

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Faculté de génie

Département de génie civil

ÉTUDE PARASISMIQUE POUR L'AGRANDISSEMENT DU  
SECTEUR NORD – BFI USINE DE TRIAGE LACHENAIE LTÉE

Rapport GEO-01-07

Préparé par

Mourad Karray et Guy Lefebvre  
Département de génie civil  
Université de Sherbrooke

Présenté à

GSI ENVIRONNEMENT  
1471 Boulevard Lionel-Boulet  
Varenes (Québec) J1X 1P7

Décembre 2001

# TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION .....	3
2.	DESCRIPTION DU SITE .....	4
2.1	Localisation .....	4
2.2	Stratigraphie .....	4
2.3	Géométrie des talus .....	6
2.4	Caractéristiques des matières résiduelles .....	6
3.	MODÉLISATION .....	7
4.	CALCUL DES TASSEMENTS (Parties Est et Ouest) .....	9
5.	ANALYSE DE STABILITÉ STATIQUE.....	11
5.1	Méthode d'évaluation du facteur de sécurité .....	11
5.2	Calcul des facteurs de sécurité statique.....	12
6.	ANALYSE DYNAMIQUE .....	22
6.1	Évaluation des paramètres et du risque sismique.....	23
6.2	Séisme de dimensionnement pour Lachenaie .....	23
6.2.1	Accélération et vitesse de design.....	23
6.2.2	Spectre de dimensionnement standard .....	24
6.3	Analyse de stabilité dynamique.....	25
7.	CONCLUSION.....	33
	BIBLIOGRAPHIE .....	34
	ANNEXE A Mouvements sismiques utilisés pour la région de Lachenaie.....	35
	ANNEXE B Résultats des essais MASW pour le site de BFI Usine de Triage Lachenaie Ltée (Rapport Geo-01-06).....	38

## **1 INTRODUCTION**

Ce rapport présente les résultats des analyses de stabilité sous sollicitation sismique pour la configuration envisagée dans l'agrandissement du secteur nord au site de BFI Usine de Triage Lachenaie Ltée (UTL). Ces analyses ont été réalisées à l'Université de Sherbrooke à la demande de GSI ENVIRONNEMENT (lettre du 15 août 2001).

L'Université a d'abord réalisé des mesures sur le terrain au moyen de la méthode MASW (Modal Analysis of Surface Waves) afin de déterminer les paramètres nécessaires à la caractérisation dynamique des argiles de la fondation et des matières résiduelles. Le rapport présentant les résultats des essais MASW est reproduit à l'annexe B.

Le comportement sous sollicitation sismique a été examiné au moyen d'analyse contrainte-déformation qui simule de façon numérique la réponse dynamique des ouvrages envisagés sous des séismes représentatifs de la région de Lachenaie selon le Code national du bâtiment. Ce modèle et les paramètres utilisés ont d'abord été calibrés par le calcul des tassements de la fondation argileuse (section 4) et par l'analyse de la stabilité statique (section 5). Bien que déjà réalisée par GSI au moyen de méthodes basées sur l'équilibre limite, l'analyse de la stabilité statique en contrainte-déformation était particulièrement importante afin que les résultats des analyses dynamiques puissent être appréciés par comparaison avec l'état de stabilité statique; par exemple, en termes de déformations additionnelles lors d'un séisme par rapport à celles induites sous le seul effet de la gravité (stabilité statique).

## 2 DESCRIPTION DU SITE

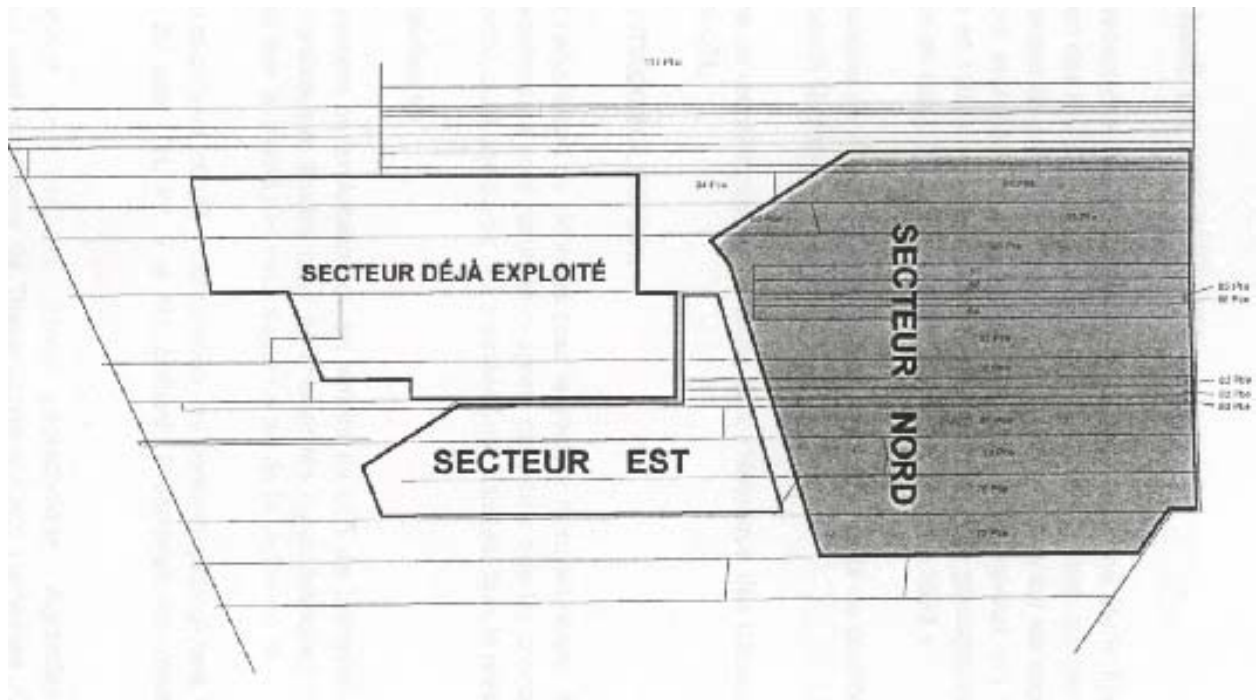
### 2.1 Localisation

Le site de BFI Usine de Triage Lachenaie Ltée (UTL) est situé au nord de la ville de Lachenaie (Québec) en bordure de l'autoroute 640. L'agrandissement futur du site (Fig. 1) est situé au nord de l'ancienne zone d'enfouissement et de la zone actuellement en exploitation.

### 2.2 Stratigraphie

Selon les études géotechniques réalisées par GSI Environnement, le terrain meuble de la nouvelle zone d'exploitation serait composé de quatre couches qui peuvent être décrites comme suit :

- Une couche de terre végétale discontinue de moins de 0,3 m d'épaisseur.
- Une couche de sable de surface constituée de sable moyen à grossier avec des traces de silt, qui devient plus fin et silteux au contact de la couche d'argile. Cette couche a une épaisseur inférieure à 1,2 m lorsqu'elle existe. Cette couche ne semble pas exister aux endroits où les essais MASW conduits par l'Université de Sherbrooke ont été réalisés.
- Une couche d'argile silteuse assez homogène d'une épaisseur variant entre 17,1 et 23,6 m. Cette couche est constituée d'une argile silteuse avec des traces de coquillages et de matières organiques qui peut se diviser en deux couches (argiles supérieure et inférieure). La couche d'argile supérieure se distingue par une teneur en eau ( $w_n = 65\%$ ) plus élevée que celle de l'argile inférieure. Cette couche d'argile dont l'épaisseur moyenne varie entre 12 et 17 m est caractérisée par un indice de plasticité de 37. La couche d'argile inférieure d'une épaisseur moyenne de 8 m possède une teneur en eau naturelle de 56 % et un indice de plasticité de 29.
- Une couche de till de fond dont la composition varie avec la profondeur. D'une manière générale, cette couche est composée de sable et de silt avec des fractions d'argile et de gravier. La compacité varie de moyenne à dense. L'épaisseur moyenne de la couche de till est de 3 m. Des épaisseurs de l'ordre de 5 m ont également été rencontrées à certains endroits.



**Figure 1** Localisation des secteurs exploités, actuel et futur

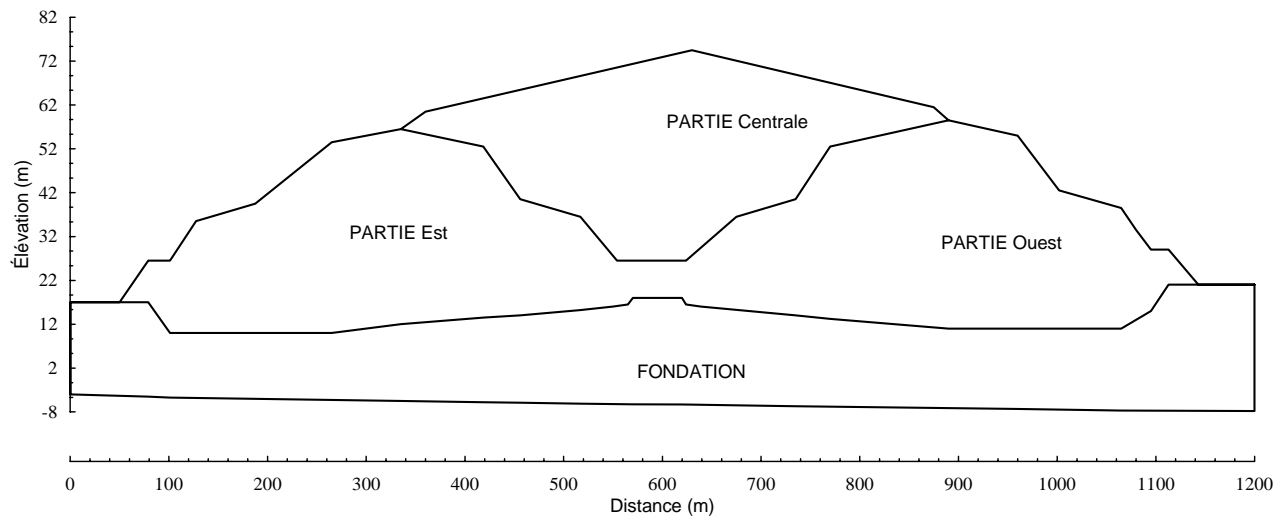
Les couches de sol décrites plus haut surmontent un socle rocheux composé de schiste argileux. La profondeur du socle rocheux varie selon la coupe stratigraphique fournie par GSI entre 24 et 26 m. Ces profondeurs ont été confirmées aux sites des essais MASW réalisés par l'Université de Sherbrooke au mois d'octobre 2001 (Annexe B). Les études géotechniques permettent d'identifier les paramètres suivants (tableau 1) pour fins d'analyse de la stabilité statique et dynamique.

**Tableau 1** Caractéristiques mécaniques utilisées dans le calcul des tassements et de stabilité

Élévations (m)	sol	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (deg.)	Cu (kPa)
22 à 16	Argile sup.	16,2	0	39 à 44
16 à 5	Argile sup.	16,2	0	44 à 67
5 à -3	Argile inf.	16,6	0	67 à 75
-3 -6	till	18,0	30	0

## 2.3 Géométrie des talus

Le projet d'agrandissement nord au site UTL est constitué de deux étapes, soit les parties Est et Ouest de la cellule et la partie centrale (Fig. 2). Le remplissage des excavations dans la fondation argileuse et la mise en place des deux parties Est et Ouest seront réalisés dans un premier temps. Lorsque cette étape sera complétée, le remplissage de la partie centrale, entre les deux bandes initiales, sera réalisé (Fig. 2).



**Figure 2** Coupe de la future cellule

## 2.4 Caractéristiques des matières résiduelles

Les essais MASW réalisés par l'Université de Sherbrooke (Annexe B) sur des anciennes et des nouvelles matières résiduelles montrent que ces dernières possèdent des vitesses de propagation des ondes de cisaillement assez importantes qui indiquent une bonne compétence mécanique après tassement. Ces essais ont également permis de déterminer les modules de cisaillement à faibles déformations nécessaires pour l'analyse dynamique. Selon l'étude géotechnique réalisée par GSI Environnement, le poids volumique nécessaire pour les calculs de tassement et de stabilité varie selon le degré de compaction de  $10 \text{ kN/m}^3$  en surface jusqu'à  $13 \text{ kN/m}^3$  à des profondeurs supérieures à 30 m. GSI a retenu, en se basant sur la littérature, des valeurs de  $\phi'$  et  $C'$  de  $25^\circ$  et de 5 kPa respectivement. Ces valeurs ont été adoptées dans la présente analyse.

### 3 MODÉLISATION

Le programme FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) est utilisé dans cette étude pour analyser la stabilité statique et dynamique de l'ouvrage. FLAC a été développé par ITASCA Consulting Group Inc. et il est décrit comme un programme de différences finies qui utilise l'analyse Lagrangienne.

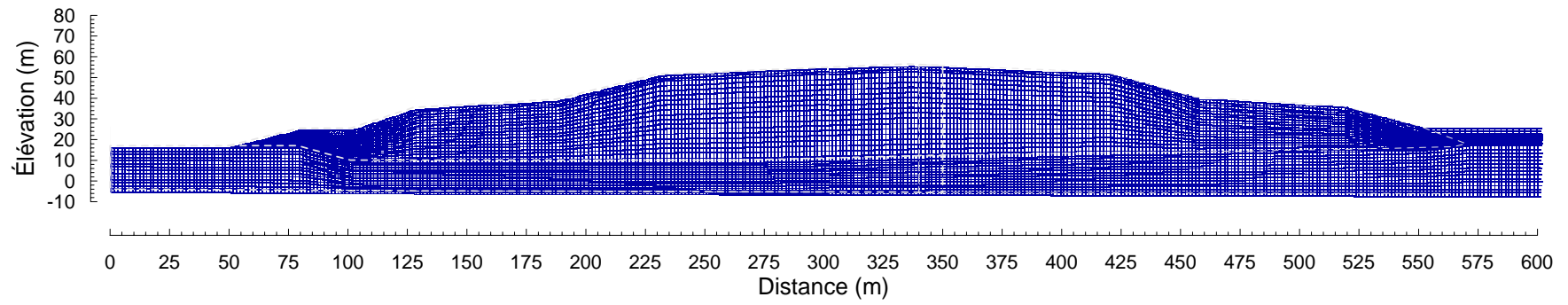
Le maillage employé pour l'analyse statique et dynamique est présenté aux figures 3a et 3b. Environ 26400 (800x33) éléments ont été utilisés dans ces analyses, ce qui correspond à une dimension moyenne des éléments de 1,5 x 1,5 m.

