à l'enquête, qui s'est déroulée dans un climat de confiance.

Et finalement, je remercie les bureaux mandataires (ARConseil et Geo2X SA) pour le travail réalisé avec grand professionnalisme, qui s'est traduit par un déroulement des travaux selon planning.

I. Spécifications de l'équipement de mesure

a. IVI Mark 4

CATEGORY	ENGLISH	METRIC
Total Weight	44,000 Pounds*	19.964 kg*
Front Axle Weight	21,000 Pounds*	9.528 kg*
Rear Axle Weight	23,000 Pounds*	10.436 kg*
Pump	Sundstrand 26	Sundstrand 26
System Pressure	3,000 PSI	204 bar
Transmission	Funk 4-Speed	Funk 4-Speed
Cab	2 or 3 Man Cab	2 or 3 Man Cab
Turning Radius	23 Feet 6 Inches	7,16 meters
Engine - 6V-92T Detroit	322 Horsepower @ 2100 RPM	240 kw. @ 2100 RPM

FAILING Y-2400

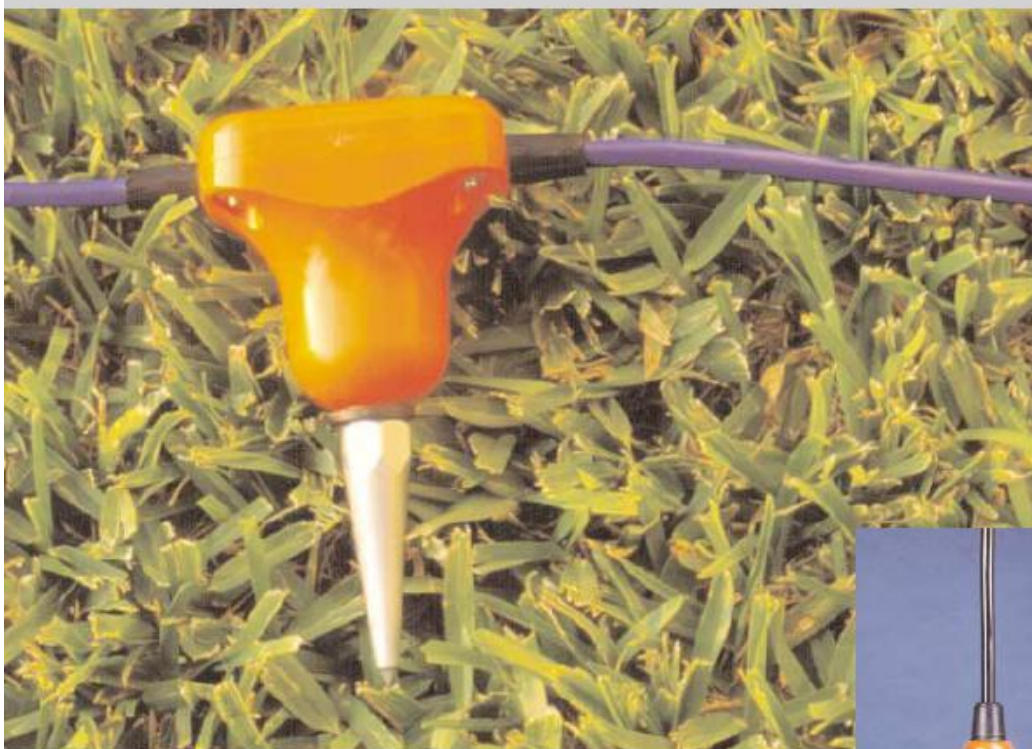
CATEGORY	ENGLISH	METRIC
Maximum Peak Force	48,044 Pounds	21.794 kg.
Mass Piston Area	16.01 Inches ²	103,3 cm ²
Reaction Mass Weight	6,700 Pounds	3.039 kg.
Reaction Mass Stroke	Plus or Minus 2 Inches	Plus or Minus 5,08 cm.
Reaction Centering	Air Spring Actuators	Air Spring Actuators
Servo Valve	200 GPM	756 l/m
Servo Valve Pilot Filter	3 Micron	3 Micron
Baseplate Area	3,068 Inches ²	19.789 cm ²
Baseplate Assembly Weight	3,308 Pounds	1.501 kg.
Lift System Stroke	38 Inches	96,5 cm.
Lift Cylinder Diameter	3.25 Inches	8,26 cm.
Lift Synchronization	Split Crossbeam	Split Crossbeam
Vibrator Pump Flow	103 GPM @ 1800 RPM	389 l/m. @ 1800 RPM
Holddown Weight	42,000 Pounds*	19.056 kg.*

