

## **Annexe D**

**Rapport « Levé de sismique réfraction 2010 »**





**RIVIÈRE SAINTE-ANNE-DU-NORD  
Levé de sismique réfraction 2010**

Présenté à

**GROUPE AXOR INC.**  
1950, Sherbrooke ouest  
Montréal, QC H3H 1E7

**Janvier 2011**

**C10529**

---

**GÉOPHYSIQUE SIGMA INC.**

1400 Marie-Victorin, suite 200  
ST-BRUNO QC J3V 6B9  
Téléphone : (450) 441-4600  
Fax : (514) 227-5378  
Courriel : [info@geosigma.com](mailto:info@geosigma.com)  
[www.geosigma.com](http://www.geosigma.com)



## TABLE DES MATIÈRES

---

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>GÉNÉRALITÉS</b>	<b>1</b>
2.1	HISTORIQUE	1
2.2	LOCALISATION DES LIGNES DE LEVÉ ET TRAVAUX RÉALISÉS	1
2.3	PERSONNEL ET ÉQUIPEMENT	4
<b>3</b>	<b>MÉTHODOLOGIE</b>	<b>5</b>
3.1	PARAMÈTRE DU LEVÉ	5
3.2	PRÉCISION DES RÉSULTATS	5
<b>4</b>	<b>RÉSULTATS</b>	<b>6</b>
4.1	FORMAT DE PRÉSENTATION	6
4.2	SYNTHÈSE DES RÉSULTATS	7
4.3	ANALYSE DES RÉSULTATS	7
<b>5</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>10</b>

## ANNEXES

---

ANNEXE A - MÉTHODE DE SISMIQUE RÉFRACTION

ANNEXE B - PLAN 10529-01  
COUPES SISMIQUES ET PLAN DE LOCALISATION



## 1 INTRODUCTION

En novembre 2010, à la demande du **Groupe Axor inc., Géophysique Sigma inc.** a effectué des mesures de sismique réfraction lors de la campagne d'exploration géotechnique du projet hydroélectrique de la rivière Sainte-Anne-du-Nord, à St-Joachim, dans la région de Québec.

Lors des investigations, les travaux sismiques avaient pour objectif principal de préciser la topographie du socle rocheux et de localiser les zones de la masse rocheuse qui pourraient présenter des problèmes lors de la construction des ouvrages (sillon, zone de cisaillement). L'épaisseur et la nature des différents horizons de matériaux meubles ont aussi été précisées dans la mesure des limites des méthodes d'exploration utilisées.

Nous présenterons d'abord la chronologie des travaux et préciserons la localisation de ceux-ci, nous fournirons ensuite une description des méthodes d'acquisition et d'analyse employées, enfin, nous présenterons les résultats obtenus et nous analyserons ceux-ci afin de dégager les conclusions et les recommandations qui en émergent.

## 2 GÉNÉRALITÉS

### 2.1 *Historique*

Suite à la requête du Groupe Axor inc. reçue en novembre 2010, les travaux de sismique réfraction ont eu lieu entre les 1 et 5 novembre 2010. Des mesures supplémentaires ont également été prises le 13 décembre afin de préciser certains résultats.

### 2.2 *Localisation des lignes de levé et travaux réalisés*

#### **Localisation générale**

Le site du projet hydroélectrique de la rivière Sainte-Anne-du-Nord se trouve à 40 Km au



nord-est de la ville de Québec, dans la région de Québec.

### **Localisation des lignes de levé**

Le plan des coupes sismiques en annexe comprend un plan de localisation qui indique la position et la disposition des lignes, et ce plan a été reproduit sur la figure de la page suivante.

### **Arpentage**

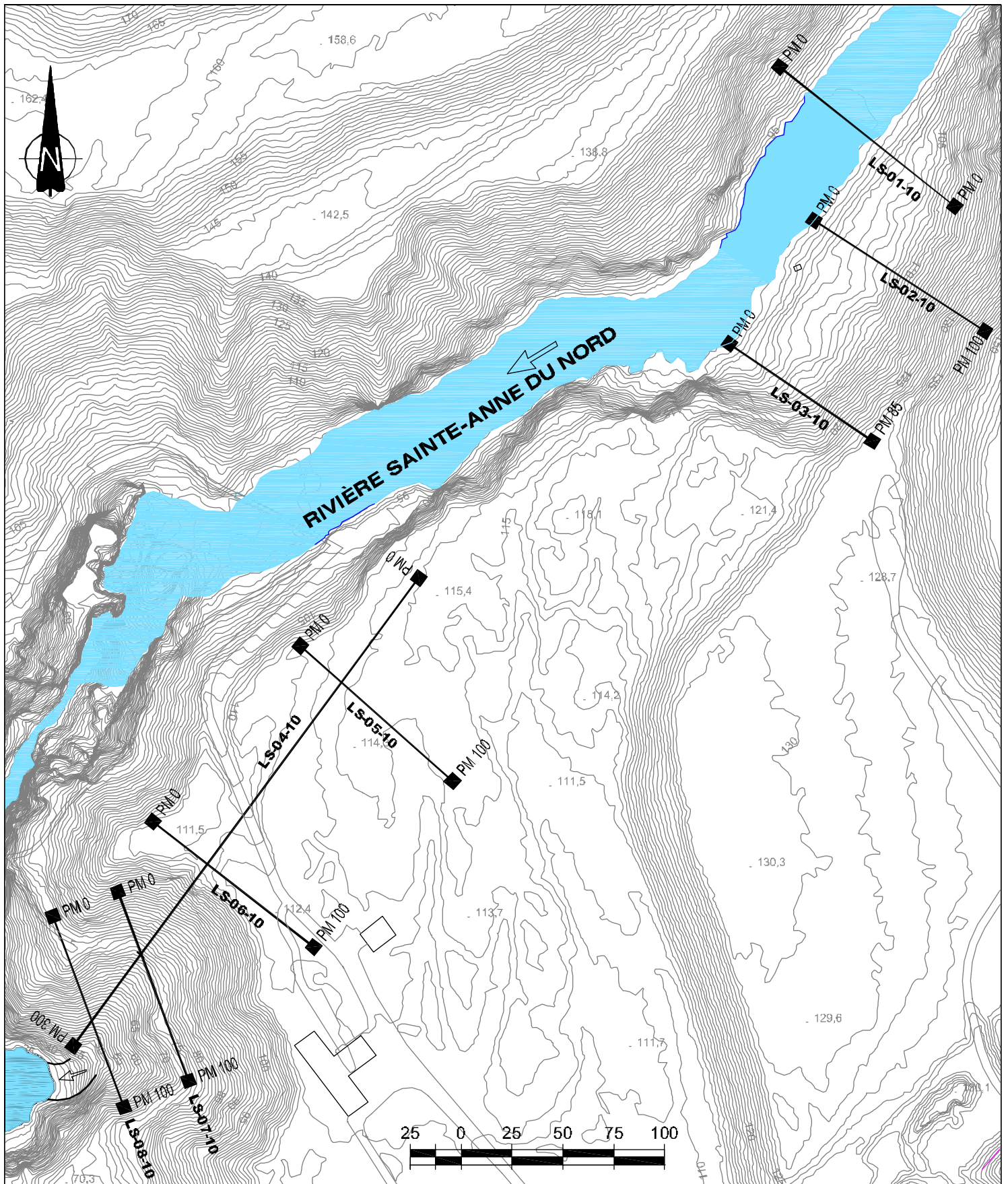
L'implantation, le piquetage, le contrôle horizontal et vertical des lignes sismiques étaient de la responsabilité du Groupe Axor et ont été réalisés par la firme d'arpentage **VRSB**.

### **Travaux réalisés**

Le tableau suivant présente la liste des 8 lignes sur lesquelles un levé sismique réfraction a été effectué, en spécifiant le point métrique de début, de fin et la longueur de chacune des lignes. La longueur totale du levé a été de 996.7 mètres.

<b>RIVIÈRE SAINTE-ANNE-DU-NORD – CAMPAGNE 2010</b>			
<b>Ligne Sismique</b>	<b>Point métrique (m)</b>		<b>Longueur (m)</b>
	Début	Fin	
LS-01-10	0	110	110
LS-02-10	0	100	100
LS-03-10	-6.7	80	86.7
LS-04-10	0	300	300
LS-05-10	0	100	100
LS-06-10	0	100	100
LS-07-10	0	100	100
LS-08-10	0	100	100
<b>Total (m)</b>			996.7

**Liste des lignes effectuées**



**RIVIÈRE SAINTE-ANNE-DU-NORD  
LOCALISATION DES LIGNES**

Client: AXOR INC.  
Date: 27 JANVIER 2011  
Contrat: C10529

**Échelle 1:25,000**

**SIGMA** GÉOPHYSIQUE  
SIGMA INC.



### **2.3 Personnel et équipement**

Les deux tableaux suivants présentent la liste du personnel qui composait l'équipe ainsi que l'équipement qui a été utilisé pour réaliser le levé.