FLAC permet d'effectuer une analyse en deux dimensions en utilisant différents types de comportements. FLAC intègre également un langage de programmation (FISH) qui permet de modéliser tout type de comportement. Dans cette étude, on a choisi de considérer un comportement élastique parfaitement plastique avec un critère de rupture Mohr-Coulomb dans le cas dynamique. Pour le calcul statique, le cisaillement a été modélisé à l'aide de lois de comportement compatibles dans le cas des matières résiduelles et de la fondation (argile) tout en utilisant le critère Mohr-Coulomb. Les analyses statiques ont été effectuées en considérant des modules de compressibilité très élevés afin de tenir compte uniquement du cisaillement et simuler une fondation non drainée.

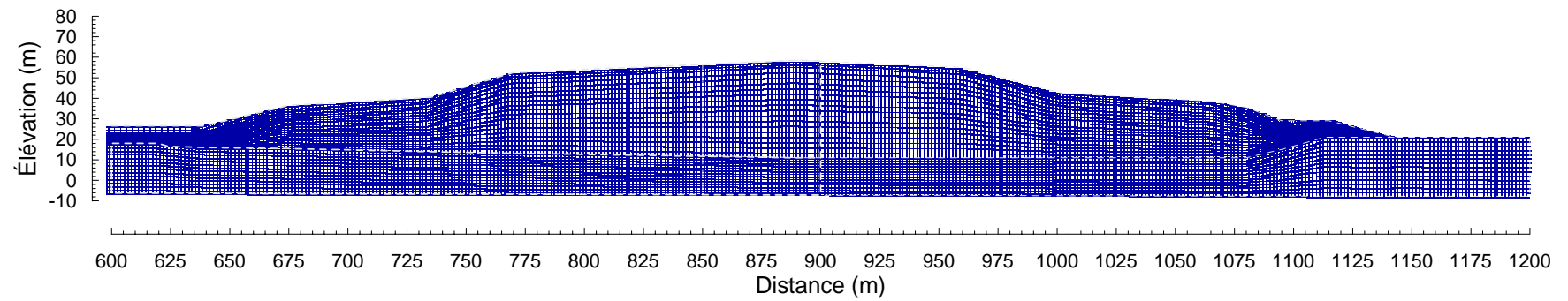
Dans les analyses statiques et dynamiques, si les contraintes pour un élément donné sont situées à l'intérieur de l'enveloppe de rupture, l'élément est considéré comme étant encore dans le domaine élastique. Si toutefois les contraintes se retrouvent à l'extérieur de l'enveloppe, l'élément est alors considéré comme étant plastifié et l'équilibre est réévalué en réajustant ces contraintes à l'enveloppe de rupture. La rupture globale se produit lorsqu'il y a suffisamment d'éléments plastifiés pour conduire au développement de déplacements importants.

Pour le calcul dynamique, l'amortissement dit de Rayleigh est utilisé. Ce dernier est constitué de deux éléments visqueux proportionnels à la masse et à la rigidité :

$$[C] = \xi_{\min} [M] + \xi_{\min} / \omega_{\min} [K] \quad (1)$$



**Figure 3a** Modélisation de la partie Est - BFI Usine de Triage Lachenaie Ltée (secteur nord)



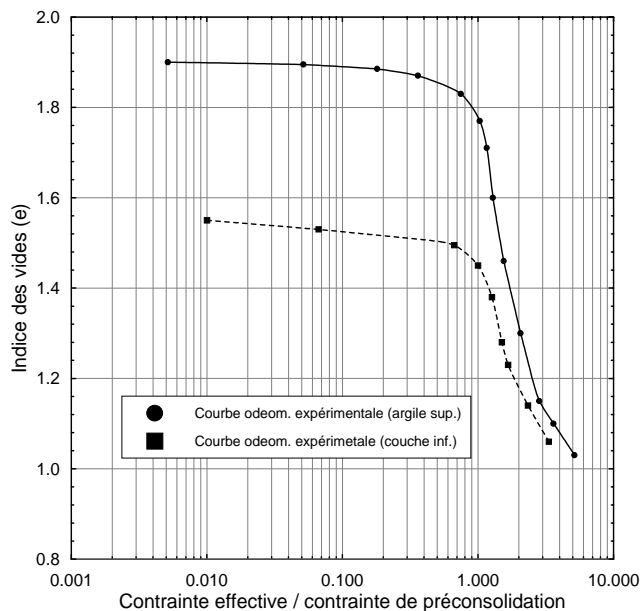
**Figure 3b** Modélisation de la partie Ouest - BFI Usine de Triage Lachenaie Ltée(secteur nord)



[M] définit la matrice masse et [K] la matrice de rigidité.  $\xi_{\min}$  est le taux d'amortissement minimum défini à la fréquence  $\omega_{\min}$ . Une valeur de  $\xi_{\min}$  de 5 % à une fréquence minimale de 2 Hz a été adoptée comme c'est généralement le cas dans ce type d'analyse (Karray, 1994).

#### 4 CALCUL DES TASSEMENTS (Parties Est et Ouest)

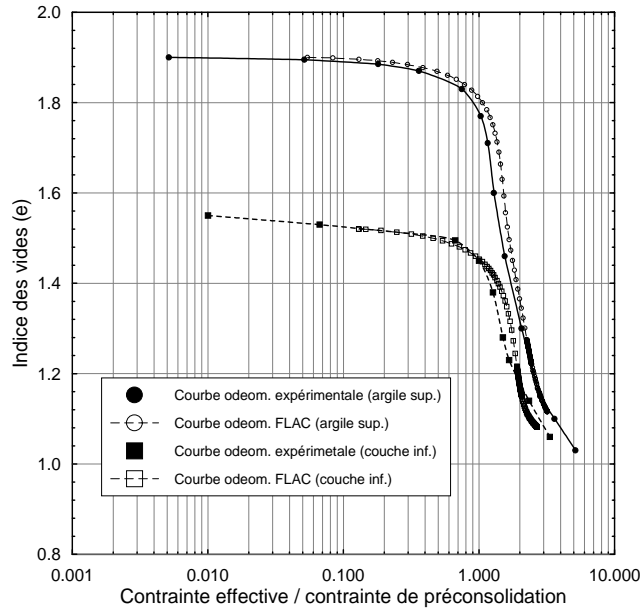
Afin de valider le maillage ainsi que les paramètres utilisés pour l'analyse de la stabilité statique et dynamique de l'ouvrage, les tassements de la fondation ont été évalués à l'aide de FLAC sous les remblais de matières résiduelles de l'étape 1. Le comportement des argiles (inférieure et supérieure) de la fondation a été modélisé à l'aide du programme FISH incorporé dans FLAC. Ces comportements (courbes oedométriques) ont été établis à partir de l'étude géotechnique réalisée par GSI Environnement (N/D : 293-2549-151) et présentés à la figure 4 (courbe oedométrique normalisée par la contrainte de préconsolidation).



**Figure 4** Courbes oedométriques moyennes normalisées par la contrainte de préconsolidation utilisées pour le calcul des tassements

**Tableau 2** Contrainte de préconsolidation des argiles (supérieure et inférieure)

Élévations (m)	Profondeurs (m)	$\sigma'_p$ (kPa)
11,7	6,3	194
5,7	12,3	250
-0,3	18,3	300

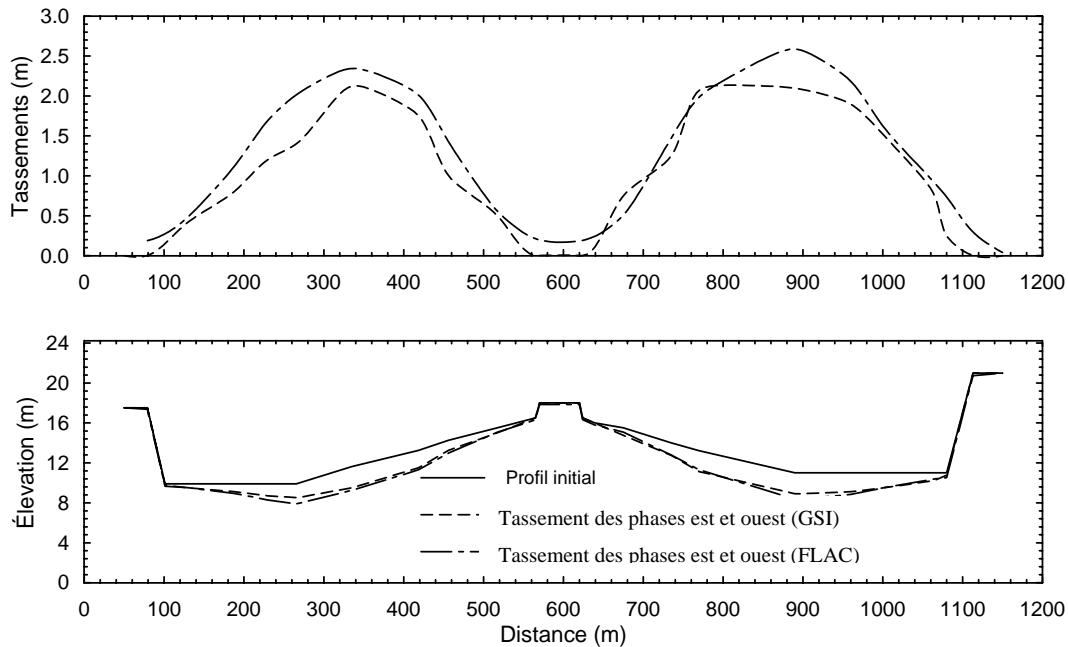


**Figure 5** Comparaison des courbes oedométriques utilisées et celles calculées à l'aide de FLAC

Les contraintes de préconsolidation ont également été déterminées à partir de l'étude géotechnique réalisée par GSI Environnement. Le tableau 2 présente les valeurs de  $\sigma'_p$  utilisées en fonction de l'élévation.

Dans le cas des matières résiduelles et de la couche de till, des valeurs du module de Young de 120 MPa ont été considérées. Ces modules correspondent à des vitesses des ondes de cisaillement typiques de l'ordre de 185 m/s (Annexe B). Il est à noter que l'étude vise essentiellement à déterminer les tassements dans la fondation argileuse.

La figure 5 montre des courbes de déformation (oedométriques) typiques obtenues à l'aide de FLAC à des élévations de 7,2 m et de 1,12 m au centre de la digue partie Est (distance 334 m dans le modèle considéré). Ces courbes sont en bon accord avec les relations considérées pour la modélisation de la déformation des argiles supérieure et inférieure (figures 4 et 5). La figure 6 présente le tassement total après consolidation de la fondation (après excavation) déterminé à l'aide de FLAC. Ces tassements sont très semblables à ceux évalués par GSI Environnement avec un tassement maximum d'environ 2,4 m en dessous de la partie Est et de 2,6 m en dessous de la partie Ouest. Bien que comportant nécessairement une certaine généralisation, les lois de



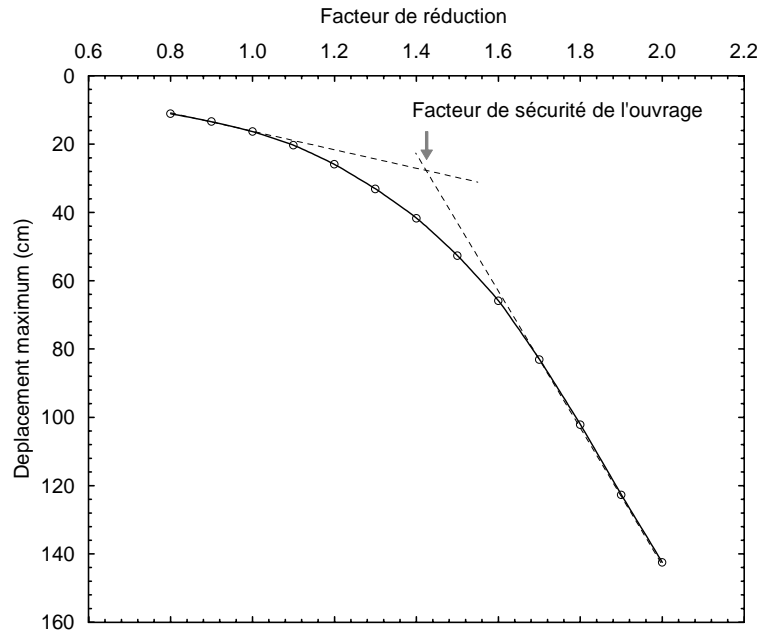
**Figure 6** Comparaison des tassements de l'excavation dans l'argile déterminés à l'aide de FLAC et ceux donnés par GSI Environnement

comportement utilisées permettent une simulation réaliste, comme le montre la comparaison de la figure 6.