1 *These weights can be increased by adding water and or CaCl to the tires.

c. Géophones 10Hz (Vibrosismique)

Ultraphone™ UM-2 3W

The New Standard in Seismic Data Acquisition



- Ultra-low distortion
- Compatibility with modern 24 bit recording systems
- Inductive damping
- Spurious-free band pass @ 2ms sample rate
- High sensitivity
- True amplitude response
- Precision tolerances
- Available in rugged land and marsh cases
- 3 year warranty on geophone element
(excluding damage caused by lightning, high voltage and/or physical abuse)



d. GPS Trimble GeoExplorer 6000 Series GeoXH

GNSS

- Receiver
Trimble Maxwell™ 6 GNSS chipset
- Channels
220 channels
- Systems
GPS, GLONASS¹, WAAS/EGNOS/MSAS
- Update rate
45 s (typical)
- NMEA-0183 support
Optional
- RTCM support
RTCM2.x/RTCM3.x
- CMR support
CMR/CMR+/CMRx
- **GeoXT handhelds**
- GPS
L1C/A
- GLONASS
L1C/A, L1P
- **GeoXH handhelds**
- GPS
L1C/A, L2C, L2E
- GLONASS
L1C/A, L1P, L2C/A, L2P

1 cm + 2 ppm

TEMPERATURE

- Operation
-20 °C to +60 °C (-4 °F to +140 °F)
- Storage
-30 °C to +70 °C (-22 °F to +158 °F)

ENVIRONMENTAL (MIL-STD-810G)

- Drop shock
1.2 m (4 ft) plywood over concrete
- Functional Shock
Method 516.6 Procedure I
- Vibration
Method 514.6 Procedure I
- Relative humidity
95% non-condensing
- Maximum operating altitude
3,658 m (12,000 ft)
- Maximum storage altitude
5,000 m (16,400 ft)

INGRESS PROTECTION

- Water/Dust
IP65

SIZE AND WEIGHT

- Height
234 mm (9.2 in)
- Width
99 mm (3.9 in)
- Depth
56 mm (2.2 in)
- Weight (inc. battery)
925 g (2.0 lb)

BATTERY

- Type
Rechargeable, removable Li-Ion
- Capacity
11.1V 2.5 AH
- Charge time
4 hours (typical)

GNSS ACCURACY²

GeoXH **Centimeter**
Real-time Centimeter output

Edition

- Horizontal (external antenna³)
1 cm + 1 ppm
- Vertical (external antenna)
1.5 cm + 2 ppm
- Horizontal (internal antenna)
2.5 cm + 1.2 ppm
- Vertical (internal antenna)
4 cm + 1.5 ppm

Postprocessed Centimeter output

- Horizontal (external antenna³)
1 cm + 1 ppm
- Vertical (external antenna)
1.5 cm + 1 ppm
- Horizontal (internal antenna)
2.5 cm + 1.2 ppm
- Vertical (internal antenna)
4 cm + 1.5 ppm

All **GeoXH** **configurations** **Real-time and postprocessed H-Star (Horizontal RMS)**