#### **Liste du personnel**

<b>NOM</b>	<b>COMPÉTENCE</b>	<b>TÂCHE</b>
Claude Provost, ing.	Géophysicien sr	Administration, rapport
Claude Lachapelle	Technicien sr	Opérateur, chef d'équipe
Robert Leduc	Boutefeu	Dynamiteur
Yvon Bonneau	Technicien	Assistant dynamiteur
Jean-Philippe Demers	Technicien	Aide Technique

#### **Liste de l'équipement**

<b>QTÉ</b>	<b>DESCRIPTION</b>	<b>MODÈLE</b>	<b>FABRICANT</b>
1	Sismographe 24 canaux	StrataView R24	Geometrics
3	Câbles à géophones 12 canaux		Mark Products
26	Géophones verticaux - 14 Hz	L-28	Mark Products
2	Exploseur à haut voltage	Sigma	Géophysique Sigma
1	Câble de tir – 400 m		Mark Products
1	Système de communication		Motorola
1	Camion à explosifs		
1	système informatique		





### **3 MÉTHODOLOGIE**

Nous avons inclus en annexe **A** un texte qui décrit la méthode de sismique réfraction tant du point de vue du travail de collecte des données sur le terrain que du point de vue de la réduction de ces données et de leur interprétation. Les difficultés inhérentes à cette méthode géophysique sont aussi revues puisqu'elles sont directement associées à sa précision.

#### **3.1 Paramètre du levé**

Le levé sismique a été réalisé en utilisant des dispositifs composés d'un maximum de 24 capteurs espacés de 5 m (valeur nominale). Les dispositifs étaient exploités au moyen de 7 tirs et la position de deux de ces tirs était déterminée de manière à obtenir les arrivées d'ondes P ayant transitées par le roc pour toute la longueur du dispositif. Les autres tirs visaient à obtenir le temps de parcours des ondes à travers les matériaux meubles pour chacun des capteurs et étaient utilisés pour obtenir la vitesse de propagation dans les matériaux meubles à plusieurs endroits le long du dispositif de mesure. Partout où cela était possible, les charges explosives étaient placées à 0.5 mètre sous la surface afin d'améliorer la qualité du signal et de diminuer le bruit acoustique résultant de la détonation.

#### **3.2 Précision des résultats**

Lorsque les hypothèses qui sous-tendent la théorie à la base de la technique de sismique réfraction sont respectées (*1° les couches sont parallèles et sub-horizontales ; 2° la vitesse de propagation dans une couche est toujours inférieure à la vitesse dans la couche sous-jacente ; 3° l'épaisseur d'une couche est toujours suffisamment importante pour que la couche soit détectée*), l'erreur nominale sur l'épaisseur totale calculée est d'environ 1,5 mètre pour une profondeur de moins de 15 mètres et de 10 % pour une profondeur de 15 mètres ou plus.



L'erreur pourra aussi être plus grande dans les cas suivants :

- présence de failles ou de sillons
- changement brusque dans la topographie d'une des couches
- inversion de vitesse causée par le permafrost en profondeur
- couche cachée
- Tourbière marécageuse contenant de la sphaigne et du gaz
- Erreur sur la position des capteurs

## **4 RÉSULTATS**

Dans le présent chapitre, les résultats du levé de sismique réfraction sont discutés ainsi que le format de présentation des résultats sismiques qui sont montrés sur le plan n° **10529-01**.

### **4.1 Format de présentation**

#### ***Coupes sismiques***

Les résultats du levé de sismique réfraction sont montrés sous forme de coupes sismiques montrant le résultat final de l'interprétation de sismique réfraction. On y retrouve le profil de chacun des réfracteurs qui ont pu être observés, incluant le roc lorsque celui-ci a pu être identifié avec certitude. Les coupes sont à l'échelle horizontale et verticale de 1:1,000.

#### ***Identification des réfracteurs***

Les réfracteurs sont identifiés de la façon suivante:

*Trait continu* : réfracteur provenant de l'interprétation sismique.

*Trait en tiret* : réfracteur extrapolé ou interpolé.

#### ***Vitesses de propagation***

La vitesse de propagation de l'onde P dans chacun des horizons réfracteurs est montrée sous forme numérique et est exprimée en mètre par seconde (*m/s*).



### ***Hachure du roc***

Dans le cas du réfracteur associé au roc, lorsque la vitesse de propagation était égale ou supérieure à 3 800 m/s, des hachures ont été utilisées afin de différencier le roc des autres réfracteurs.

### ***Anomalie de la vitesse de propagation dans le roc***

Les zones pour lesquelles la vitesse de propagation de l'onde P dans le roc était anormalement lente (*dans le cas qui nous occupe 4100 m/s et moins*), le réfracteur a été hachuré et surligné d'un trait rouge large.

## **4.2 Synthèse des résultats**

Le tableau suivant fournit l'élévation minimale et maximale du roc et l'épaisseur minimale, maximale et moyenne de matériaux meubles ainsi que la vitesse sismique minimale et maximale dans le roc ainsi que la vitesse de propagation moyenne dans le roc sain.

LS N°	Élévation du roc		Profondeur du roc			Vitesse du roc		
	Min (m)	Max (m)	min (m)	max(m)	Moy. (m)	min(m/s)	max(m/s)	moyenne
1	91.7	98.6	0.7	15.7	4.7	2500	4600	3175
2	85.9	119.9	0.8	24.8	11.3	2000	3000	3000
3	89.3	112.7	2.7	22.6	12.2	4600	4600	4600
4	35.3	111.7	0.6	19.8	8.4	4200	5300	4957
5	103.5	108.4	5.5	10.0	7.4	5400	5400	5400
6	86.3	94.9	16.5	25.7	21.0	5000	5000	5000
7	47.0	81.7	3.7	28.3	15.5	3200	4700	4414
8	47.5	72.4	0.0	12.4	6.7	4200	4200	4200

### **Synthèse des résultats**

## **4.3 Analyse des résultats**

L'épaisseur la plus importante (28.3 m) est observée au PM 75 de la ligne LS-07-10. Du point de vue sismique, l'analyse des résultats a permis de mettre en évidence deux horizons distincts de matériaux meubles:



### *Horizon supérieur*

La vitesse de propagation dans l'horizon supérieur se maintient de 275 m/s à 600 m/sec pour ce site. Les matériaux correspondant à ces vitesses sont des matériaux organiques ou des matériaux meubles secs de tout type, mais fortement remaniés par l'action des cycles de gel et de dégel.

### *Horizon inférieur*

Cet horizon, dont la vitesse de propagation varie de 800 à 1300 m/s, est observé presque partout. Ces matériaux ne sont pas saturés et n'ont pas été remaniés comme l'a été l'horizon supérieur. Il s'agit probablement d'un till relativement sec. Les vitesses de propagation inférieures pourraient indiquer que les particules fines ont été lessivées alors que les vitesses supérieures pourraient indiquer la présence de plus de particules fines et une augmentation de la teneur en eau.

### **Qualité du roc**

La vitesse de propagation de l'onde P mesurée pour le roc sain varie entre 4 200 m/sec et 5 400 m/sec. Les vitesses supérieures à 5 000 m/s sont probablement associées, pour ce site, à du roc dont la qualité varie de très bonne à excellente. L'annexe 1 décrit plus en détail les relations entre la qualité du roc et les vitesses sismiques mesurées. Cette grande plage dans la vitesse sismique du roc indique probablement que plusieurs unités géologiques passablement différentes sont présentes sur le site.

Des zones montrant des basses vitesses sismiques dans le roc ont été localisées, sur les lignes LS-01-10, LS-02-10, LS-07-10 et LS-08-10. Ces zones de basse vitesse sismique peuvent correspondre à des zones de fracturation intense ou à des vallées profondes. Sur les coupes sismiques, l'interprétation des sillons possibles est montrée à titre indicatif et constitue une approximation de la profondeur possible du sillon.



## **Points d'intérêt**

### **LS-01-10 (Axe du barrage)**

Sur cette ligne, une large zone de faible vitesse de 2 500 m/sec a été observée. Cette anomalie de vitesse peut être causée soit par:

- La présence d'une épaisse couche de blocs (de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur au minimum), formant une vallée profonde (sillon), ce qui nous semble l'hypothèse la plus plausible.
- La présence d'une faille avec du roc très fracturé.