## 5 ANALYSE DE STABILITÉ STATIQUE

### 5.1 Méthode d'évaluation du facteur de sécurité

Traditionnellement, la méthode des éléments finis ne permet pas d'avoir accès à un facteur de sécurité global de l'ouvrage. Toutefois, un nouveau concept est utilisé dans cette étude pour permettre la détermination d'un facteur de sécurité équivalent qui permet de quantifier la sécurité de l'ouvrage (Karray et Lefebvre 2000, Karray et al. 2001). Le principe d'évaluation de ce facteur est différent de celui d'une analyse classique par une méthode d'analyse à l'équilibre limite. En fait, puisque l'ouvrage est modélisé par éléments finis, l'approche consiste à déterminer les déplacements maximums selon l'axe des x pour différents systèmes de sol dont les résistances ( $C_u$  et  $\phi$ ) sont celles de l'ouvrage original divisées par un facteur de réduction ( $C_u/F.R$  et  $\phi/F.R$ ). Ainsi, le facteur de réduction qui occasionne une variation importante du déplacement selon l'axe

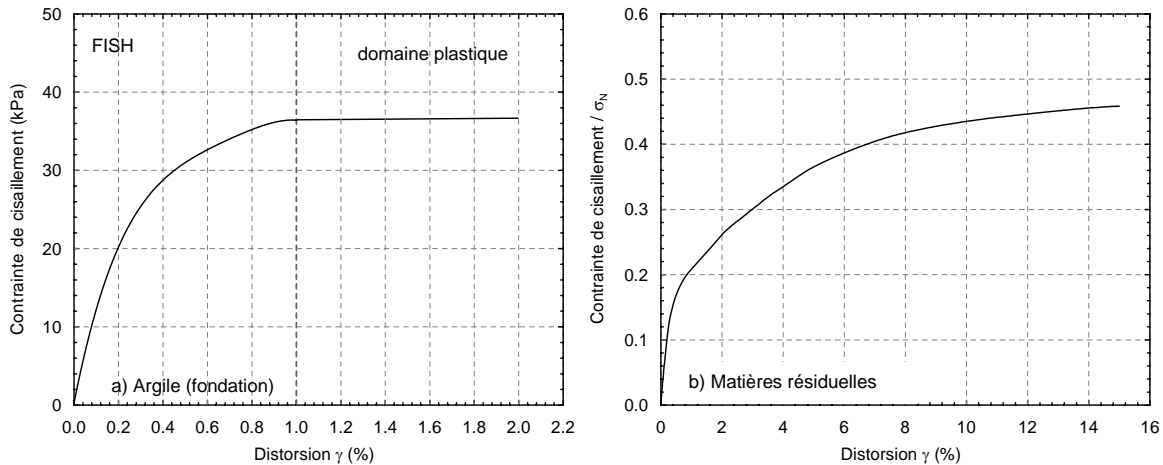


**Figure 7** Illustration de la méthode d'évaluation du facteur de sécurité

des  $x$  c'est-à-dire le début de la plastification généralisée, correspond théoriquement au facteur de sécurité recherché. La figure 7 montre un exemple de courbe de déplacement d'un ouvrage suivant l'axe des  $x$  (horizontal) en fonction des facteurs de pondération des propriétés ( $C_u$  et  $\phi$ ) du sol. Une valeur de F.R. égale à 1 correspond aux valeurs réelles de résistance. Il est possible de voir que lorsque la résistance du sol est divisée par un facteur de 1,4 ou plus, l'augmentation des déplacements est plus importante.

## 5.2 Calcul des facteurs de sécurité statique

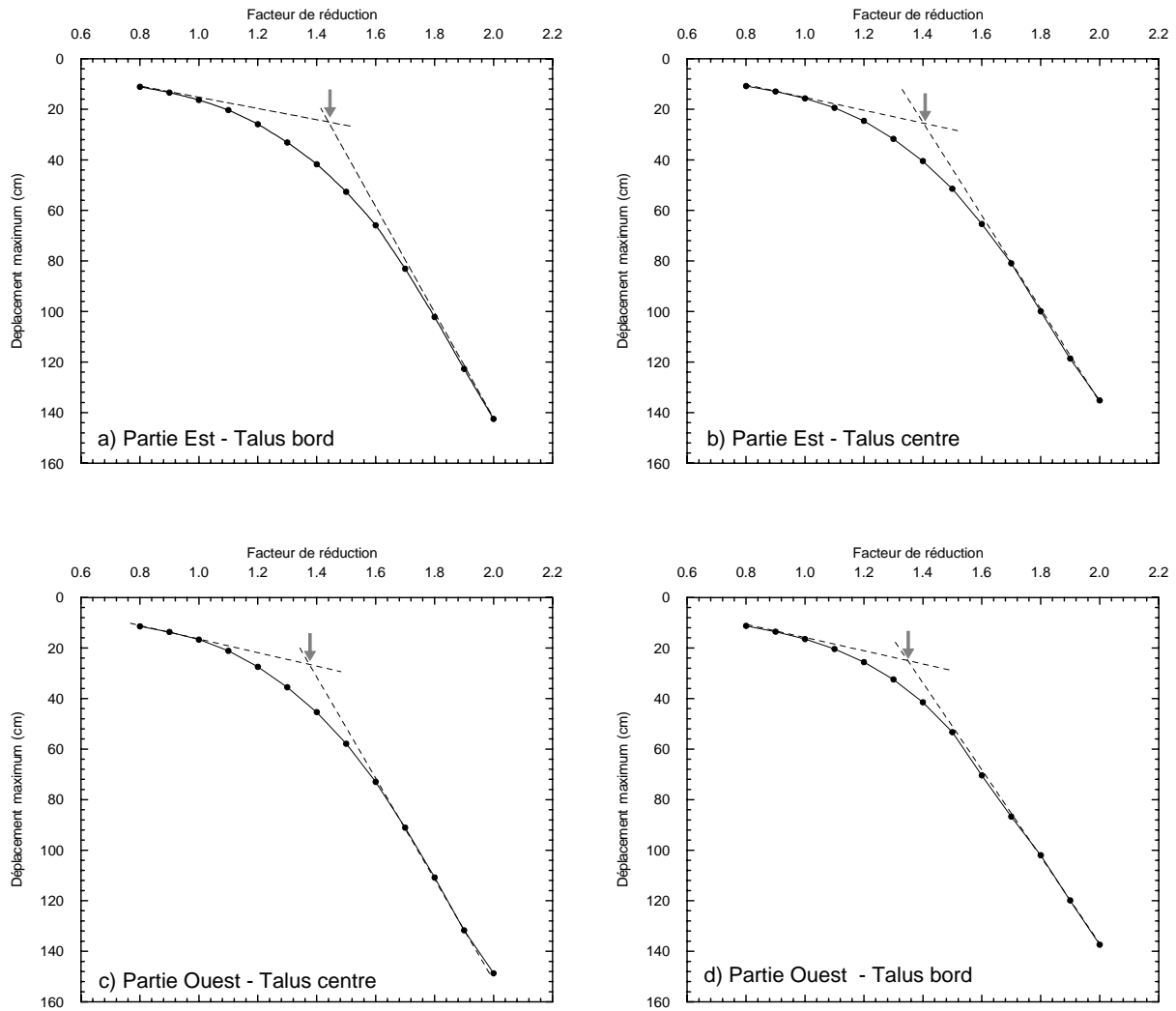
L'analyse de la stabilité statique a été réalisée en utilisant, dans le cas de la fondation, les résistances au cisaillement non drainées présentées au tableau 1 (fin de construction). Ces résistances ont été établies à partir des études géotechniques réalisées par GSI Environnement. Pour les matières résiduelles, un angle de friction de  $25^\circ$  a été utilisé (F.R.=1). Le comportement des couches argileuses a été modélisé à l'aide de lois établies à partir de résultats d'essais en cisaillement simple effectués à l'Université de Sherbrooke (L'Écuyer, 1998) sur des argiles de la mer de Champlain provenant de la région de St-Adelphe. Ces lois ont été adaptées aux argiles du site UTL (Lachenaie) en se basant sur les vitesses des ondes de cisaillement mesurées à l'aide de



**Figure 8** Lois de comportement en cisaillement a) argiles de la fondation b) matières résiduelles

la méthode MASW (Annexe B). La figure 8a présente une courbe typique (contrainte de cisaillement vs distorsion) correspondant à une résistance au cisaillement de 38,5 kPa. Les analyses de stabilité ont ainsi été effectuées en ajustant la courbe présentée à la figure 8a à la résistance au cisaillement de chacune des couches argileuses (tableau 1). Le même principe a été utilisé dans le cas des matières résiduelles. Les lois de comportement ont alors été établies à partir des essais de cisaillement simple présentés par Matasovic et Kavazanjian (1998) sur des matières résiduelles. La figure 8b présente la courbe contrainte de cisaillement normalisée par la contrainte normale en fonction de la distorsion. Dans cette étude, le comportement en cisaillement des matières résiduelles a été modélisé de sorte qu'il s'ajuste à la contrainte normale évaluée au cours de l'analyse de stabilité. La plastification de la couche de matières résiduelles est gérée par l'angle de friction selon le critère de rupture de Mohr-Coulomb.

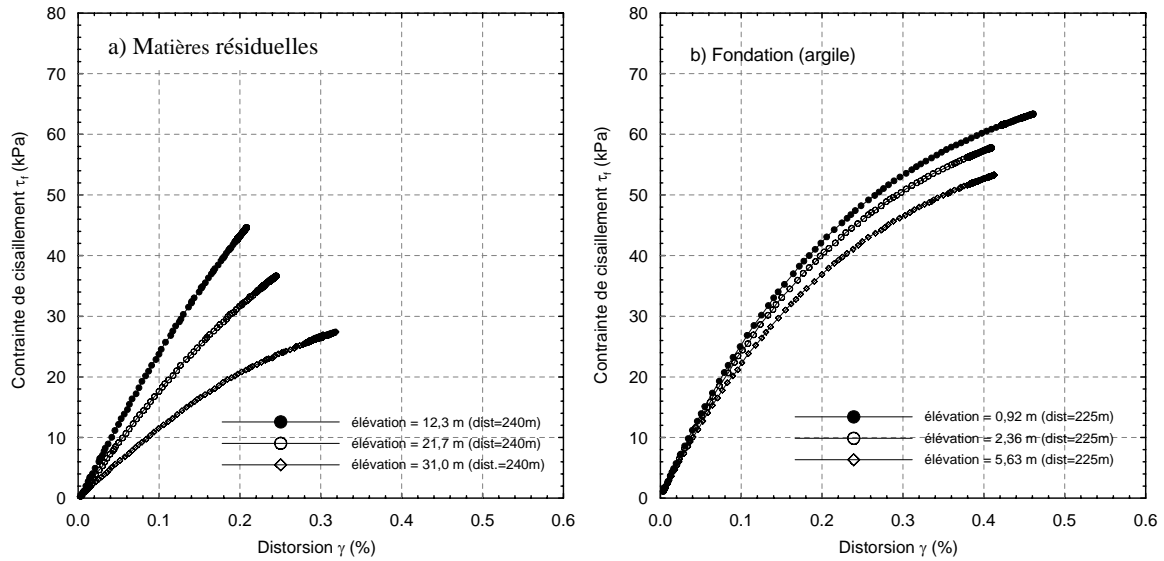
Les figures 9a, b, c et d montrent les déplacements totaux (déterminés au pied de chacun des talus) selon l'axe des x pour les différents talus (talus du bord de la partie Est, talus du centre de la partie Est, talus du centre de la partie Ouest et talus du bord de la partie Ouest). À des facteurs de réduction supérieurs à plus ou moins 1,4, on remarque dans tous les cas une augmentation plus importante du déplacement horizontal, indiquant un facteur de sécurité voisin de 1,4. Le tableau 3 chiffre de façon plus précise les facteurs de sécurité statique ainsi déterminés pour les différents talus. Les facteurs de sécurité déterminés par GSI sont également présentés dans ce tableau. Il faut noter que le déplacement d'un point situé en pied du talus n'est pas nécessairement relié à la



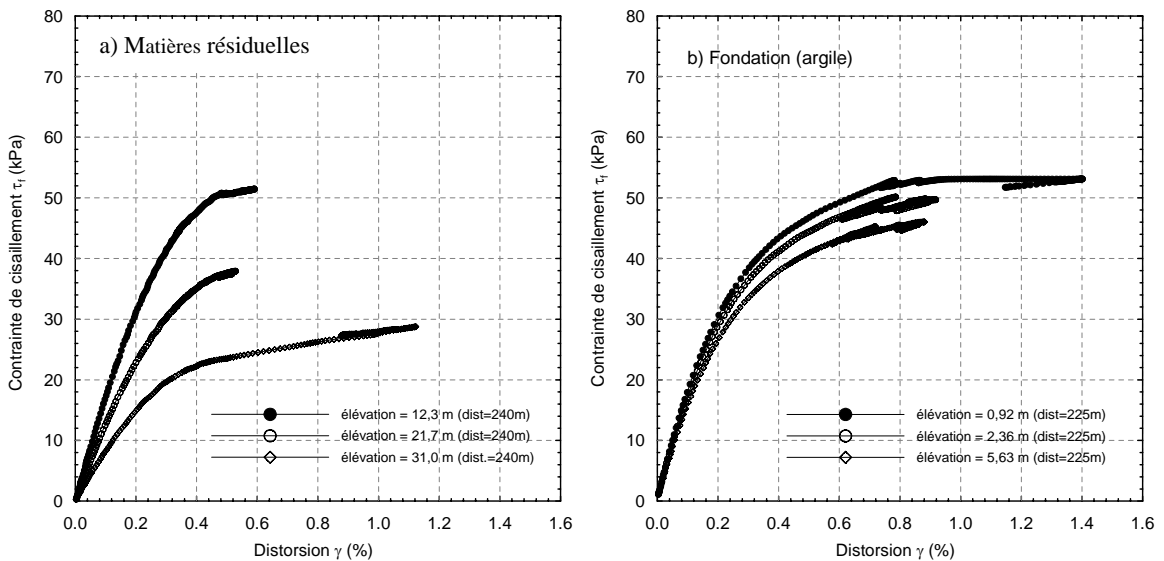
**Figure 9** Déplacement maximum en fonction du facteur de pondération (F.S) des a) talus du bord - partie Est, b) talus du centre - partie Est, c) talus du centre partie - Ouest d) talus du bord partie - Ouest

**Tableau 3** Facteurs de sécurité statique à court terme déterminés à l'aide de FLAC (différence finie)

Identification du talus	F.S (FLAC)	F.S (GSI)
Talus du bord - partie Est	1,45	1,62
Talus du centre - partie Est	1,41	1,51
Talus du centre - partie Ouest	1,38	1,51
Talus du bord - partie Ouest	1,36	1,62



**Figure 10** Courbes contrainte de cisaillement (sur le plan de rupture)  $\tau_f$  en fonction de la distorsion  $\gamma$  pour un facteur de réduction de 1,0; a) matières résiduelles b) argiles de la fondation



**Figure 11** Courbes contrainte de cisaillement (sur le plan de rupture)  $\tau_f$  en fonction de la distorsion  $\gamma$  pour un facteur de réduction de 1,4 a) matières résiduelles b) argiles de la fondation