- H-Star
10 cm + 1ppm

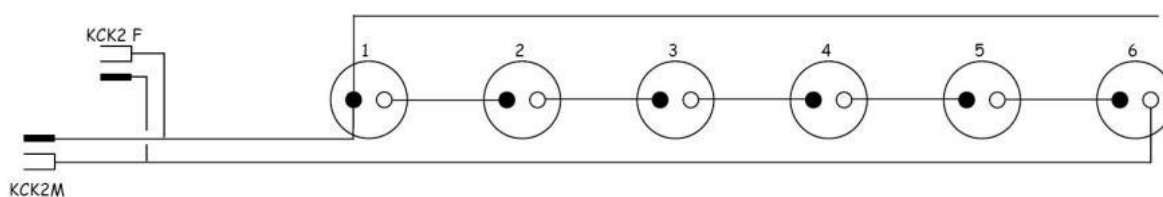
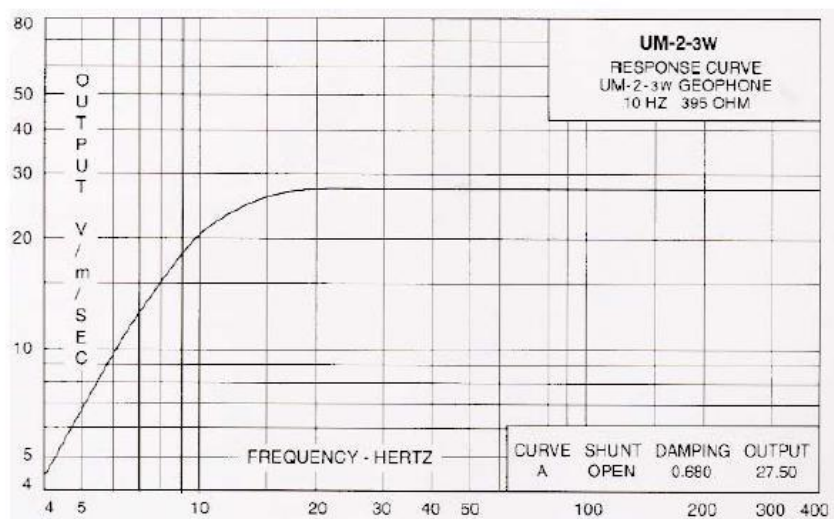
All **GeoXH** and **GeoXT** **configurations** **Real-time DGNSS (Horizontal RMS)**

- Code
75 cm + 1ppm
- SBAS⁴ (WAAS/EGNOS/MSAS)
typically < 1 m
- Postprocessed DGNSS (Horizontal RMS) Code
50 cm + 1 ppm
- Carrier (after 45 minutes)

Specifications

Distortion	Less than 0.075% with tilt from 0° to 20°
Spurious Frequency	Beyond 250 Hz
Frequency	10 Hz \pm 3.5%
Open Circuit Damping	68% \pm 3.5% (64.5% - 71.5%)
Sensitivity @	
68% Damping	27.5 V/m/sec \pm 3.5% (0.6999 V/in/sec)
Coil Resistance	395 Ω
Moving Mass	8.4 g (0.29 oz)
Coil Travel	1.78 mm (0.07 in)
Diameter	27.4 mm (1.08 in)
Length	31.5 mm (1.24 in)
Weight	76.4 gm (2.68 oz)

All parameters are 24°C



Polarity and balanced wiring

● = Positive

b. Sismographe WirelessSeismic System 2

wireless**SEISMIC**



RT System 2 significantly lowers the costs and risks of seismic surveys while maximizing productivity through increased system availability and higher operational efficiency.

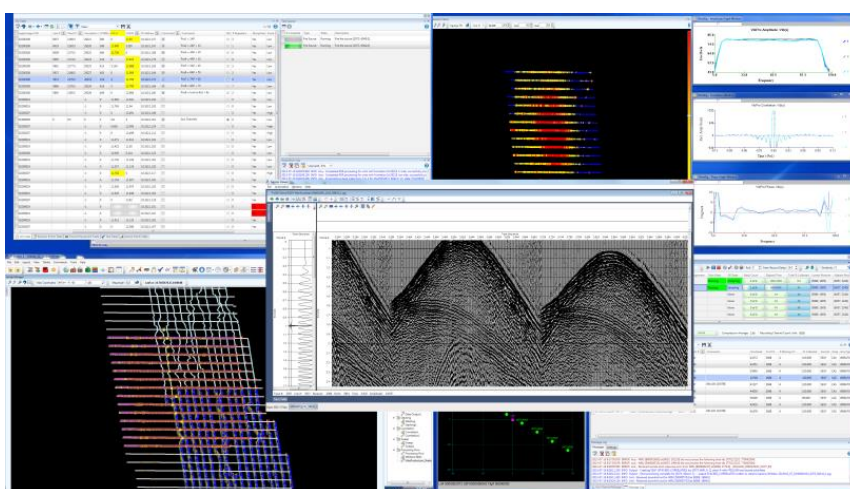


RealTIME Data Collection with CableFREE Flexibility

The advantages of cablefree seismic technology are significant in almost any kind of terrain. Until now, cablefree meant shooting blind, which made many seismic contractors and oil companies uneasy due to the lack of visibility of the data, the lack of QC, and the need to manually collect and transcribe the data. No need to compromise anymore. **RT System 2** allows you to collect seismic data in real time from tens of thousands of channels using wireless telemetry, while providing all of the benefits of a cablefree system.