Des levés supplémentaires pourraient aider à éclaircir cette ambiguïté, à l'aide d'une ligne exécuté au même endroit mais allant 100 m de part et d'autre de la rivière, ainsi qu'une ligne sismique longitudinale en rive gauche entre LS-01-10 et LS-03-10.

Dans tous les cas, un forage serait essentiel pour mieux définir cette zone si elle est choisie comme emplacement du barrage principal.

### **LS-02-10**

Sur cette ligne, l'ensemble du roc présente des vitesses anormalement basses et l'hypothèse d'une vallée profonde (sillon) a été indiquée sur le plan des résultats.

### **LS-07-10 et LS-08-10**

Sur ces deux lignes, des anomalies de vitesse ont été observées dans le roc et l'hypothèse d'une vallée profonde (sillon) a été indiquée pour LS-07-10.



## 5 CONCLUSION

Le levé de sismique réfraction, effectué en novembre et décembre 2010 dans le cadre des travaux d'investigation géotechnique du projet de la rivière Sainte-Anne-du-Nord dans la région de Québec, a permis de déterminer l'épaisseur du mort terrain, la topographie du roc et la vitesse de propagation des ondes P dans le roc.

Suite à ce levé, nous pouvons conclure que:

- La ligne effectuée sur le site prévu du barrage (LS-01-10) a indiqué une large zone de faible vitesse dans le roc. Des levés supplémentaires pourraient améliorer la compréhension du sol à cet endroit, mais un forage en rivière est essentiel pour lever l'incertitude quant au contexte géologique de cette zone.
- Trois autres zones de faible dans le roc ont été observées et correspondent à du roc fracturé et/ou à des sillons possibles.

Ce rapport a été rédigé par Monsieur Claude Provost, ingénieur.

---

Claude Provost, ing.

# **SISMIQUE RÉFRACTION**

## **Résumé de la méthode**



# MÉTHODE DE SISMIQUE RÉFRACTION

Dans cette annexe, on présente les techniques employées par Géophysique Sigma inc. pour faire l'acquisition et l'interprétation des données de réfraction sismique. On revoit aussi brièvement les bases de ces méthodes en nous attardant surtout aux limites inhérentes de chacune d'elles et l'évaluation de la précision des résultats est aussi abordée.

## APERÇU DE LA MÉTHODE

En sismique réfraction, une source d'énergie est utilisée pour transmettre à un instant précis ( $T_0$ ) des ondes acoustiques qui se propagent dans le sol et le roc sous-jacent. Ces ondes acoustiques se divisent en quatre catégories principales ("P", "S", Love et Rayleigh) en fonction de leurs modes de propagation. Les ondes "P" et "S" sont principalement mises à profit dans le calcul des profondeurs et des propriétés élastiques des matériaux. L'onde "P", aussi appelée onde de compression ou onde longitudinale, se propage à une vitesse double de celle de l'onde "S", aussi nommée onde de cisaillement ou onde transversale.

Les ondes "P" et "S" se propagent dans le sol, en se conformant aux lois de la propagation des ondes, en particulier à la loi de Snell-Descartes. De ce fait, dans un terrain constitué de couches horizontales dont la vitesse de propagation pour chaque couche augmente avec la profondeur, une partie des ondes est réfléchiée, et une partie est réfractée à l'interface entre chaque couche. Certaines de ces ondes sont réfractées critiqueusement, c'est-à-dire qu'elles se propagent dans un plan parallèle à la surface du réfracteur. C'est cette propriété qui est mise à profit en sismique réfraction.

La technique consiste donc à mesurer le temps écoulé entre l'instant  $T_0$  et l'arrivée des ondes en surface à des distances connues de la source d'énergie. Lorsque l'on est près de la source, les premières ondes enregistrées sont celles qui se sont propagées dans la première couche; à mesure qu'on s'éloignera de la source, les premières arrivées seront les ondes qui auront voyagé à la surface de chacune des couches puisque la vitesse de propagation dans ces couches étant plus grande, le temps de parcours est plus court.

Dans la pratique, on utilise un dispositif similaire à celui représenté à la figure 2 de la page suivante. Une série de douze (12) ou vingt-quatre (24) géophones sont couplés mécaniquement au sol à intervalle régulier. Ces géophones transforment l'onde acoustique reçue en une onde électrique qui est transmise à un enregistreur numérique à 12 ou 24 canaux qui amplifie, filtre et mémorise la forme de l'onde pour chacun des géophones. Par la suite, ces résultats seront imprimés ou enregistrés sur support magnétique pour être interprétés.





En général, cinq (5) ou sept (7) tirs seront effectués à des endroits stratégiques de manière à résoudre les incertitudes dues à la géométrie des couches et à la non-homogénéité du milieu.

Une illustration de la méthode est montrée à la figure suivante.

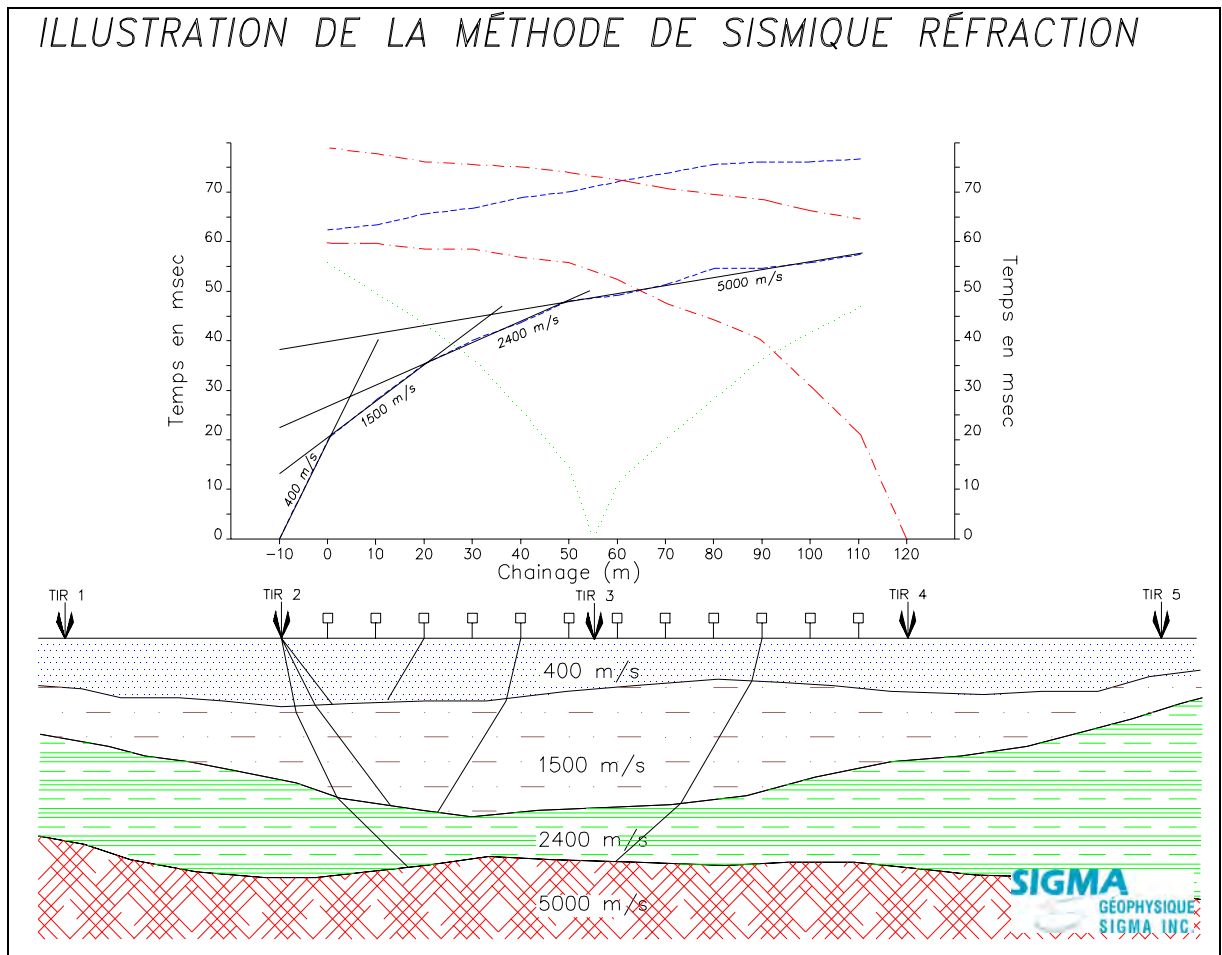


Figure 1 – Illustration de la méthode de sismique réfraction

## MÉTHODE DE TERRAIN

Afin d'éviter l'atténuation de l'onde par la couche superficielle de matériaux lâches, les capteurs utilisés étaient des géophones fermement plantés dans le sol, une fois la couche superficielle enlevée, ou des hydrophones à 1,5 m sous l'eau dans le cas des traversées de rivière.