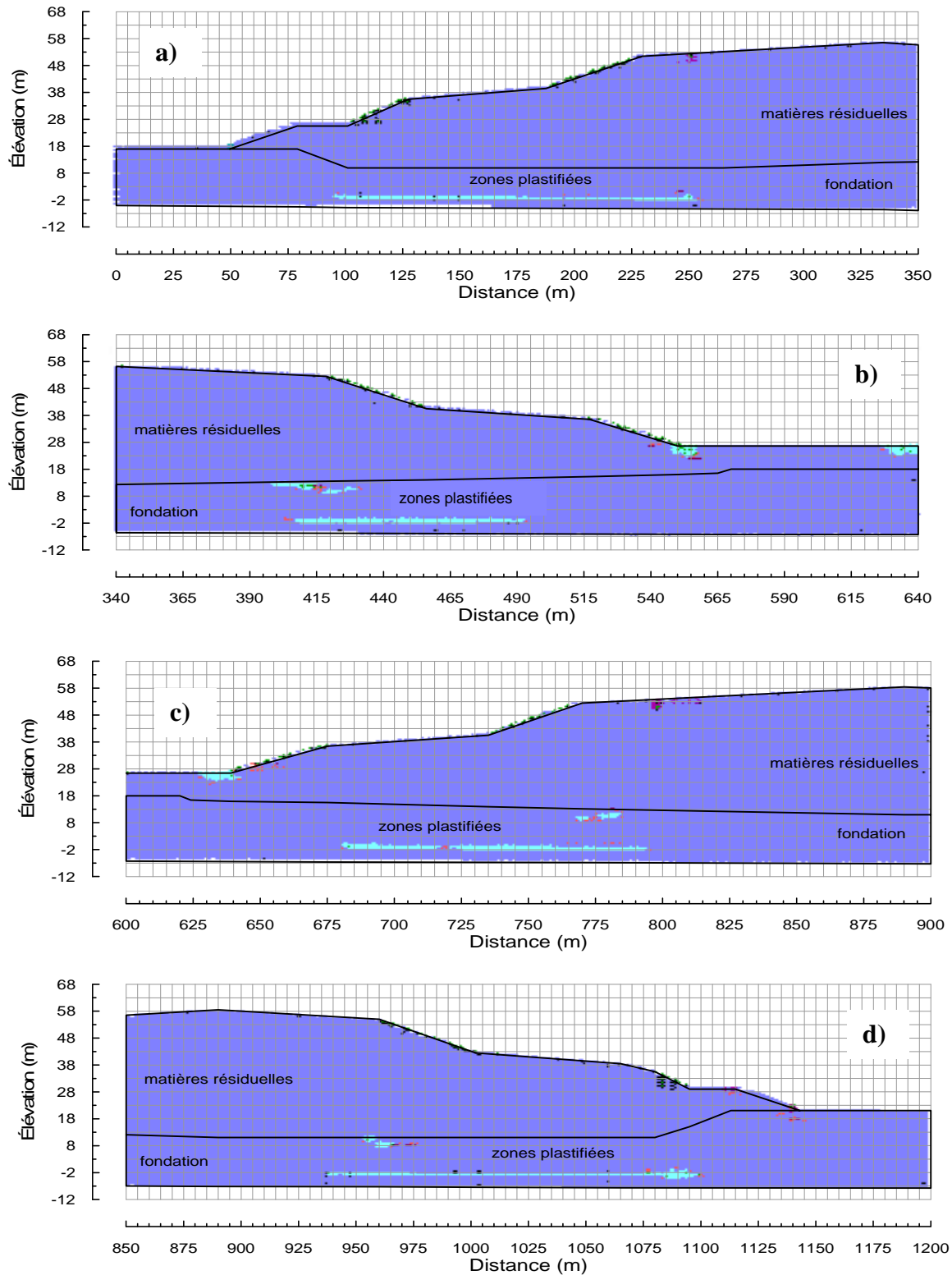
stabilité générale, mais pourrait refléter un mouvement superficiel comme il sera montré plus loin. Les figures 10 et 11 présentent la résistance au cisaillement mobilisée en fonction de la déformation (distorsion) pour différents points dans la fondation et les matières résiduelles, et ce, pour les valeurs réelles de la résistance (Fig. 10) et pour une résistance réduite par un facteur de 1,4 (Fig. 11). Ainsi on remarque qu'à un facteur de réduction de 1, les argiles de la fondation mobilisent plus de résistance que les matières résiduelles (Fig. 10a et b). À un facteur de

réduction de 1,4, les matières résiduelles commencent à mobiliser de plus en plus de résistance à cause de la plastification de certaines régions dans la fondation argileuse (Fig. 11a et b). L'avantage d'examiner la stabilité d'un ouvrage par une méthode d'éléments finis est qu'il est possible de modéliser le milieu de façon à localiser la surface de rupture. Le programme FLAC permet de déterminer de manière instantanée (chaque itération) les zones plastifiées dans la fondation argileuse et dans les digues de matières résiduelles. Les figures 12a, b, c et d montrent les zones plastifiées dans la fondation pour un facteur de réduction de 1,4. Ces figures permettent de détecter une plastification assez avancée dans la fondation à des élévations inférieures à -2 m (contact argile - till). La longueur des zones plastifiées dépasse les 100 m dans certains cas.

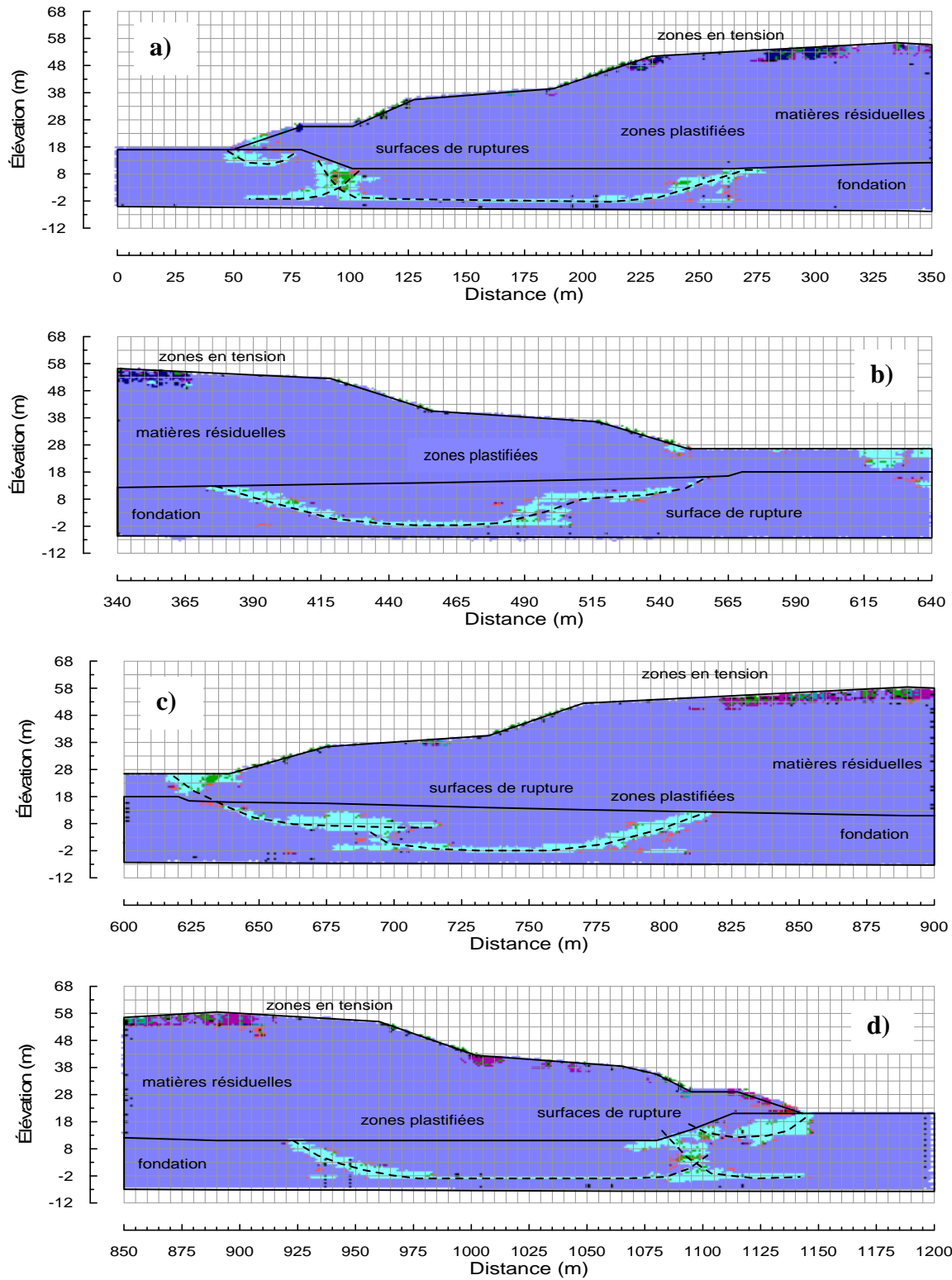
Les figures 13 a, b, c et d montrent les zones plastifiées dans la fondation et les digues de matières résiduelles pour un facteur de réduction de 1,6. Ces figures permettent de voir de manière assez nette les surfaces de ruptures qui se sont développées dans la fondation. Pour le talus de bord des parties Est et Ouest, on remarque la présence de trois surfaces de rupture (Fig. 13a et d) dont une qui englobe la moitié des digues (environ 225 m de long). Les deux autres surfaces correspondent à des ruptures partielles des talus ou de la berme. Les figures 13 montrent également des ruptures par tension à différents endroits à la surface des différents talus. Dans le cas des talus du centre, on remarque la présence d'une surface de rupture composite développée à deux niveaux dans la fondation.

Afin de mieux apprécier les résultats des analyses réalisées à l'aide de FLAC, les distorsions maximales ( $\gamma_{\max}/2$ ) ont été présentées sous forme de contours aux figures 14a, b, c et d et 15a, b, c et d, et ce, pour des facteurs de réduction (F.R) de 1 et 1,4 respectivement. Pour un facteur de réduction de 1 (résistance réelle), les contours de distorsion (Fig.14) montrent des valeurs inférieures à 1%, et ce, dans la fondation et dans les matières résiduelles. Lorsque la résistance réelle est considérée, il n'existe aucune plastification dans la fondation argileuse (Fig. 10a). Les distorsions les plus importantes se retrouvent généralement au pied des talus (excluant la berme) et aussi à mi-distance entre le sommet du talus et son pied. Dans la fondation, les distorsions les plus importantes se situent au centre de la surface de rupture (Fig. 14). Lorsque la résistance au cisaillement est réduite par un facteur de 1,4, des distorsions supérieures à 2% sont observées surtout au niveau de la surface de rupture (Fig. 15a, b, c et d).