RealTIME Data Quality Control

Literally, you can watch your data being gathered while shooting with the **RT System 2** and confidently verify that all units are operating and acquiring quality data. With instant confirmation of data integrity, you can securely eliminate shooting blind and the potential for loss of data.



The Wireless Remote Unit

The Wireless Remote Unit, or WRU, is the heart of the RT System 2. These small units contain a complete seismic acquisition and radio relay system inside the waterproof aluminum case. The analog-to-digital converter is state of the art, one that has been widely adopted by most manufacturers of seismic systems because of its outstanding analog performance and low power consumption.

The WRU contains an orientation sensor. When carried by its attached rope, its power is off and can be laid flat for transport. To power up the unit, the user holds it vertical for a few seconds. It rapidly performs a series of tests when placed on the ground, locates its position with the internal GPS, and establishes radio communication with its neighbors on the line. To turn it off, just pick it up by its attached rope. The advantage of this system is that the least-skilled personnel can deploy the WRUs without using complex keyboard/display devices. The LED status indicators on the unit provide complete, easy-to-interpret diagnostics.

The WRU runs from either one or two rechargeable lithium-ion batteries. In the two-battery configuration, its intelligent power management system initially chooses the battery with the least amount of charge available. When this battery is depleted, the system switches to the higher capacity battery. Depleted batteries can be replaced in the field, but in most field operations, the batteries will last until the WRU is picked up. The status of the batteries is monitored continuously from the Central recording system, and LED indicators tell the field crew which batteries to replace first.

Antennas are available for use with the system to fit the local conditions and the group interval. For longer group intervals in brushy conditions, extensions may also be used to raise the antenna element.

If radio connectivity is partially lost, the Hybrid Radio Telemetry immediately allows stranded WRUs to switch to operating autonomously, buffering data into local flash memory. When radio connectivity is restored, buffered data are wirelessly transmitted to the Central recorder.



Features

- Single-station, 24-bit data acquisition
- Built-in self tests
- Built-in GPS for self organization
- License-free, 2.4 GHz ISM band
- Autonomous deployment with LED status indicators
- Auto skip-healing telemetry
- Synchronous and asynchronous recording
- Hybrid radio telemetry acquisition
- Continuous and real-time data collection
- Scalable system architecture
- 32-bit diversity stack in the WRU
- Industry-standard geophone connector
- Intelligent Lithium-Ion battery with self-contained charging circuitry
- Low power consumption
- Operating temperature: -40° C to +75° C
- Humidity: 0 to 100%
- Gain Selections: x1, x4, x16, x64
- Sample Interval: ¼, ½, 1, 2, 4 milliseconds
- 0.1% channel-to-channel matching error
- Stackable, rugged aluminum enclosure
- Integral hot-swappable battery packs
- Distributed clock discipline to GPS
- Compatible with anchor plate

Specifications

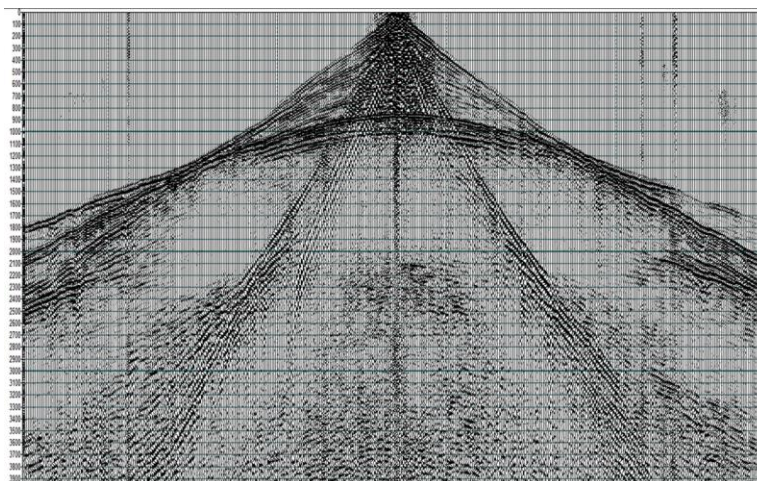
- Maximum input signal level: 1.768 VRMS @ x1 gain
- Total System Dynamic Range: 143 dB @ 2 msec
- Instantaneous Dynamic Range:
 - » 125 dB @ x1 gain
 - » 124 db @ x4 gain
 - » 117 dB @ x16 gain
 - » 106 dB @ x64 gain
- Anti-alias filter:
 - » Passband edge (0.01dB ripple) 0.75 Nyquist
 - » Stop band attenuation: >120 dB at Nyquist
 - » -3dB point is at 0.8 Nyquist
 - » Linear or minimum phase
- Common Mode Rejection: >100 dB
- Equivalent Input Noise @ 2 msec:
 - » 0.93 µV @ x1 gain
 - » 0.27 µV @ x4 gain
 - » 0.14 µV @ x16 gain
 - » 0.13 µV @ x64 gain
- Total Harmonic Distortion @ 2 msec: 0.0002% @ 15.625 Hz
- Rating: IP67