Les dispositifs de mesure étaient constitués de 24 géophones ou hydrophones espacés de 5, 7,5 ou 10 mètres. Pour obtenir un profilage continu, 7 tirs par dispositif étaient effectués, avec de la dynamite comme source d'énergie. Afin d'assurer une qualité optimale du signal envoyé et de diminuer au maximum les projections, les charges explosives ont été placées à environ 1 m de profondeur dans un trou percé à cet effet. Lorsque cette technique n'était pas utilisable (présence de blocs, roc affleurant), la charge explosive était déposée directement sur le sol.

Une illustration de cette technique est montrée à la figure suivante.

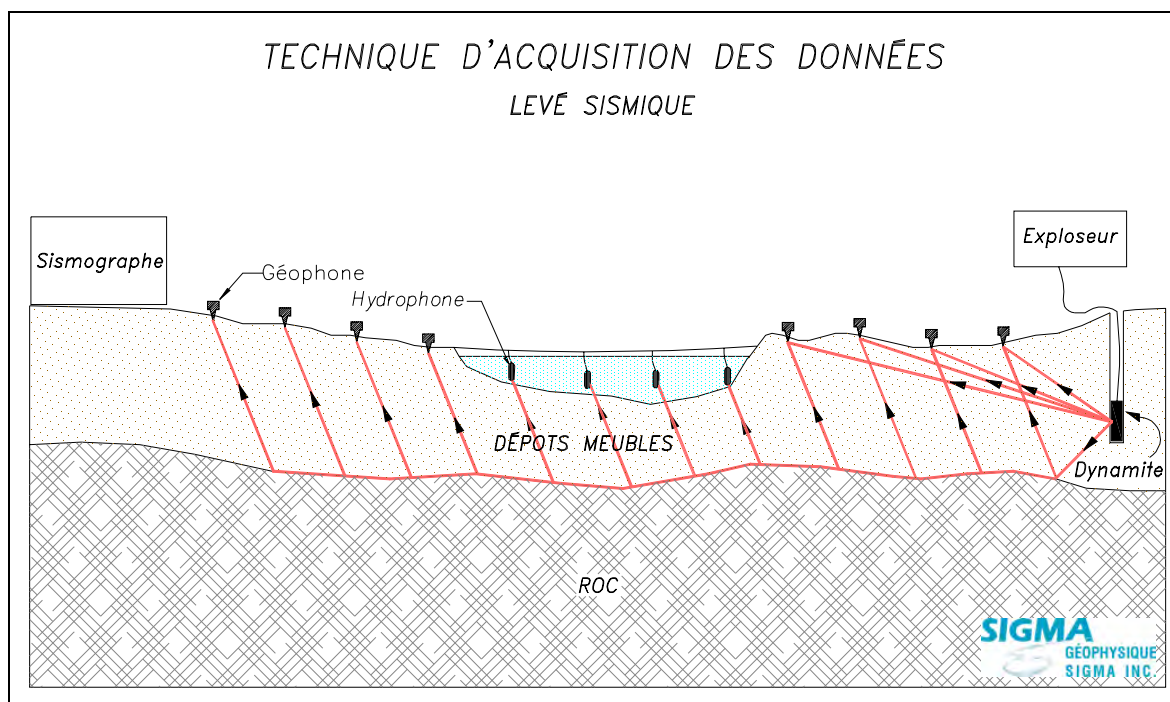


Figure 2 – Technique d'acquisition de données



## INTERPRÉTATION

Plusieurs méthodes d'interprétation des données de sismique réfraction existent. La méthode de Hawkins et la méthode des distances critiques sont fréquemment utilisées ; la première parce qu'elle permet l'interprétation en profilage continu, la seconde parce qu'elle constitue un moyen rapide de contrôler la validité des résultats.

Pour le calcul, les équations suivantes sont utilisées pour déterminer l'épaisseur de la couche  $i$  :

$$Z_i = \frac{T_i}{2} \cdot \frac{V_i}{\cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{V_i}{V_{i+1}}\right)\right)}$$

Équation 1 - Méthode de Hawkins

$$Z_i = \frac{X_{ci}}{2} \cdot \sqrt{\frac{V_{i+1} - V_i}{V_{i+1} + V_i}} + \sum_1^{i-1} (Z_{i-1} \cdot Y_{i+1,i})$$

Équation.1 - Distances critiques

où:

- $Z_i$  est l'épaisseur de la couche  $i$
- $V_i, V_{i+1}$  sont les vitesses de propagation dans les couches  $i, i+1$
- $X_{ci}$  est la distance critique  $i$  (i.e la distance à laquelle le temps de parcours par la couche  $i$  est égale au temps de parcours par la couche  $i+1$ )

Notons que ces méthodes ont été développées en prenant pour hypothèses que les couches sont sub-parallèles, d'épaisseurs suffisantes pour être détectées et que la vitesse de propagation des ondes dans une couche est toujours inférieure à celle de la couche sous-jacente.



## PROBLÈMES PARTICULIERS LORS DE L'INTERPRÉTATION

Bien que dans la majorité des cas, la sismique réfraction permette de définir avec une précision supérieure à 10 % la profondeur des couches incluant le roc, il existe des conditions physiques pour lesquelles la profondeur est mésestimée de façon grossière. Pour certaines de ces situations, la connaissance du problème grâce à d'autres méthodes (forage, résistivité) permet de ramener la marge d'erreur à l'intérieur d'un écart de 10 % généralement accepté.

Au nombre de ces problèmes, on rangera les cas de couches cachées et ceux d'inversion de vitesses. Il existe cependant d'autres cas, tels les dépressions en "V" (sillon) et les failles à déplacement vertical, pour lesquels il n'existe pas de technique d'interprétation exacte, même en présence de forage. Une réinterprétation des données pourra permettre de réduire la marge d'erreur. Cependant, cette réinterprétation étant fondée sur des hypothèses ne pouvant pas être vérifiées, il arrive dans certains cas que la marge d'erreur demeure importante.

Compte tenu de la présence possible de ces problèmes lors de l'exploration sismique effectuée dans le cadre de ce projet, nous incluons ci-après une description plus complète de celles-ci.

Certains de ces cas sont illustrés dans les pages qui suivent.

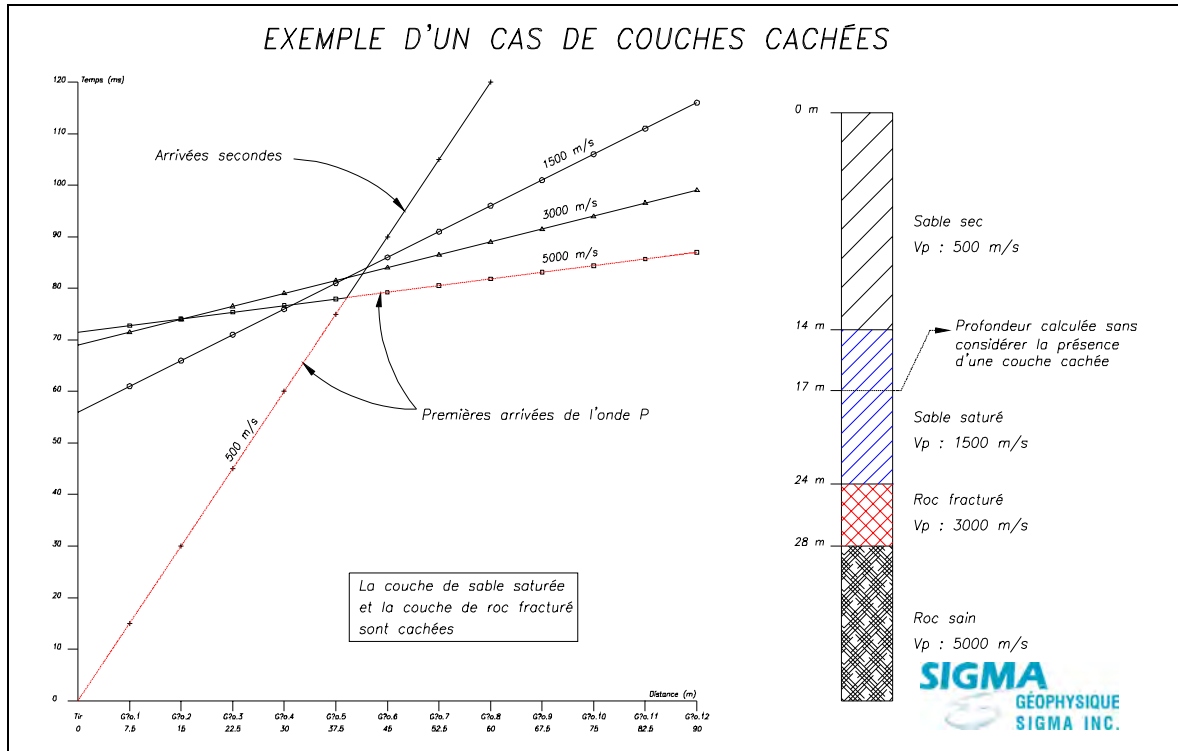
### COUCHES CACHÉES

Dans le cas de la couche cachée, compte tenu de la vitesse de propagation des ondes dans les matériaux, une couche ne possède pas une épaisseur suffisante en comparaison de sa profondeur et ne peut être détectée. Si l'on ignore la présence de ces horizons, la profondeur calculée sera plus petite que la profondeur réelle.