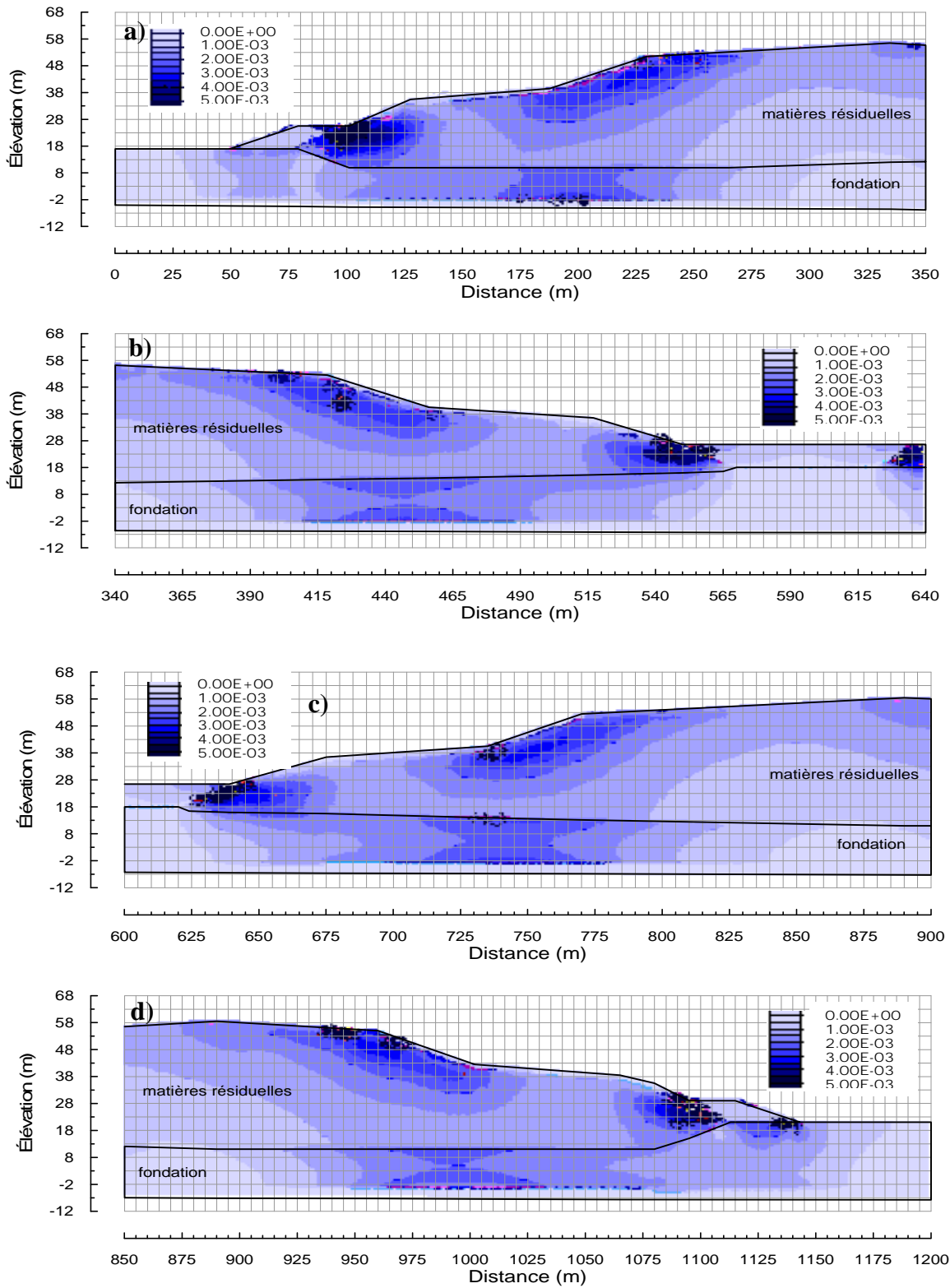




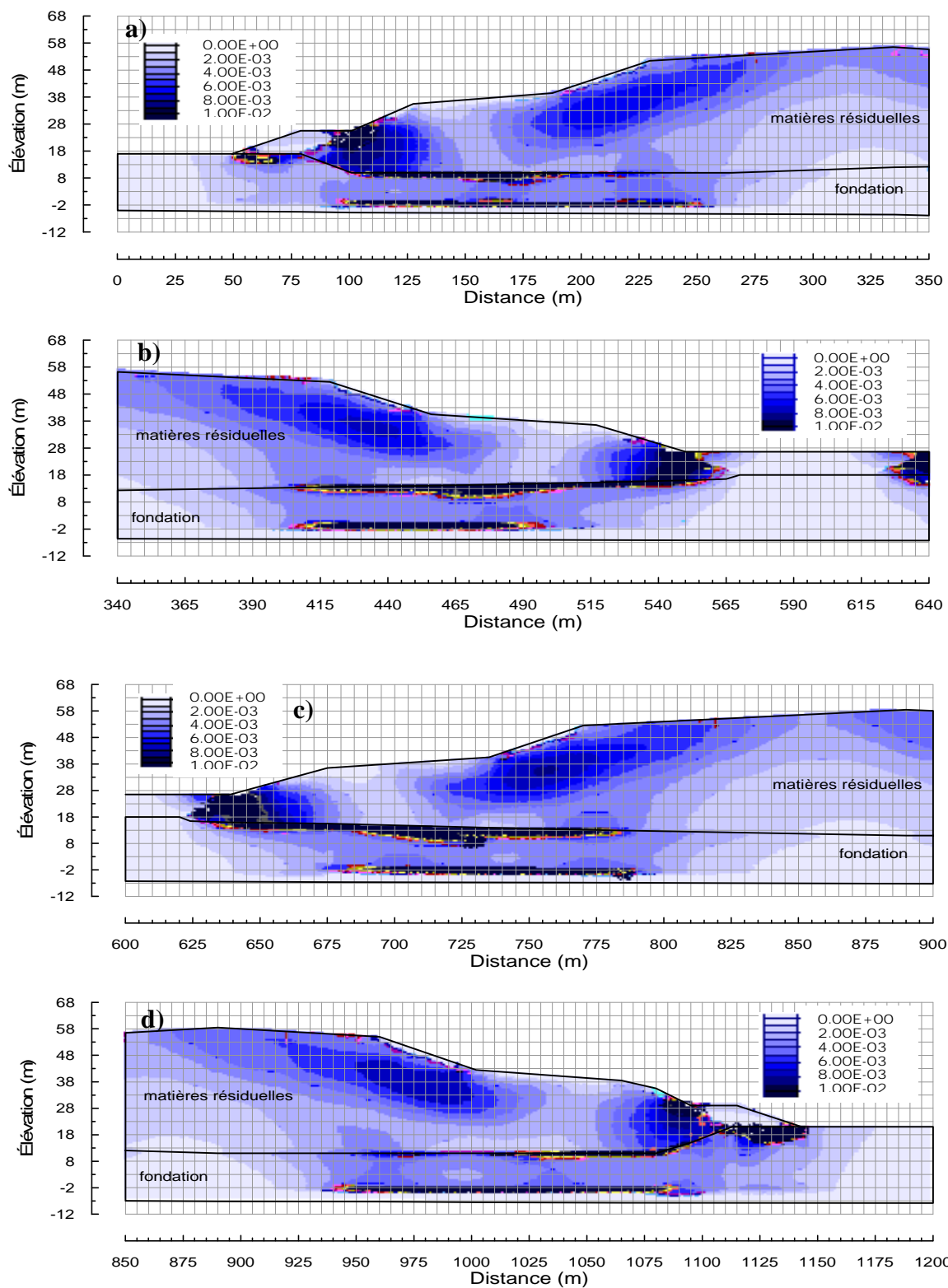
**Figure 12** Zones plastifiées pour un rapport de réduction de 1,4 a) talus du bord - partie Est; b) talus du centre - partie Est; c) talus du centre - partie Ouest et d) talus du bord - partie Ouest



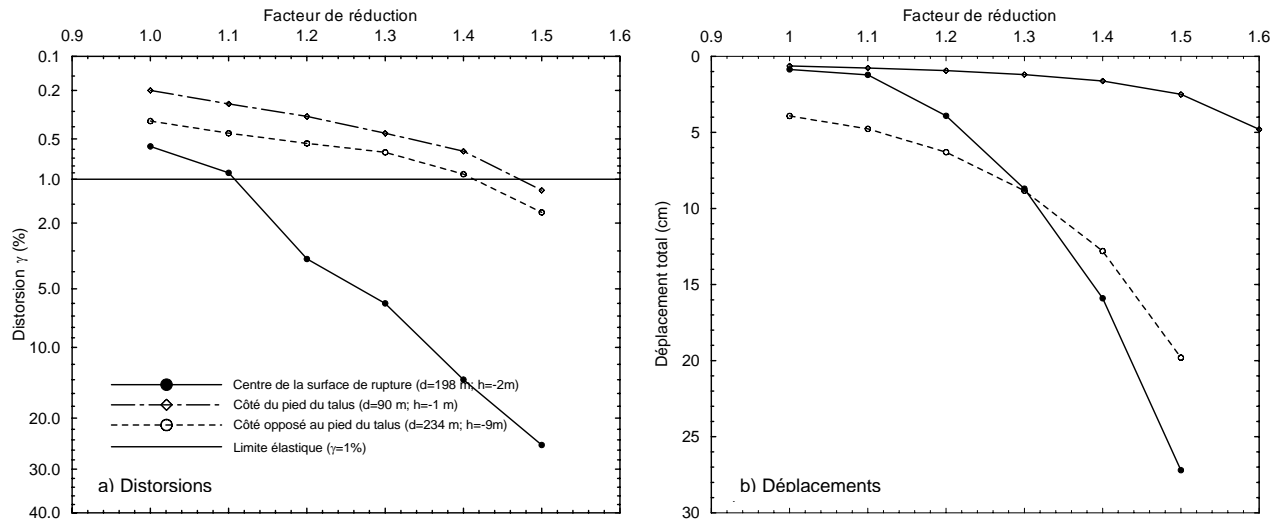
**Figure 13** Zones plastifiées pour un rapport de réduction de 1,6 a) talus du bord - partie Est; b) talus du centre - partie Est; c) talus du centre - partie Ouest et d) talus du bord - partie Ouest



**Figure 14** Distorsion maximum  $\gamma/2$  pour F.R=1 a) talus du bord - partie Est; b) talus du centre - partie Est; c) talus du centre - partie Ouest et d) talus du bord - partie Ouest



**Figure 15** Distorsion maximum  $\gamma/2$  pour F.R=1,4 a) talus du bord - partie Est; b) talus du centre - partie Est; c) talus du centre - partie Ouest et d) talus du bord - partie Ouest



**Figure 16** Distorsions et déplacements en fonction du facteur de réduction pour trois points situés sur la surface de rupture du talus du bord de la partie Est

Afin d'illustrer la progression des déformations de cisaillement (distorsion), les courbes de la figure 16a présentent la distorsion totale en fonction du facteur de réduction pour trois points situés sur la surface de rupture du talus du bord de la partie Est (Fig. 13a). Ces courbes seront utilisées lors de l'évaluation de la stabilité dynamique. La figure 16b présente les déplacements totaux des points correspondant à ceux présentés à la figure 16a.

La comparaison des différentes courbes (Fig. 16a) montre que même si la distorsion du point situé au centre de la surface de rupture est très importante ( $\gamma > 10\%$ ) pour un facteur de réduction de 1,4, celle sous le pied du talus demeure encore inférieure à la limite élastique ( $< 1\%$ ). Ceci indique donc que le talus du bord de la partie Est possède encore de la résistance à un facteur de réduction inférieur à 1,4. Ces résultats sont en accord avec les courbes de déplacements présentées à la figure 16b qui montrent des déplacements importants du côté actif et au centre du talus et très peu du côté passif (sous le pied du talus).

L'examen des déformations et déplacements sur les figures 14, 15 et 16 permet de mieux qualifier la définition du facteur de sécurité présenté à la figure 9. Comme noté précédemment, une valeur très grande a été adoptée pour le module de compressibilité afin que les déformations ne résultent que des efforts de cisaillement. Ces modules de compressibilité élevés sont en réalité équivalents à un coefficient de Poisson de 0,5 et reproduisent bien le comportement non drainé des argiles de

la fondation. Dans le talus de matières résiduelles cependant, un coefficient de Poisson de 0,5 amène des déformations horizontales qui ne sont pas tout à fait réalistes, considérant que le comportement des matières résiduelles est plutôt drainé. Les déplacements horizontaux dans les matières résiduelles se traduisent par une distorsion importante au contact des matières résiduelles et de l'argile (Fig. 15) et aussi par des poussées et des déformations horizontales trop grandes à l'endroit des bermes de confinement constituées d'argile (Fig. 14 et 15).

Le déplacement d'un point situé en pied de talus qui est utilisé dans la présente approche pour définir un facteur de sécurité (Fig. 9), est en réalité affecté par ce phénomène et la définition du facteur de sécurité est alors moins bien marquée et moins précise.

L'examen des zones entrées en plasticité sur les figures 12 et 13 permet de suivre le développement des surfaces de rupture dans la fondation. Lorsque la résistance au cisaillement est réduite par un facteur de 1,4, la surface de rupture n'est pas encore complètement développée pour aucun des quatre talus analysés (Fig. 12), contrairement à ce qui est observé avec un facteur de réduction de 1,6 (Fig. 13). Le facteur de sécurité est donc, en réalité, voisin et légèrement supérieur à 1,4 pour les quatre talus analysés.

Ces imprécisions reliées à la simulation du comportement des matières résiduelles ont été tolérées puisque les analyses de stabilité statique concernaient essentiellement la fondation argileuse et avaient pour objectif d'établir une limite de comparaison avec les analyses dynamiques. Pour cette raison, ce sont surtout les déformations sur le plan de rupture (Fig. 16) qui seront considérées ultérieurement.

## **6 ANALYSE DYNAMIQUE**

Les analyses sismiques ont été réalisées en utilisant les paramètres dynamiques (module de cisaillement à faibles déformations) mesurés par l'Université de Sherbrooke à l'aide de la méthode MASW (Annexe B). Ces paramètres ont également permis de sélectionner les paramètres dynamiques à grandes déformations (G, amortissement).

## 6.1 Évaluation des paramètres et du risque sismique

Une des questions les plus délicates en génie parasismique est de prédire de façon rationnelle le ou les mouvements sismiques à attendre sur un site quelconque. Il existe dans la pratique actuelle deux approches pour déterminer ces paramètres.

- Approche probabiliste: où chaque zone sismique est caractérisée par la fréquence des événements historiques. C'est donc un problème d'évaluation du risque de dépassement d'un certain seuil caractérisant le mouvement sismique.
- Approche déterministe: où chaque source est caractérisée par une borne raisonnable à l'intensité ou la magnitude des séismes futurs. Il s'agit d'un problème d'évaluation d'un séisme maximal connu dont la distance entre la source et le site est déterminée.

L'usage de l'une ou l'autre des deux approches (probabiliste ou déterministe) pour la détermination des caractéristiques des mouvements sismiques est possible. On a toutefois choisi d'utiliser l'approche probabiliste proposée par le Code national du bâtiment (CNB) qui est la plus couramment utilisée.

## 6.2 Séisme de dimensionnement pour Lachenaie

### 6.2.1 Accélération et vitesse de design

Un séisme de dimensionnement correspond, d'après la définition du Code national du bâtiment (CNB), à un niveau maximal d'ondes vibratoires qui a une chance sur dix (10 %) de se reproduire en 50 ans, ce qui correspond à une période de récurrence de 475 ans. Ce niveau, représenté par l'accélération maximale et la vitesse, cherche à assurer un degré de sécurité acceptable tout en empêchant des défaillances catastrophiques.

Pour déterminer le ou les accélérogrammes de référence au site de Lachenaie, il est nécessaire de connaître les valeurs de l'accélération horizontale maximale ( $A_{\max}$ ) et de la vitesse maximale ( $V_{\max}$ ), dans cette région, pour un risque sismique de 10 % en 50 ans. Selon le Code national du

bâtiment, la région de Lachenaie se situe dans une zone d'accélération,  $Z_a$ , de 4 et de vitesse,  $Z_v$ , de 2. Ceci indique que cette région est influencée par des tremblements de terre dont les épicentres sont proches (riches en haute fréquence). Les valeurs de  $A_{max}$  et de  $V_{max}$  considérées pour la région de Lachenaie sont de 0,18 g et 0,097 m/s. Ces valeurs sont données au tableau J-2 du Code national de bâtiment pour la région de Montréal dont les zones d'accélération et de vitesse sont identiques à celles de la région de Lachenaie.

### 6.2.2 Spectre de dimensionnement standard

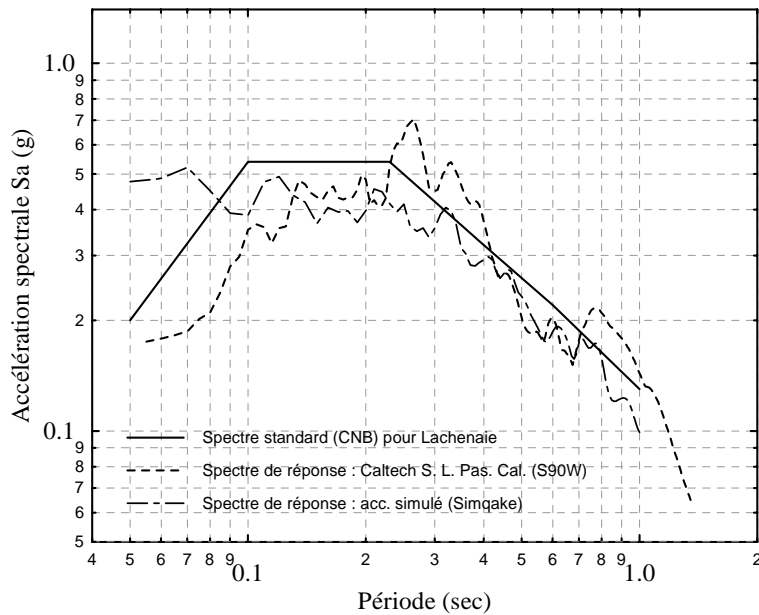
L'analyse dynamique d'un sol ou d'une structure nécessite la définition d'un ou de plusieurs signaux sismiques (accélérogrammes) de référence. Ces accélérogrammes sont principalement choisis ou simulés à partir d'un spectre moyen de réponse compatible avec les données sismiques du site considéré ( $A_{max}$  et  $V_{max}$ ). Le spectre de dimensionnement est déterminé à partir d'un spectre standard donné par le CNB et ajusté pour les paramètres sismiques de la région. L'ajustement du spectre standard se fait par étalonnage de la limite de l'accélération (hautes fréquences) et de la vitesse (basses fréquences), et ce, de façon indépendante pour la valeur de l'accélération maximale ( $A_{max}$ ) et de la vitesse maximale ( $V_{max}$ ) de la région.