Dimensions

- 14.7 W x 7.2 H x 22.9 L cm (5.79 W x 2.83 H x 9.01 L in.)
- With 2 batteries:
 - Standard- 19.58 W cm (7.71 W in.)
 - High capacity- 26.66 W cm (9.17 W in.)

Weight

- 1.86 kg (4.10 lbs.)
- With 2 batteries & antenna:
 - Standard- 3.32 kg (7.31 lbs.)
 - High capacity- 3.90 kg (8.59 lbs.)



CAMPAGNE D'ACQUISITION DE DONNÉES GÉOLOGIQUES PAR VIBROSISMIQUE

Juillet 2016

RAPPORT DES TESTS POUR LA DETERMINATION DES PARAMETRES D'ACQUISITION

Rapport réalisé par : Alberto Rosselli, géophysicien

Client :



Ville de Lausanne
Direction des Services Industriels
Place Chauderon 23
Case postale 7416
CH-1002 Lausanne

Contracteur :



Rue du Centre 6
CH-1377 Oulens-sous-Echallens
Switzerland
Phone/Fax +41 21 881 48 00
Email: info@geo2x.com

GALLEGO TECHNIC Geophysics

Afin de déterminer les meilleurs paramètres d'acquisition, des tests ont été conduits au démarrage de l'acquisition le 4 juillet 2016.

Les suivants paramètres ont été testés :

- fréquence du sweep ;
- nombre / durée du sweep :
- type de sweep (linéaire ou logarithmique)

Les tests ont été conduits dans la partie nord du profil LS-02 (Cheseaux-sur-Lausanne).

La basse fréquence du sweep a été prédéterminée à 8 Hz, afin de garantir une profondeur d'investigation suffisante pour atteindre les objectifs profonds (~ 4000 m).

Les hautes fréquences 70 -80 -90 Hz ont été testées :