On retrouvera suivante, la modélisation des résultats de sismique réfraction qui seraient obtenus dans un cas similaire aux conditions géologiques révélées par le puits dont la stratigraphie est montrée à droite de la figure. On observe que les arrivées de l'onde P en provenance de la couche de sable saturé et de la couche de roc fracturé arrivent après les arrivées en provenance du roc sain. Sans informations d'autres sources (forage, résistivité, etc.), le calcul préliminaire ne montrerait donc que la présence d'une seule couche à 500 m/s et d'une épaisseur de 18 m, ce qui représenterait une erreur de 35 % sur l'évaluation de la profondeur du roc.



Pour arriver à une interprétation valable, on doit donc identifier dans le train d'arrivées secondes, les arrivées correspondant aux réfractions critiques sur les horizons qui nous intéressent. Cette tâche est en général très difficile puisque ces arrivées secondes se confondent souvent entre elles ou avec les arrivées d'ondes d'un autre type (onde S) ou avec les arrivées correspondant à des réfractions non critiques ou des réflexions. Notons que, dans ce type de problème, la profondeur calculée est toujours inférieure à la profondeur vraie.



**Figure 3 – Exemple d'un cas de couche cachée**



## INVERSION DE VITESSES

Dans le cas de l'inversion de vitesses, la vitesse d'onde dans une couche est inférieure à la vitesse de propagation de l'onde dans la couche située immédiatement au-dessus et dans la couche sous-jacente. En conséquence, il n'y a pas de réfraction critique ; il s'ensuit donc que cette couche n'est pas observée. Elle n'est donc pas prise en considération dans les calculs, ce qui cause des imprécisions non négligeables.

Cette situation, plutôt rare heureusement, est illustrée à la figure suivante : une couche d'argile de 1 m d'épaisseur recouvre un horizon de sable sec de 5 m d'épaisseur reposant sur le roc. À moins d'avoir les résultats d'autres méthodes, ce type de problème est impossible à résoudre étant donné qu'aucun signal n'a été réfracté par l'interface argile-sable ; au mieux, on pourra suspecter la présence d'un tel phénomène. Notons que dans ce type de problème, la profondeur calculée est toujours supérieure à la profondeur vraie, puisque le temps de parcours à travers cette couche invisible est multiplié par une vitesse de propagation plus grande que la réalité. Dans notre exemple, la profondeur du roc calculée uniquement à partir des résultats sismiques conventionnels serait de 12 m ce qui représenterait une erreur de 100 % par rapport à la réalité.

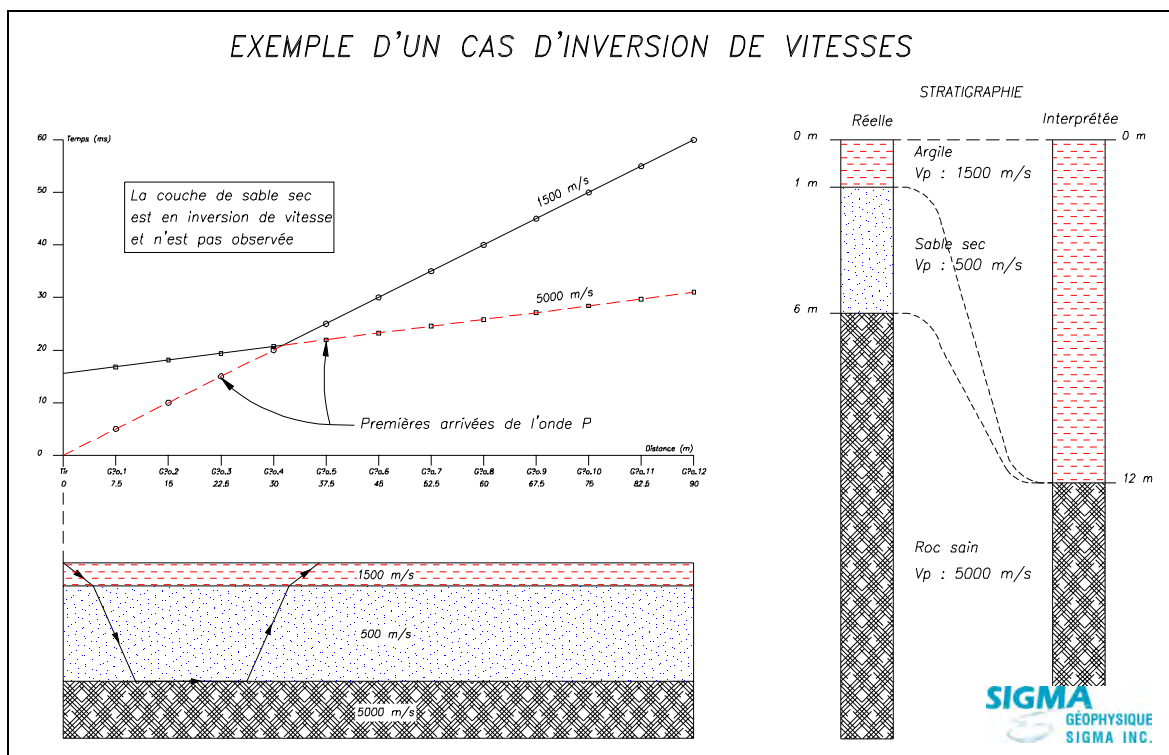


Figure 4 – Exemple d'un cas d'inversion de vitesses



## DÉPRESSION EN "V" - SILLON - FAILLE

Les deux cas précités (couches cachées, inversion), bien qu'ils soient difficilement identifiables à partir des données sismiques seules, peuvent être réinterprétés pour obtenir une précision adéquate lorsque l'on décèle leur présence par forage.

À l'inverse, le problème du sillon est en général facilement identifié par la sismique réfraction, mais une interprétation précise n'est pas possible même en présence de forages. Au mieux, on pourra déterminer la largeur du sillon et la profondeur minimum. Il est aussi possible dans certains cas de donner la forme probable du sillon en étudiant les vitesses de propagation apparentes qui ont été enregistrées. Cependant, il est impossible de donner la valeur de la vitesse des matériaux présents dans la partie profonde du sillon ni de déterminer si le sillon est associé à une zone de cisaillement.

Au départ, un sillon est identifié par l'anomalie de vitesse de propagation observée pour le roc. Cette anomalie se présente comme une baisse importante et soudaine de la vitesse de propagation. Une telle baisse peut être attribuable à d'autres causes, dont les plus probables sont la présence d'une zone fortement cisailée ou jointée ou encore le passage à une unité géologique différente (par exemple la succession basalte (5000 m/s) - tuf (2500 m/s) - basalte). Pour ces deux derniers cas, la vitesse de propagation mesurée pour le roc est réelle et les profondeurs calculées sont exactes.

Dans le cas du sillon cependant, la vitesse mesurée n'est pas réelle et la baisse de vitesse est attribuable à la géométrie du socle rocheux.

La figure ci-contre, illustre certaines causes possibles d'une anomalie de vitesse.