Connaissant les valeurs de  $A_{max}$  et  $V_{max}$  (0,18g et 0,097 m/s), le spectre moyen de réponse (standard), à 5% d'amortissement, a été établi pour le site de Lachenaie (Fig. 17). Un premier accélérogramme a par la suite été généré à partir de ce spectre et un autre choisi à partir d'enregistrements de tremblements de terre réels survenus aux États-Unis. Le choix du signal réel dont les caractéristiques sont présentées au tableau 4, a été fait par comparaison de son spectre de réponse avec celui de la région de Lachenaie (Fig.17). La génération de l'accélérogramme

**Tableau 4** Caractéristiques des accélérogrammes de référence (choisi et généré) à partir du spectre de la région de Lachenaie (Standard)

Station d'enregistrement	Direction	Mag (M)	Dis. (Km)	$A_{max}$ (g)	$V_{max}$ (m/s)	a/v	Durée > 0,02g
Caltech S. L., Pasadena, Cal.	S90W	6,6	35	0,192	0,116	1,66	10
Code (CNB) Lachenaie	----	7,0*	80*	0,18	0,097	2	15



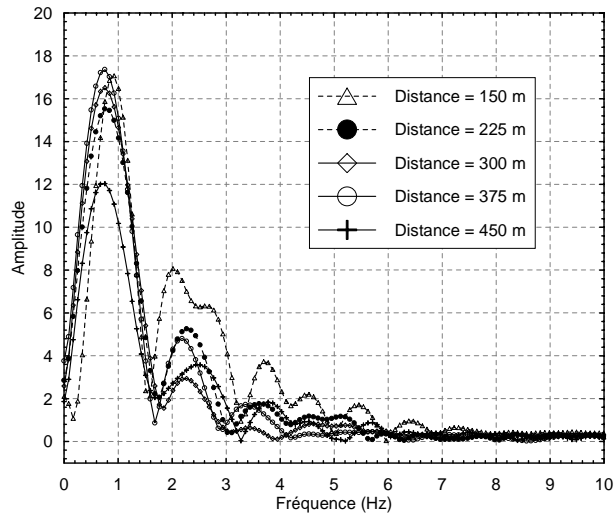


**Figure 17** Comparaison des spectres de réponse des accélérogrammes (choisi et simulé) avec le spectre de dimensionnement du site de Lachenaie.

gramme a été réalisé à l'aide du programme SIMQKE (1976), développé par Gasparini et Vanmarcke. La durée totale du signal sismique simulé est de 15 secondes, soit la durée moyenne considérée par le CANDU Nuclear Power Plant (Karray, 1994). Les temps de levée, de soutien et de déclin (2 sec., 7 sec. et 5 sec. respectivement) ont été sélectionnés à partir d'observations d'enregistrements historiques de l'est de l'Amérique du Nord. Dans le cas de l'accélérogramme réel, seules les 15 premières secondes ont été considérées. Les deux signaux sismiques utilisés dans cette étude pour la région de Lachenaie sont présentés à l'annexe A.

### 6.3 Analyse de stabilité dynamique

Les analyses de stabilité dynamique ont été réalisées pour les deux accélérogrammes (réel et simulé) présentés à l'annexe A et dont les caractéristiques sont résumées au tableau 4. Les accélérogrammes ont été calés à l'accélération de design pour le site UTL de Lachenaie (0,18g). Ces excitations sismiques ont été appliquées de manière uniforme à la base du modèle (Fig. 3). Les propriétés géotechniques et mécaniques utilisées au cours des analyses statiques ( $C_u$ ,  $\phi'$ ,  $\rho$ , etc) ainsi qu'un comportement élastique parfaitement plastique avec un critère de rupture Mohr-Coulomb ont été utilisés. Des études antérieures ont en effet montré que jusqu'à 10 ou 15



**Figure 18** Fréquences naturelles à différentes distances des parties Est et Ouest

cycles, la résistance cyclique des argiles peut être assimilée à celle utilisée dans les analyses statiques, dû à la compensation de toute dégradation cyclique de l'argile par l'effet du taux de changement rapide associé à un séisme (Lefebvre et Pfenner, 1996, Lefebvre et LeBoeuf, 1988). Pour assurer une certaine compatibilité entre les analyses statiques et dynamiques, on a utilisé des modules de cisaillement équivalents qui ont été déterminés à partir de la résistance au cisaillement non drainée (à court terme) et une limite élastique de 1% (distorsion) :

$$G=100Cu \quad (2)$$

Les périodes naturelles des trois premiers modes de vibration du dépôt de sol et de matières résiduelles (parties Est et Ouest) sont présentées au tableau 5. Ces valeurs ont été déterminées à partir des transformations de Fourier, des accélérogrammes calculés à différents points à la surface des digues (Fig. 18), et qui représentent la réponse du système à une excitation d'une durée de 0,02 sec. (demi-sinus).

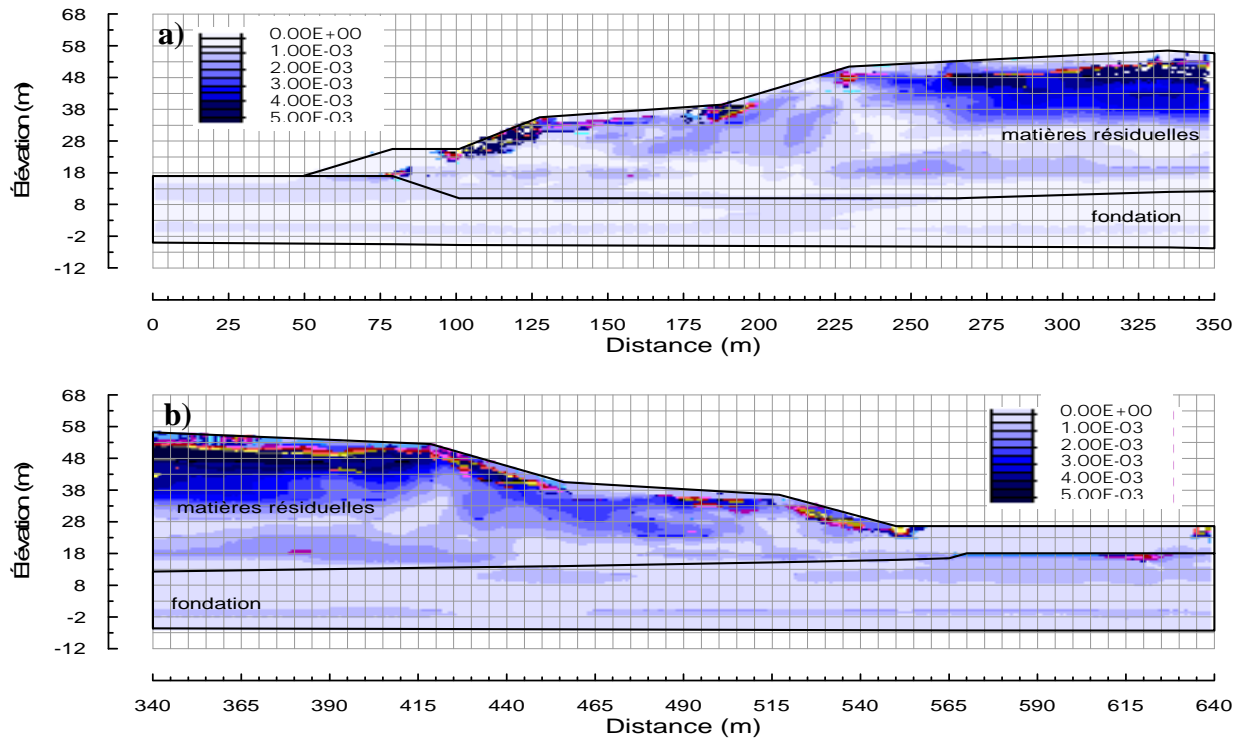
**Tableau 5** Fréquences et périodes naturelles des trois premiers modes des parties Est et Ouest

	Mode 1	Mode 2	Mode 3
Fréquence (Hz)	0,7 à 0,9	2 à 2,5	3,8 à 4
Période (sec)	1,11 à 1,43	0,4 à 0,5	0,25 à 0,26

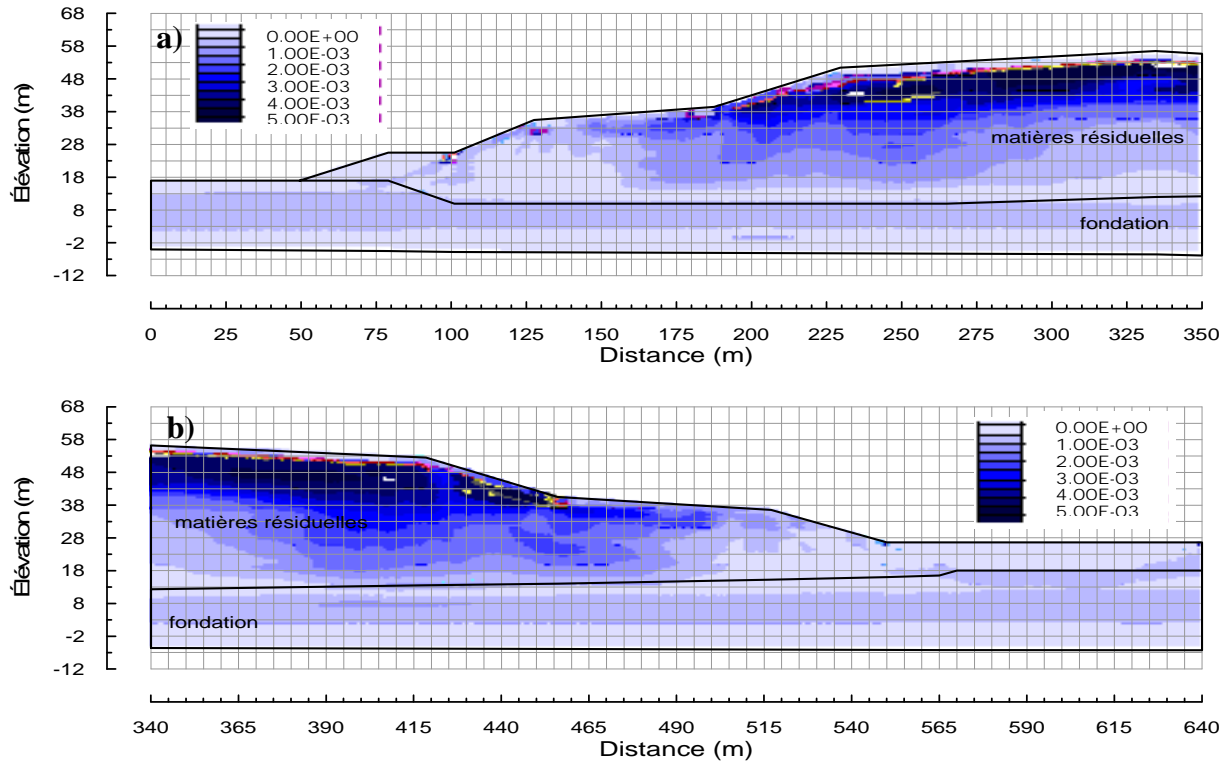
Les figures 19a et b et 20a et b montrent les contours de distorsion cyclique ( $\gamma/2$ ) à 8 sec. et à 6 sec. produites par l'application des accélérogrammes réel et simulé respectivement pour un facteur de réduction de 1. Ces résultats montrent que les distorsions maximales ( $\gamma_{cyc}$ ) produites par un tremblement de terre compatible avec les données de la région de Lachenaie sont relativement faibles ( $< 0,2\%$ ) dans le cas de la fondation argileuse. Les distorsions les plus importantes ( $> 1\%$ ) se retrouvent dans les matières résiduelles à des profondeurs variant entre 3 et 15 m par rapport aux sommets des diges. On remarque également (Fig. 19a) des distorsions superficielles importantes à quelques endroits au niveau des pentes des différents talus. Les distorsions dans les matières résiduelles ne provoquent toutefois pas d'instabilité à cause de leur grande capacité à la déformation.

Les résultats présentés aux figures 19 et 20 ne montrent que l'état de la structure à un temps donné au cours de l'événement sismique. Les figures 21a et b présentent les distorsions cycliques maximales en fonction du temps pour trois points situés sur la surface de rupture examinée lors des analyses statiques (Fig. 16), et ce, pour des facteurs de réduction de 1 et de 1,3 respectivement. Ces résultats indiquent, lorsque combinés aux analyses de stabilité statique (Fig. 16), une distorsion maximale dans la fondation ( $\gamma_{stat} + \gamma_{cyc}$ ) de 0,85% qui ne dépasse pas la limite élastique ( $< 1\%$ ) pour un facteur de réduction de 1 (résistance réelle). Les mouvements sismiques compatibles avec la région de Lachenaie ne produisent pas d'effet important sur la fondation argileuse, et ce, même en considérant les paramètres de cisaillement à court terme. Il est important de noter à la figure 21 que pour un facteur de réduction de 1, les distorsions cycliques maximums diminuent lorsque l'événement sismique commence à perdre de son intensité (10 sec et plus). Ceci indique donc qu'il n'y a pas d'accumulation des déformations puisque la fondation demeure dans le domaine élastique. Pour un facteur de réduction de 1,3 on remarque qu'il n'y a ni diminution ni augmentation de la distorsion maximale au centre de la surface de rupture avec l'atténuation du signal sismique (10 sec et plus). Ceci indique qu'un tremblement de terre compatible avec la séismicité de Lachenaie ne produit pas d'effet important même sur les parties de la fondation déjà plastifiées.