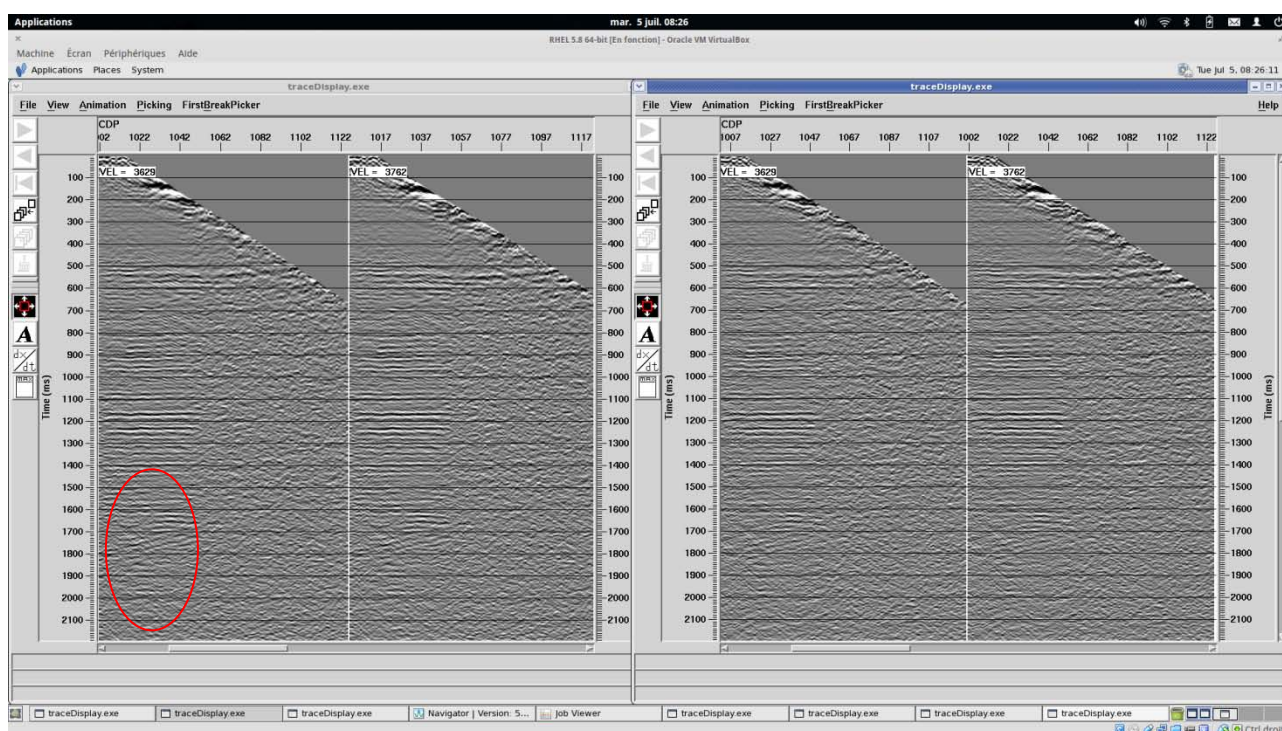


Figure 1 : comparaison entre acquisition 8-70 Hz (à gauche) et 8-80 Hz (à droite). 2 sweeps de 18 sec.

Comment montré dans la figure 1, les réflecteurs plus profonds apparaissent mieux définis dans l'image de gauche (8-70 Hz).

La figure 2 montre la comparaison entre les fréquences 8-70 Hz (à gauche) et 8-90 Hz (à droite).

Même dans ce cas, nous remarquons que les réflecteurs plus profonds semblent mieux définis dans l'image de gauche (8-70 Hz).

La fréquence 8-70 Hz a été donc retenue en considérant sa meilleure résolution dans la partie plus profonde, qui correspond à la zone principal d'intérêt de cette campagne sismique, toujours en gardant dans la partie plus superficielle une qualité comparable aux autres fréquences testées.