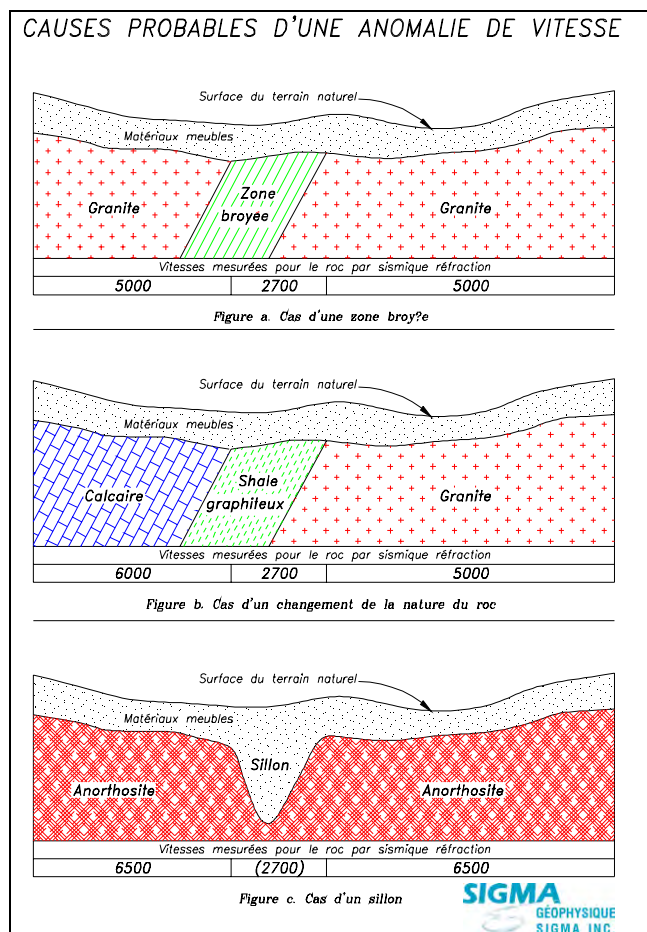


Figure 5 – Quelques causes d'anomalies de vitesse



## VITESSE SISMIQUE ET PARAMÈTRES GÉOMÉCANIQUES

### VITESSE SISMIQUE VS NATURE DES MATÉRIAUX

La vitesse sismique indiquée sur les coupes représente la vitesse de propagation de l'onde P dans le matériau. Cette vitesse de propagation est tributaire des paramètres physiques de ces matériaux. En effet, la vitesse de propagation dépendra de la densité des matériaux, de leur structure, de leur teneur en eau et de leur porosité, pour n'en nommer que quelques-uns.

La compilation des vitesses sismiques en fonction de la nature des matériaux a été réalisée indépendamment par plusieurs chercheurs, soit par mesure directe sur le terrain, soit par mesure en laboratoire.

En première analyse, on observe qu'il n'y a pas de vitesse unique pour un matériau donné, mais plutôt une gamme de vitesses à l'intérieur de laquelle on retrouve un type de matériau donné. Cette variabilité de la vitesse sismique d'un matériau est facilement concevable si l'on considère le nombre de paramètres pouvant influencer la propagation de l'onde sismique.

On peut cependant regrouper ces résultats dans un diagramme montrant les principaux groupes de matériaux ainsi que la gamme de vitesses qui leur est attribuée. Ce diagramme, présenté à la figure 6, permet de prévoir la nature des matériaux présents, en particulier si l'on a une connaissance du contexte géologique de la région où les travaux sismiques ont été réalisés.

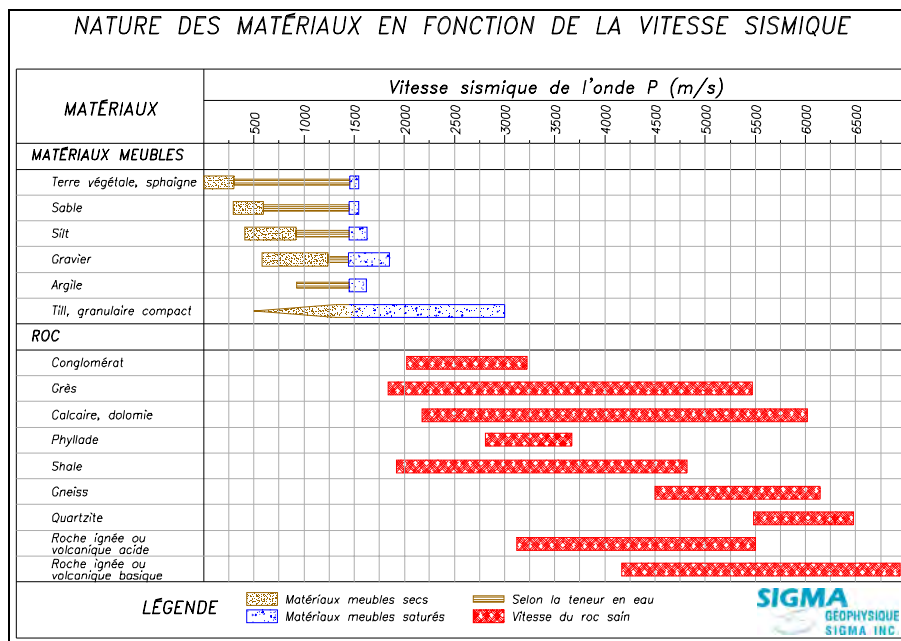


Figure 6 – Nature des matériaux en fonction de la vitesse sismique





On notera que le diagramme est divisé en deux parties pour tenir compte de l'effet, sur la vitesse, de la teneur en eau. En effet, la plupart des matériaux, lorsqu'ils sont sous la nappe phréatique, présentent une vitesse de propagation égale ou supérieure à celle de l'eau, à cause de la saturation des pores par l'eau dont la vitesse de propagation se situe à environ 1 500 m/s.

Certains matériaux, en particulier la matière organique en décomposition comme la mousse de sphaigne, présentent un comportement différent. Même si de prime abord elle devrait être saturée (dans un marécage par exemple), on observe que la vitesse de propagation est beaucoup plus faible que celle de l'eau et on a même observé des vitesses de propagation plus faibles que celles mesurées dans l'air (330 m/s). On croit que la présence de gaz dans les pores serait la cause de cette faible vitesse de propagation.

Dans le cas des matériaux consolidés, les variations de vitesse sont fortement attribuables au degré de fracturation (joints, micro-fissures, zone cisailée). Les roches où la schistosité est bien développée présenteront une forte anisotropie au niveau de la vitesse sismique, selon que le levé est exécuté parallèlement ou perpendiculairement à la schistosité.

## VITESSE SISMIQUE VS QUALITÉ DU ROC

Comme il a été mentionné précédemment, la vitesse de propagation de l'onde sismique dans les matériaux est une indication des propriétés physiques de ceux-ci. Dans le cas du roc, l'un des facteurs déterminant des variations de vitesse pour une unité géologique donnée est son degré de fracturation. Connaissant le type de roc et la vitesse de propagation dans celui-ci lorsqu'il est parfaitement sain, il est possible d'estimer la qualité du roc en utilisant les vitesses sismiques mesurées in situ.

### RELATION ENTRE LA VITESSE SISMIQUE ET LE RQD

Une relation reliant le RQD aux vitesses mesurées sur le terrain et à la vitesse mesurée en laboratoire sur du roc sain a été développée par Coon et Merritt (1970). Cette relation s'établit comme suit:

$$RQD = \frac{\log\left(\frac{V_T}{V_L}\right)^2 - \log(0,21)}{0,0070}$$

Équation 2 - RQD vs  $V_p$

où  $V_T$  est la vitesse de propagation mesurée sur le terrain  
 $V_L$  est la vitesse de propagation mesurée en laboratoire



Si l'on considère les types de roc suivants : shale, granite, gneiss, on observe que la vitesse de propagation dans un échantillon de roc sain est respectivement d'environ 4200 m/s, 5500 m/s et 6200 m/s.

En utilisant ces valeurs, on a généré le graphique de la figure 7 sur lequel on observe que pour une même vitesse de 4000 m/s le shale sera d'excellente qualité alors que le granite sera de bonne qualité et le gneiss de qualité moyenne.

On conçoit donc qu'il est important de tenir compte du type de roc lorsque l'on tente d'interpréter la qualité du roc à partir des vitesses de propagation mesurées sur le terrain.