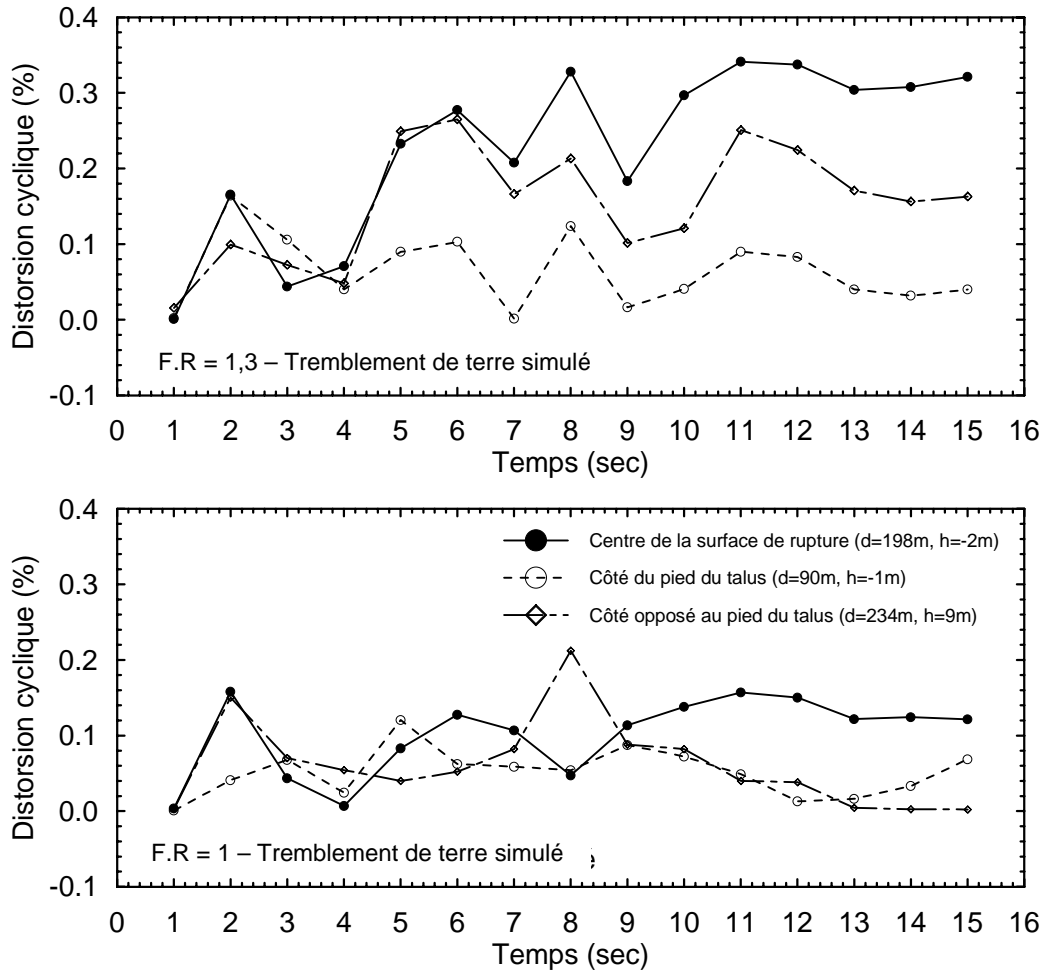
D'une manière générale, un tremblement de terre peut produire des effets néfastes sur une structure du genre analysée dans cette étude lorsque l'inertie de la masse de sol potentiellement



**Figure 19** Distorsion maximales  $\gamma/2$  pour F.R = 1,0 a) talus du bord - partie Est; b) talus du centre - partie Ouest; à 8 sec de l'accélérogramme réel (CSLP)



**Figure 20** Distorsion maximales  $\gamma/2$  pour F.R = 1,0 a) talus du bord – partie Est; b) talus du centre – partie Ouest à 6 sec de l'accélérogramme du Code (CNB)



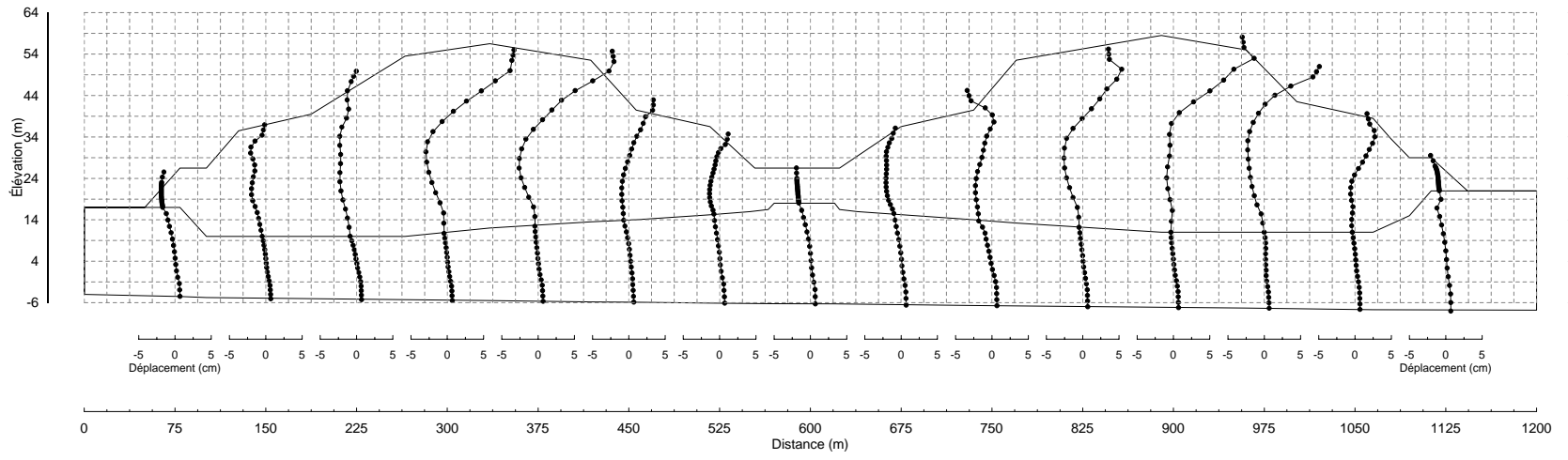
**Figure 21** Distorsion maximale produite par le tremblement de terre simulé (CNB) pour trois points situés sur la surface de rupture statique (partie Est)

instable agit dans la même direction. Pour l'ensemble de la masse, cette condition peut se produire lorsque le contenu fréquentiel du mouvement sismique est riche en fréquences qui se rapprochent de la fréquence naturelle du système. Dans le cas présent, la période naturelle (mode fondamental) du système (tableau 5) est assez importante (1,11 à 1,43 sec). Cette fréquence ne coïncide pas avec les caractéristiques sismiques de la région de Lachenaie qui est influencée par des tremblements de terre plutôt riches en hautes fréquences (Fig. 17). Afin de mieux visualiser cet aspect, les déformations déterminées à un moment donné au cours de l'événement sismique sont montrées aux figures 22 et 23. Ces figures montrent que le système vibre selon au moins trois modes. Ceci se manifeste par un changement de direction du mouvement entre la base et le

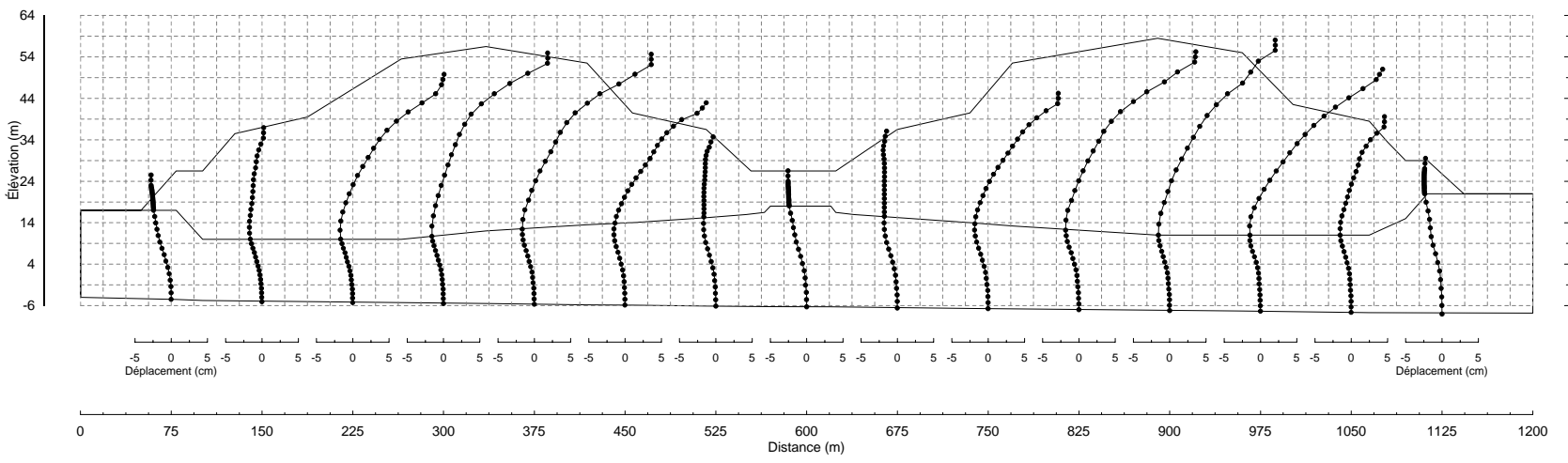
sommet d'une colonne de sol. Il est important de constater sur ces figures que le déplacement de la fondation argileuse est assez faible par comparaison aux digues de déchets.

Les figures 24a et b présentent la réponse spectrale du système ainsi que le rapport entre l'accélération maximale à la surface des digues et celle au rocher. Les rapports d'amplification (Fig. 24b) sont assez importants et peuvent atteindre des valeurs supérieures à 10 à des fréquences variant autour de la période naturelle du système, soit entre 1 et 2 Hz. Pour cette plage de fréquences, ces valeurs importantes de l'amplification sont cependant associées à une faible excitation au niveau du rocher. Pour la région de Lachenaie, le spectre du Code national du bâtiment (Fig. 17) spécifie en effet qu'à une période de 1 sec., l'accélération spectrale est environ 5 fois plus faible que l'accélération maximale. La figure 24a montre alors que le contenu fréquentiel de l'événement sismique combiné à l'amplification amène une accélération spectrale plus au moins égale sur une large bande de fréquences (0,1 à 10 Hz) ce qui fait que la réponse totale de l'ouvrage est affectée par plusieurs modes de vibration et de manière presque égale. Ceci confirme que l'effet d'un tremblement de terre compatible avec les données de la région de Lachenaie ne produit pas d'effet important sur la fondation et les digues de matières résiduelles. Dans le cas de la partie centrale (Fig. 2), l'analyse détaillée n'est pas nécessaire puisque d'une part, au moment de l'ajout de cette partie, les résistances au cisaillement de la fondation argileuse seront plus importantes (consolidation) et d'autre part, la période naturelle de la partie centrale combinée aux parties Est et Ouest ne peut qu'être plus élevée que celles des parties Est et Ouest.

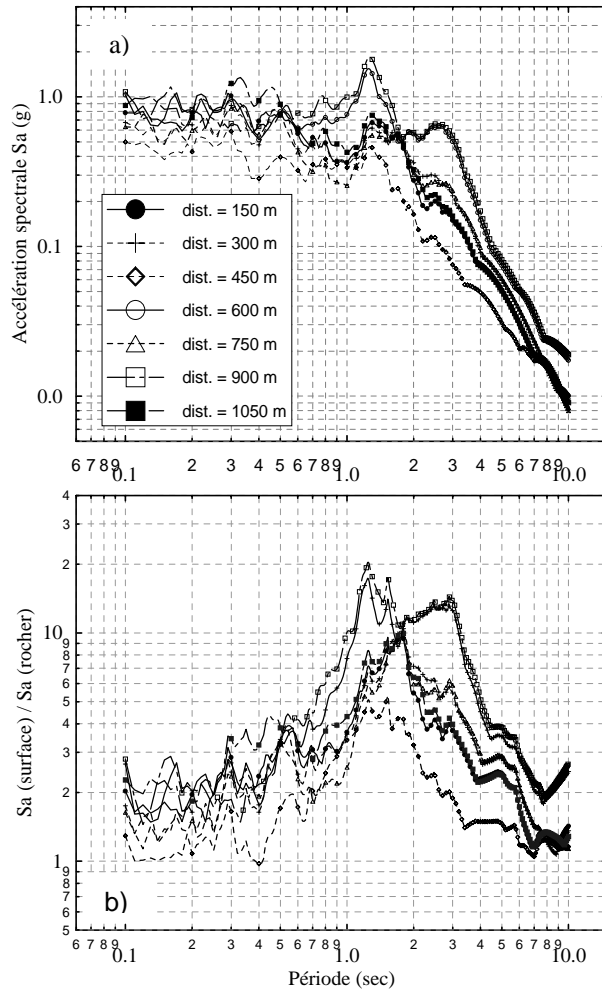
Finalement, et afin d'avoir une idée sur le facteur de sécurité sous sollicitation sismique, des courbes présentant les distorsion totales (statique + cycliques) ont été établies à partir des résultats présentés aux figures 16 et 21 pour les trois points situés sur la surface de rupture du talus du bord de la partie Est. Ces courbes sont comparées aux courbes statiques à la figure 25. Ces résultats indiquent que pour un facteur de réduction de 1,3 le point situé sur la surface de rupture sous le pied du talus n'a pas encore dépassé la limite élastique établie à 1 %. On estime donc à environ 1,3 le facteur de sécurité dynamique de la fondation argileuse.



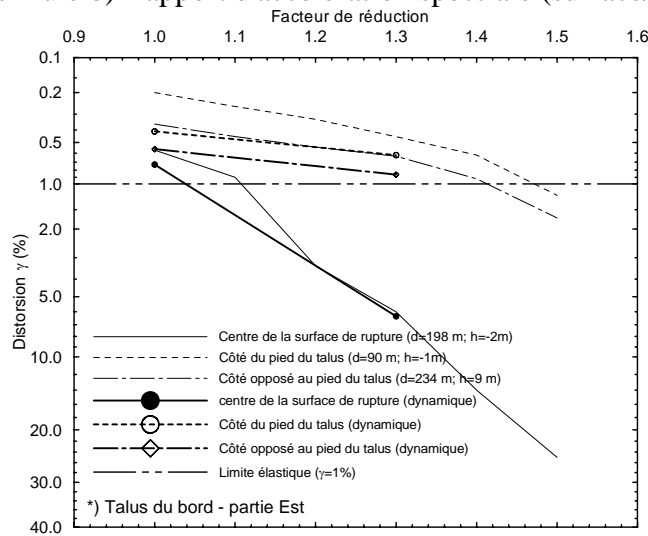
**Figure 22** Déformations des parties Est et Ouest produites par le tremblement de terre réel (CSLP) à un temps de 8 sec. (F.R=1)



**Figure 23** Déformations des parties Est et Ouest produites par le tremblement de terre simulé à un temps de 6 sec. (F.R=1)



**Figure 24** a) Spectre de réponse à la surface des digues à différentes distances produit par le tremblement de terre simulé b) Rapport d'accélération spectrale (surface/rocher)



**Figure 25** Distorsion cumulative en fonction du facteur de réduction pour trois points situés sur la surface de rupture du talus du bord de la partie Est



## 7 CONCLUSION

La méthodologie utilisée dans cette étude est basée sur une analyse contrainte-déformation par éléments finis (FLAC) avec des lois de comportement compatibles avec la nature des sols et des matières résiduelles et où l'entrée en plasticité est contrôlée par la résistance du sol définie comme la résistance au cisaillement non drainés ou par l'enveloppe de Mohr Coulomb. Des analyses de tassements et de stabilité statique ont également été réalisées afin de bien calibrer le modèle et situer les résultats de l'analyse dynamique.