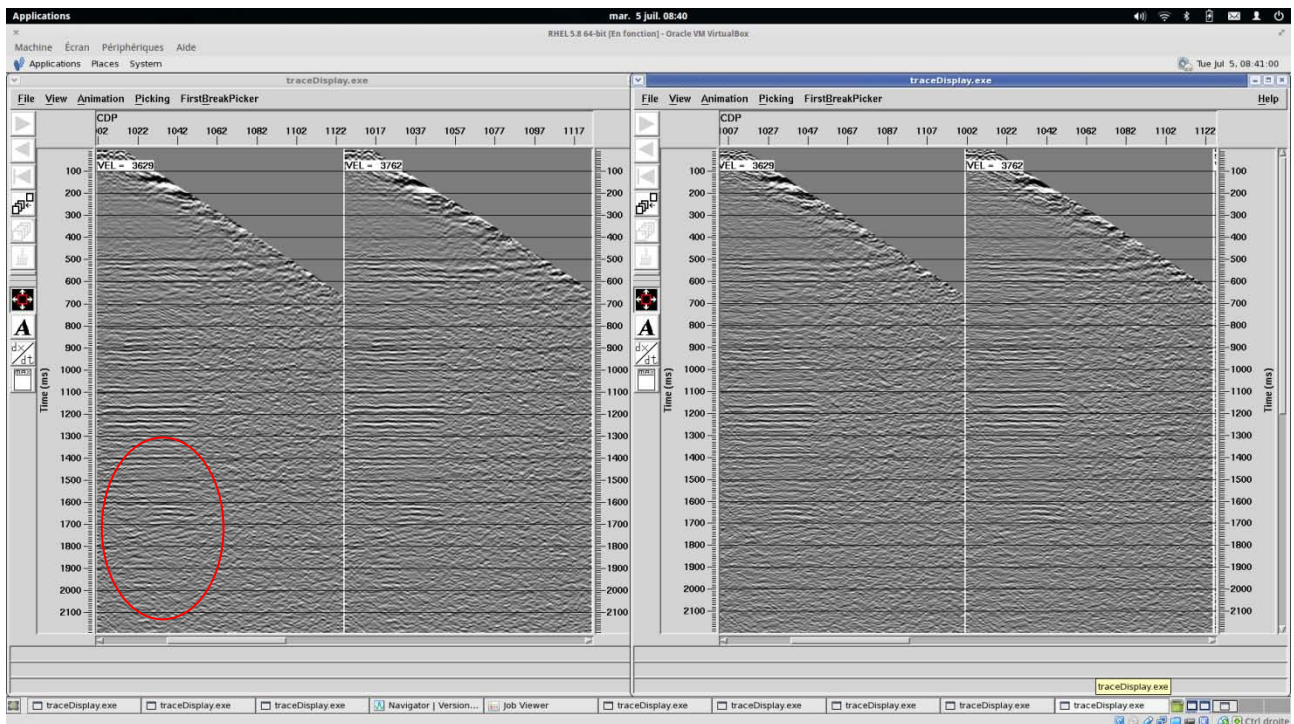


Figure 2 : comparaison entre acquisition 8-70 Hz (à gauche) et 8-90 Hz (à droite). 2 sweeps de 18 sec.

Après avoir choisie la meilleure fréquence, la durée /nombre de sweeps à été testée. Deux configurations ont été choisies pour ces tests :

- 2 sweeps de 18 sec chacun
- 3 sweeps de 12 sec chacun

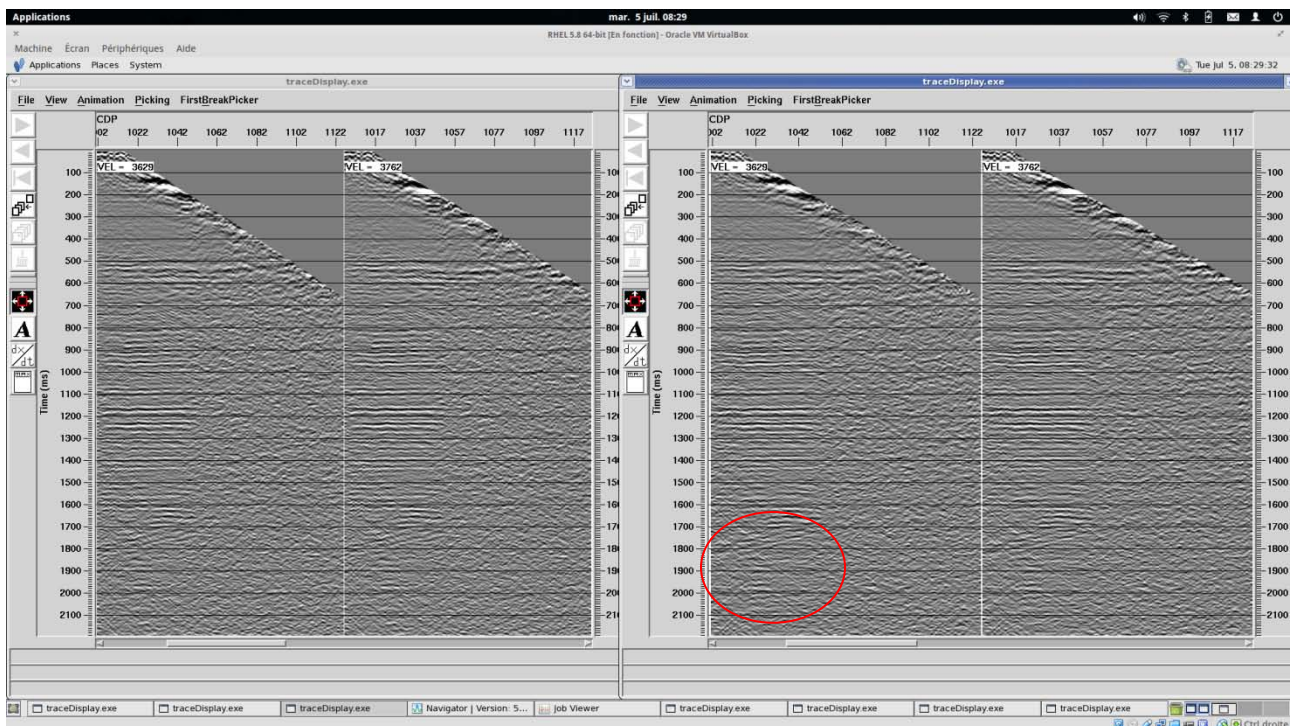


Figure 3 : comparaison entre acquisition 3 sweeps de 12 sec (à gauche) et 2 sweeps de 18 sec (à droite). Fréquence utilisée 8-70 Hz.