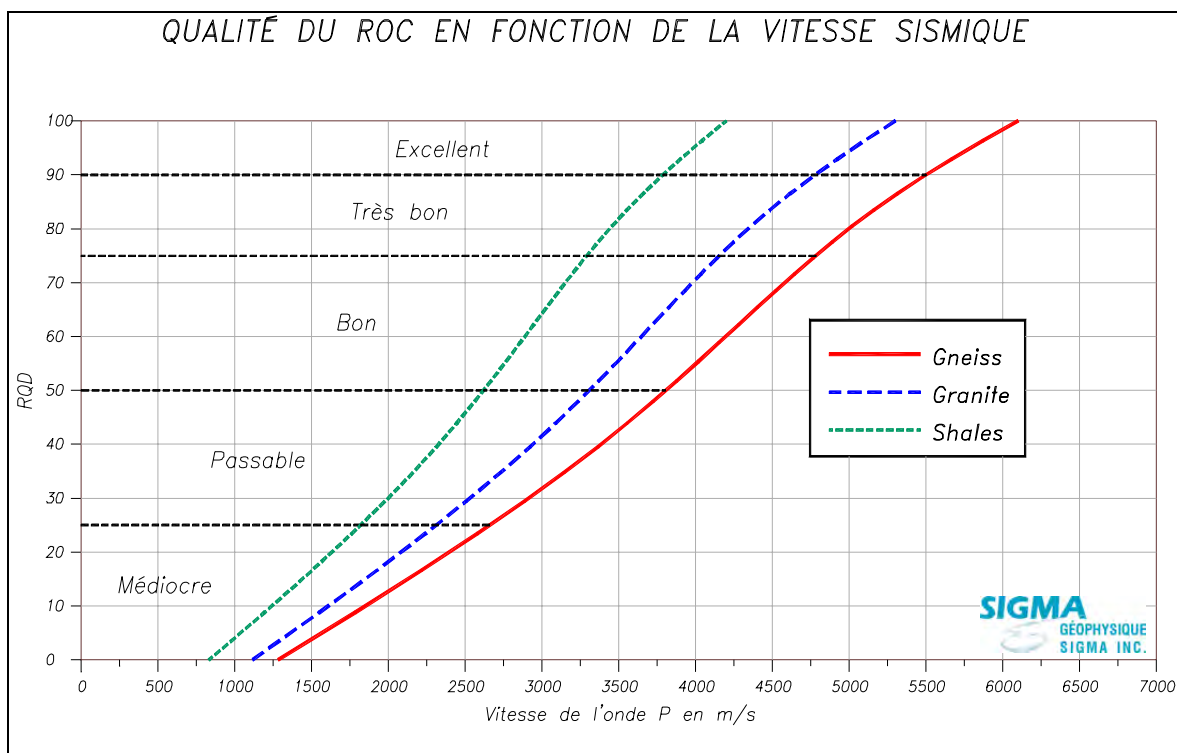


Figure 7 – Qualité du roc en fonction de la vitesse sismique



## RELATION ENTRE LA VITESSE SISMIQUE ET LES PROPRIÉTÉS ÉLASTIQUES

En général, pour mesurer le module d'élasticité dynamique (module de Young) par méthode sismique, on mesure la vitesse des ondes P et des ondes S et l'on estime la densité volumique. Comme la mesure de la vitesse de l'onde S ne faisait pas partie du présent mandat, il n'est pas possible de calculer de façon précise la valeur du module. La relation empirique de Brown et Robertshaw permet cependant d'évaluer ce module à partir de la vitesse de l'onde P seule en considérant que le coefficient de Poisson est de 0,25. Cette relation s'énonce comme suit :

$$E = V_p^{2,34} \times 1,1112 \times 10^{-7}$$

Équation.3 - Relation de Brown-Robertshaw

où  $V_p$  est la vitesse de l'onde de compression exprimée en m/s  
 $E$  est le module de Young exprimé en gigapascal.

L'équation est exprimée graphiquement à la figure 8.

Il est important de préciser que les valeurs obtenues par méthode sismique sont des valeurs dynamiques calculées à partir de l'hypothèse que le matériau investigué est parfaitement isotrope, que les déformations sont très faibles et qu'elles ne subsistent pas après le passage de l'onde sismique.

Une comparaison du module statique avec le module dynamique montre que plus le matériau est anisotrope et plus la vitesse de propagation est basse, plus le rapport module dynamique sur module statique est élevé.

Pour un matériau parfaitement isotrope montrant une vitesse de propagation élevé, ce rapport est près de 1 alors que pour un matériau anisotrope à faible vitesse de propagation, il peut facilement atteindre 2,5.

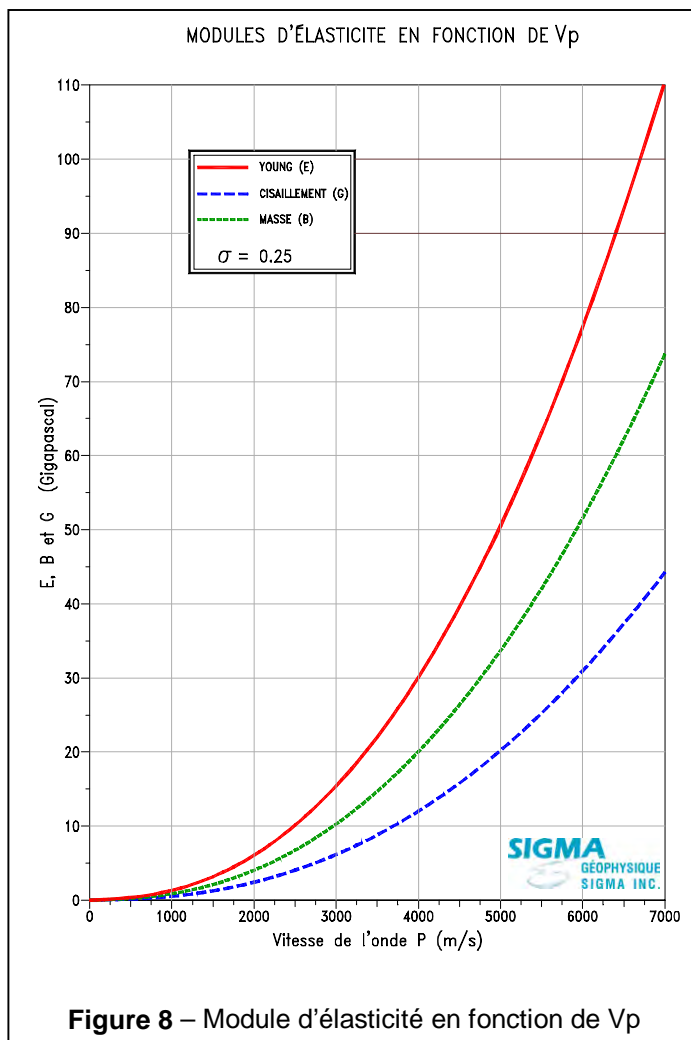


Figure 8 – Module d'élasticité en fonction de  $V_p$



## PRÉCISION DES RÉSULTATS

Lorsque les conditions énumérées dans la section qui traite des bases théoriques de la méthode sont présentes soient :

- **Les couches de matériaux sont sub-parallèles**
- **La vitesse de propagation dans chacune des couches est constante**
- **La vitesse des couches augmente toujours avec la profondeur**
- **Il n'existe pas de condition d'inversion de vitesses ou de couches cachées**

l'écart sur le calcul des profondeurs est alors inférieur à 10 % pour les profondeurs de plus de 10 mètres, et d'environ 1 mètre pour des profondeurs de moins de 10 mètres.

## COUCHES CACHÉES ET INVERSION DE VITESSES

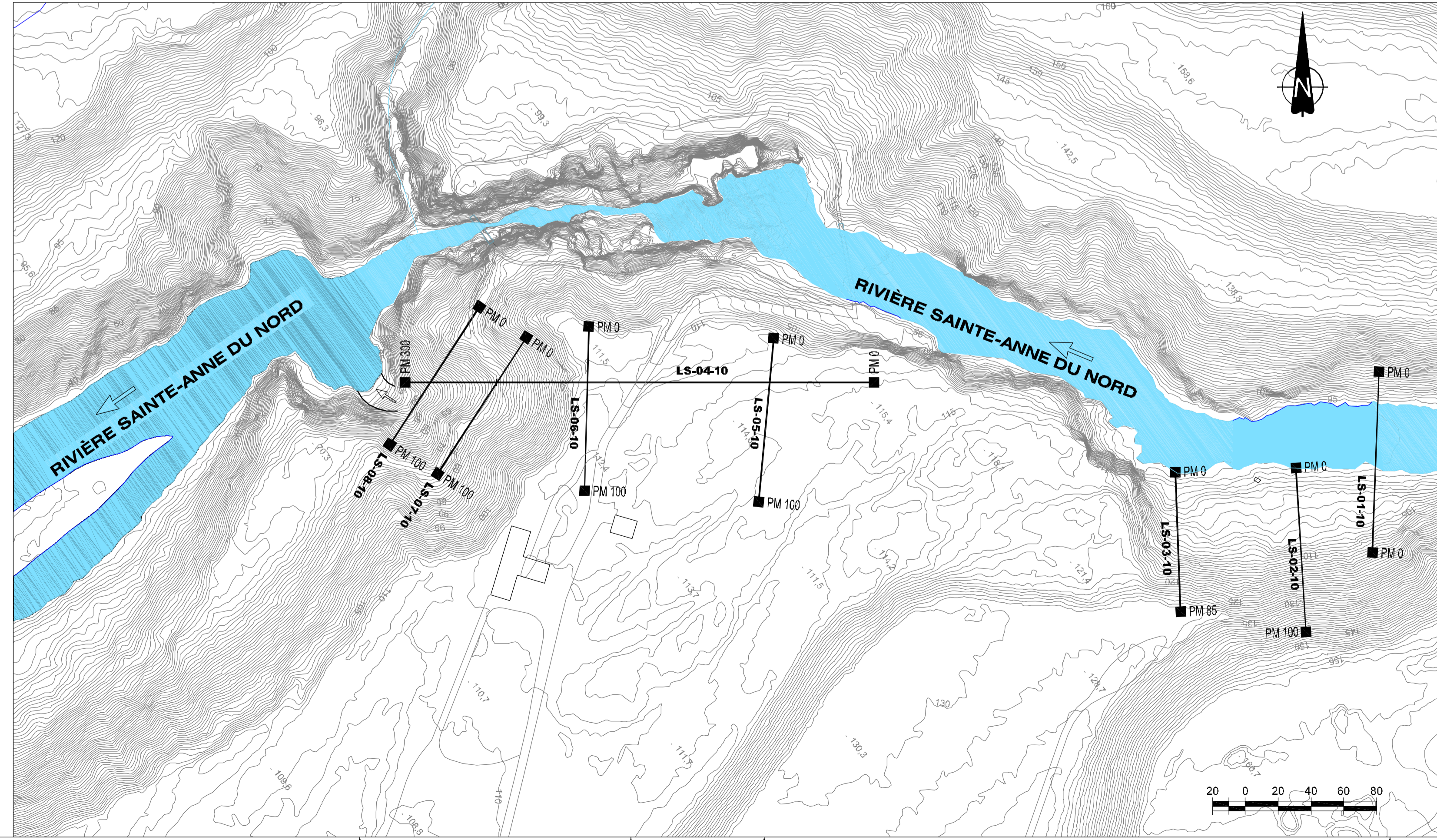
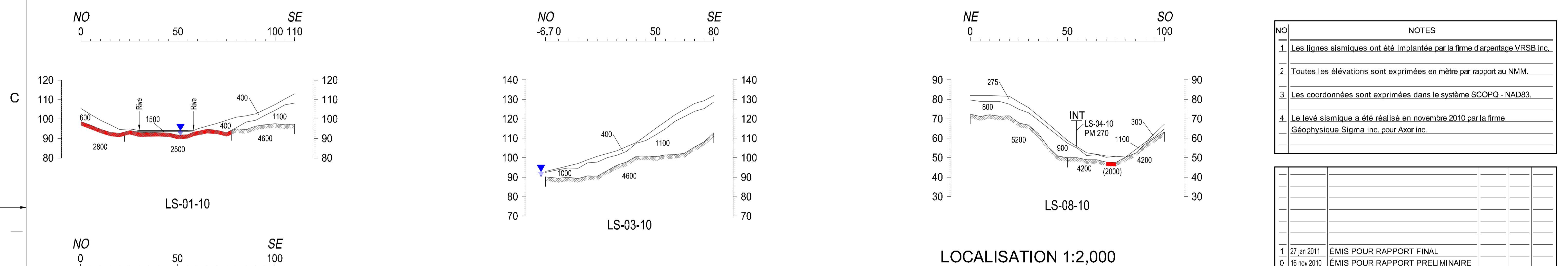
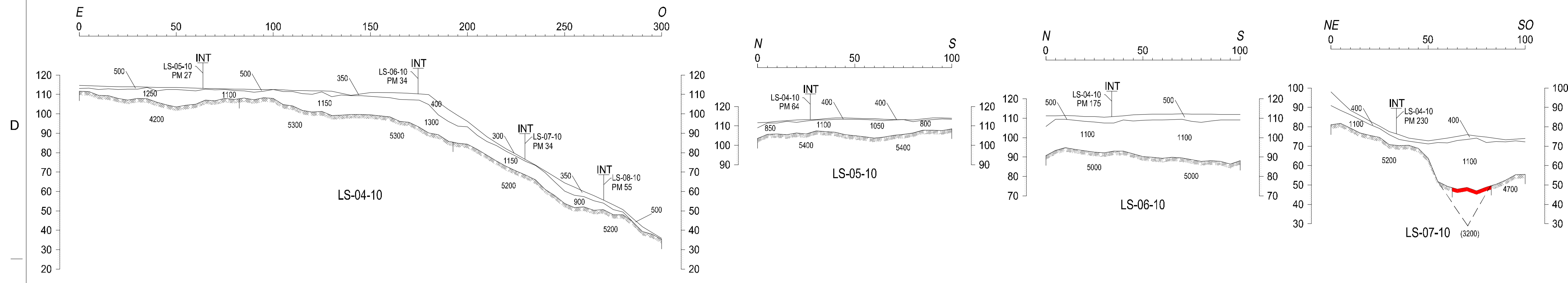
Dans le cas de la couche cachée et de l'inversion de vitesses, en l'absence de forage de validation, l'erreur sur la profondeur totale peut être de l'ordre de 25 à 50 % et même plus pour l'inversion de vitesses. Cependant, si le phénomène est observé par forage ou tout autre moyen, l'erreur peut facilement être ramenée à l'intérieur de la précision générale de la méthode, soit 10%.

## CAS D'UN SILLON

Dans le cas du sillon, l'erreur peut dans certains cas être ramenée à environ 30 % de la profondeur totale et l'erreur sera toujours négative, c'est-à-dire que la profondeur calculée sera toujours plus faible que la réalité. Il est donc essentiel de procéder par forage pour définir avec précision la forme réelle du sillon. De plus, comme la vitesse mesurée n'est pas la vitesse réelle de propagation dans le roc, une autre méthode devra être utilisée pour vérifier la qualité du roc. On peut penser à une méthode géophysique (résistivité, magnétisme, diagraphie ("crosshole"), tomographie) mais nous croyons que dans l'état actuel des techniques disponibles, le forage demeure la première étape à réaliser surtout si les dimensions du sillon deviennent très faibles.

# PLAN NO 10529-01





NO	NOTES
1	Les lignes sismiques ont été implantées par la firme d'arpentage VRSB inc.
2	Toutes les élévations sont exprimées en mètre par rapport au NMM.
3	Les coordonnées sont exprimées dans le système SCOPQ - NAD83.
4	Le levé sismique a été réalisé en novembre 2010 par la firme Géophysique Sigma inc. pour Axor inc.


NO	DATE	MODIFICATIONS	REPERE	Sigma Client APPROUVÉ
1	27 jan 2011	ÉMIS POUR RAPPORT FINAL		
0	16 nov 2010	ÉMIS POUR RAPPORT PRELIMINAIRE		

CONSULTANTS			
<b>SIGMA</b> GÉOPHYSIQUE SIGMA INC. 1400 Marie-Victorin, bureau 200 Saint-Bruno, QC J3V 6B9 Téléphone : (450) 441-4800 Fax : (514) 227-5378 info@geosigma.com			
Dessiné	cp	Véifié	cp
Projeté	C. Provost, ing.	Approuvé	cp
NO DU CONTRAT	NO DU DESSIN	MODIFICATION	DATE
C10529	10529-01	0	27-JAN-2011



LÉGENDE	
PROFIL DU SOCLE ROCHEUX	
ANOMALIE DE VITESSE DANS LE ROC	
PROFIL D'UN RÉFRACTEUR a) INTERPRÉTÉ	a)
b) PRÉSUMÉ	b)
VITESSE DE PROPAGATION DE L'ONDE P (m/s)	5000
VITESSE ESTIMÉE (m/s)	(2000)
POINT CARDINAL (Sud-ouest)	SO
POSITION DES LIGNES SISMQUES	

ÉCHELLE	
10 0 10 20 30 40	HOR: 1:1,000
10 0 10 20 30 40	VER: 1:1,000
DIMENSIONS Mètre	



**PROJET HYDRO-CANYON**

Levé sismique 2010  
 Coupes sismiques  
 LS-01-10 à LS-08-10  
 Carte de localisation des lignes sismiques

DATE: 27-JAN-2011 | DESSIN: 10529-01 | RÉV. 1