Nous ne remarquons pas des différences importantes entre les deux configurations, mais les réflecteurs plus profonds semblent mieux définis lors de l'utilisation de 2 sweeps de 18 sec.

Des tests ont été enfin effectués pour évaluer la potentielle amélioration de la résolution en utilisant un sweep de type linéaire ou logarithmique.

Encore une fois notre attention est adressée aux réflecteurs profonds et, même si n'apparaissent pas de différences importantes entre les deux images, la section obtenue avec sweep linéaire semble donner une meilleure résolution en profondeur.

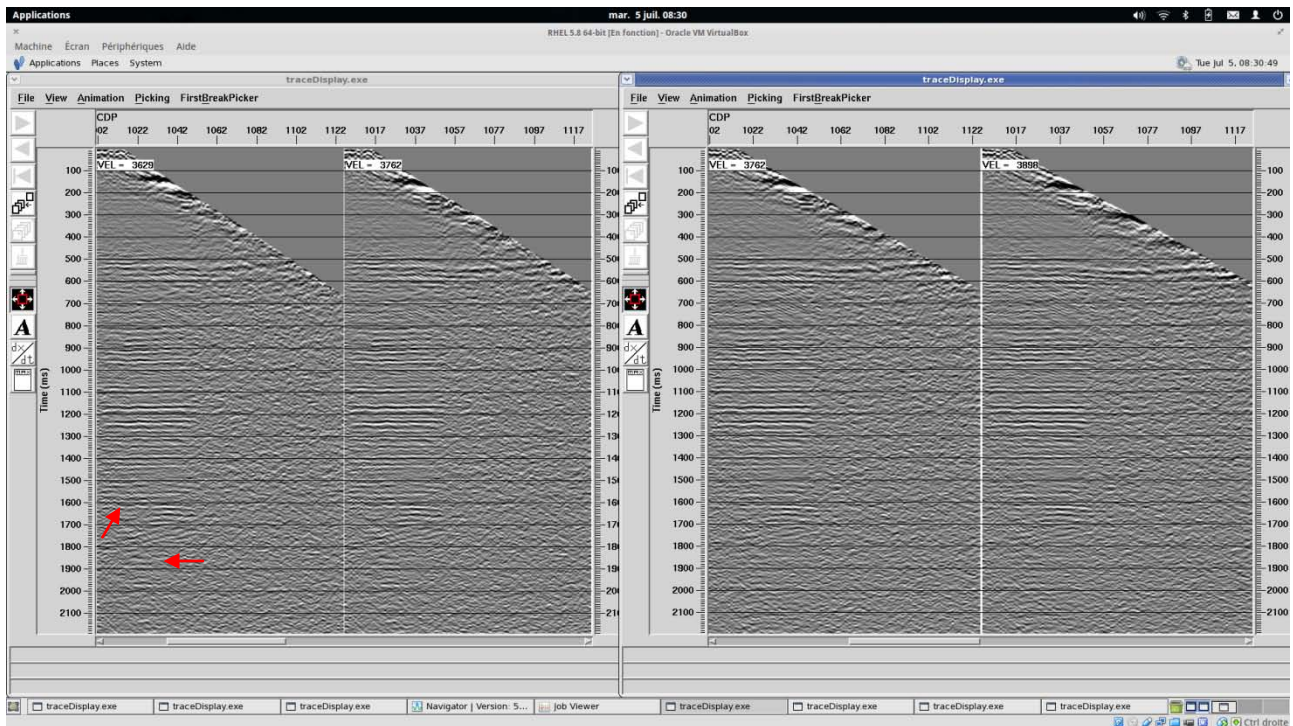


Figure 4 : comparaison entre sweep linéaire (à gauche) et sweep logarithmiques (à droite). Fréquence utilisée 8-70 Hz, 2 sweeps de 18 sec.

A partir des tests effectués, les paramètres d'acquisition ci-dessous ont été sélectionnés :

Fréquence du sweep : 8-70 Hz

Nombre/durée du sweep : 2 sweeps de 18 sec

Type de sweep : linéaire

Durée de l'enregistrement : 4 sec