Le calcul des tassements a servi à la validation et à la vérification des différents paramètres utilisés dans le modèle établi. Les résultats de ces analyses sont conformes aux études géotechniques de GSI Environnement. L'analyse de stabilité statique est une étape importante de l'analyse dynamique et a également permis de vérifier les facteurs de sécurité obtenus par GSI au moyen d'analyse par équilibre limite.

Les analyses dynamiques montrent que l'effet d'un tremblement de terre compatible avec la sismicité de la région de Lachenaie n'a pas d'effet significatif sur la fondation argileuse de l'agrandissement nord. L'étude permet en effet de calculer un facteur de sécurité dynamique de l'ordre de 1,3 pour les surfaces de ruptures potentielles de la fondation argileuse, et ce, sans considérer le gain de résistance dans la fondation dû à la consolidation sous le poids des matières résiduelles.

Le facteur de sécurité calculé ainsi que la déformabilité des matières résiduelles permettent de conclure que les aménagements de l'agrandissement nord demeureront stables advenant un séisme important.

---

Mourad Karray

---

Guy Lefebvre

## BIBLIOGRAPHIE

**CNB (1995)** *Code National du bâtiment du Canada 1995*, Conseil National de Recherche du Canada, Ottawa, Ontario, Canada

**Gasparini, D. A., Vanmarke, E. H. (1976)** *SIMQKE - A Program for Artificial Motion Generation. User's Manual and Documentation*, Massachusetts Institute of Technology, Departement of Civil Engineering, Cambridge, Massachusetts, 32p.

**GSI Environnement (2001)**, *Étude Géotechnique Agrandissement du Secteur Nord Lots Parties 77 à 87, 90, 93, 94, 99 et 100*, Rapport No 293-2549-151, présenté à BFI Usine de Triage Lachenaie Ltée. p. 59.

**Karray, M. (1994)** *Étude de la Performance Sismique des Maisons-Types D'habitations Unifamiliales pour l'est du Canada*, Mémoire de maîtrise, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, p. 249.

**Karray, M., Lefebvre, G. (2000)** *Revue de la Méthode Pseudo-Statique pour les Barrages en Remblai*, Rapport de recherche No Geo-00-04, Présenté à Hydro-Québec, p. 44.

**Karray, M., Lefebvre, G., Touileb, B. (2001)** *A Procedure to Compare the Results of Dynamic and Pseudo-Static Slope Stability Analyses*, 54<sup>th</sup> Canadian Geotechnical Conference 2<sup>nd</sup> Joint IAH and CGS Groundwater Conference, 16-19 September 2001, Calgary, Alberta, Canada.

**L'Ecuyer, N. (1998)** *Stabilité Sismique des Talus Naturels Argileux*, Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, p. 251

**Lefebvre, G., LeBoeuf, D. (1987)** *Rate Effects and Cyclic Loading of Sensitive clays*, Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers, vol. 113, n° 5, p. 476-489.

**Lefebvre, G., Pfendler, P. (1996)** *Strain Rate and preshear Effect in Cyclic Resistance of a Soft Clay*, Journal of Geotechnical Eng., ASCE, vol. 121, n° 11, p. 21-26.

**Matasovic, N., Kavazanjian, E. Jr. (1998)** *Cyclic Characterization of Oil Landfill Solid Waste*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 124, No 3, p. 197-210

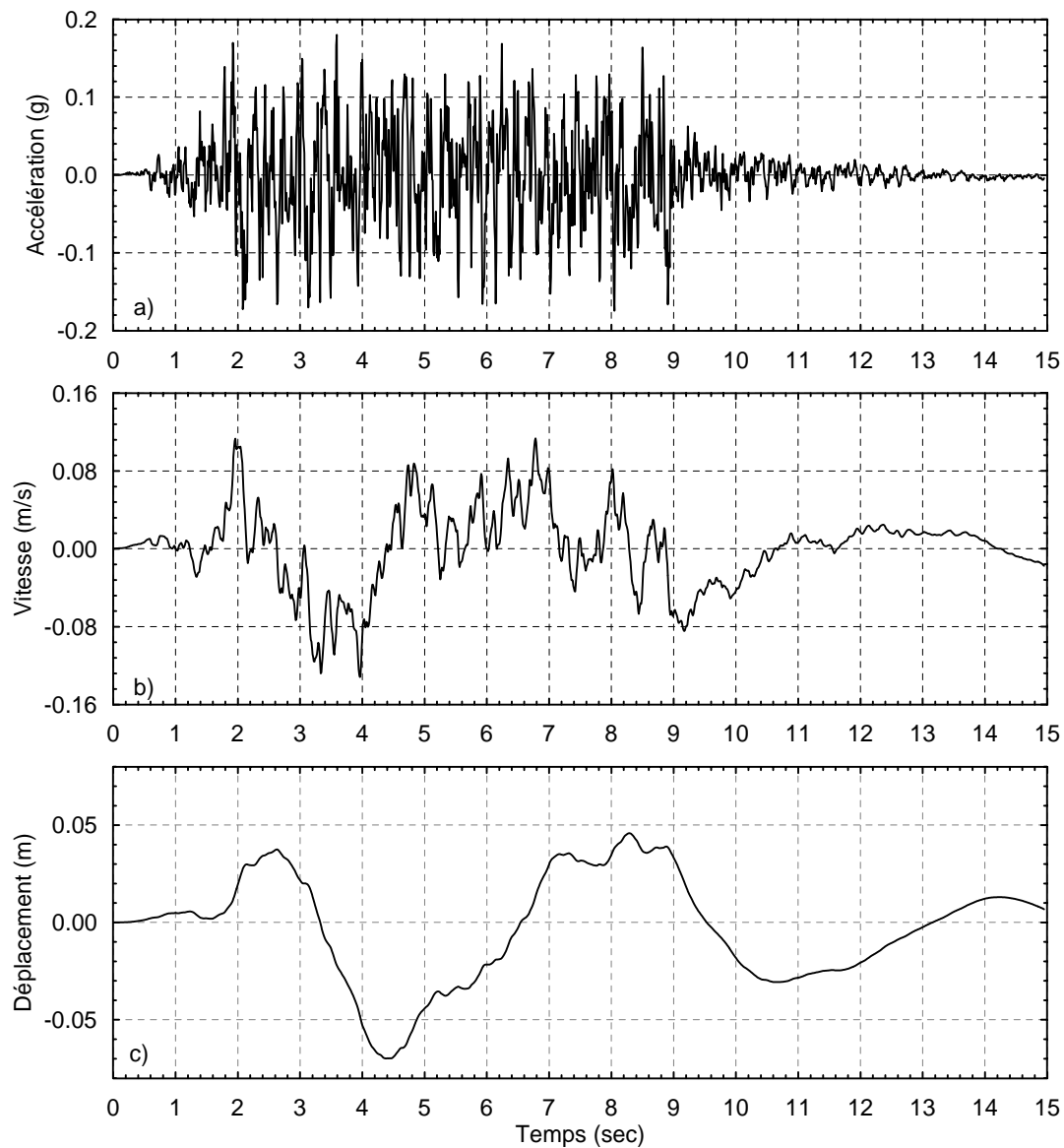
## ANNEXE A

# MOUVEMENTS SISMIQUES UTILISÉS POUR LA RÉGION DE LACHENAIE

Tremblement de terre compatible avec les données sismiques de la région de Lachenaie

\* Événement produit par simulation à l'aide de simqake \*

Séisme compatible avec les données de Lachenaie  $A_{max} = 0.18g$   $V_{max} = 0.09$  m/s

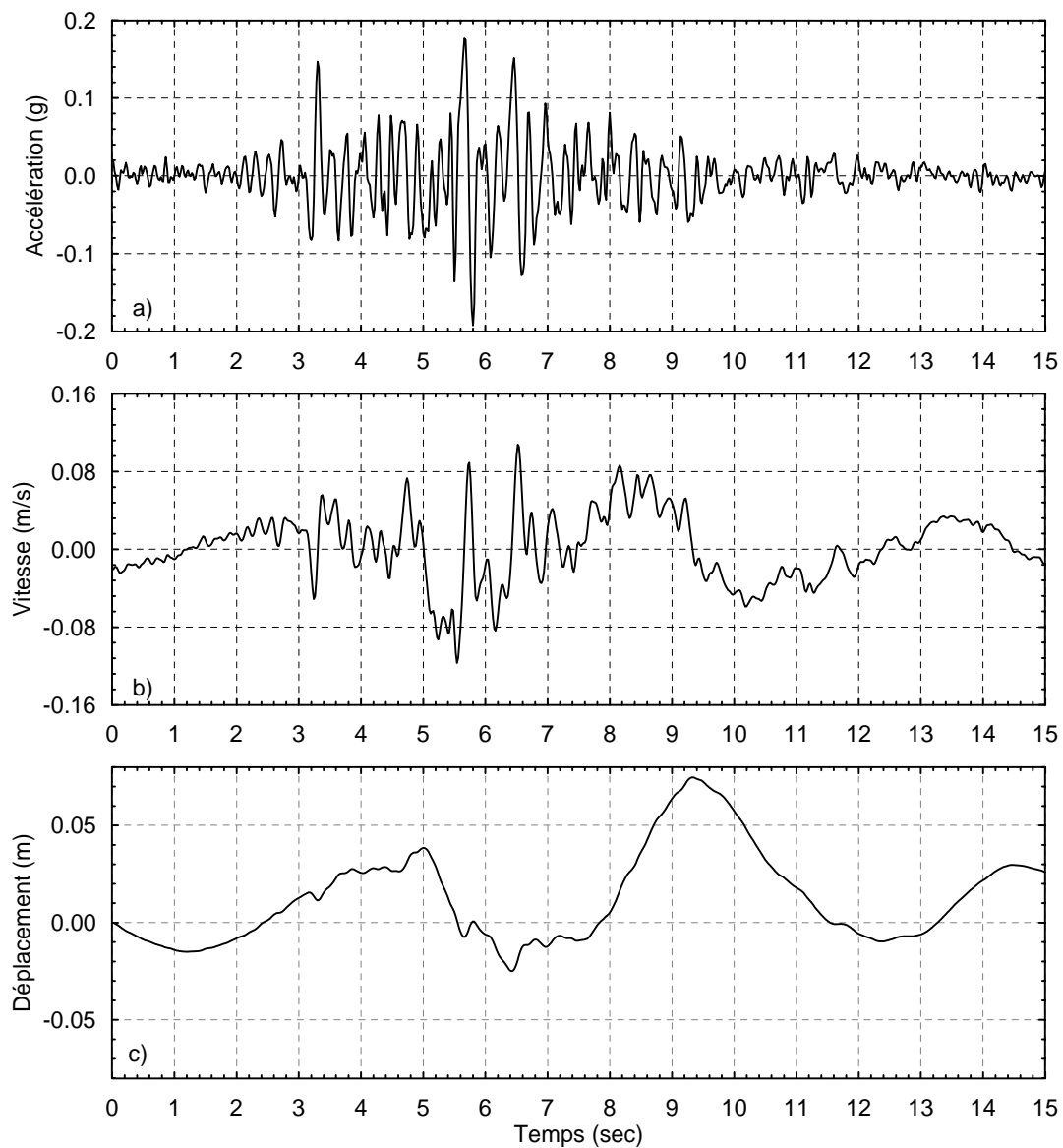


**Figure A.1** Accélération, vitesse et déplacement en fonction du temps du mouvement sismique simulé pour la région de Lachenaie selon le CNB.

Tremblement de terre compatible avec les données sismiques de la région de Lachenaie

\* Événement produit à San Fernando, Californie, le 9 février 1971 \*

Sta : Cal;tech Sei. Lab. Pasadena, Cal.; comp. (S90W) Amax = 0,192; Vmax = 0.116 m/s



**Figure A.2** Accélération, vitesse et déplacement en fonction du temps du mouvement sismique CSLP

## ANNEXE B

### RÉSULTATS DES ESSAIS MASW POUR LE SITE DE BFI USINE DE TRIAGE LACHENAIE LTÉE (RAPPORT GEO-01-06)

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Faculté de génie

Département de génie civil

RÉSULTATS DES ESSAIS MASW POUR LE SITE  
DE BFI USINE DE TRIAGE LACHENAIE LTEE

Rapport GEO-01-06

Préparé par

Mourad Karray et Guy Lefebvre  
Département de génie civil  
Université de Sherbrooke

Présenté à

GSI ENVIRONNEMENT  
1471 Boulevard Lionel-Boulet  
Varenes (Québec) J3X 1P7

Décembre 2001

## TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION .....	3
2.	PROGRAMME ET PROCÉDURE D'ESSAIS .....	3
3.	ANALYSES ET PROCÉDURES D'INTERPRÉTATION .....	6
4.	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS.....	8
5.	ANALYSE ET PRÉSENTATION DES RÉSULTATS .....	8
5.1	Essais effectués sur le terrain naturel (zones 3 et 4).....	8
5.2	Essais effectués sur les nouvelles matières résiduelles (zone 2).....	10
5.3	Essais effectués sur les anciennes matières résiduelles (zone 1) .....	12
6.	CONCLUSION.....	14
	ANNEXE A. Résultats des essais MASW .....	16
	ANNEXE B. Relations de dispersion et profils de vitesse des ondes de cisaillement .....	21
	ANNEXE C. Historique et procédure de la méthode MASW .....	30



## **1 INTRODUCTION**

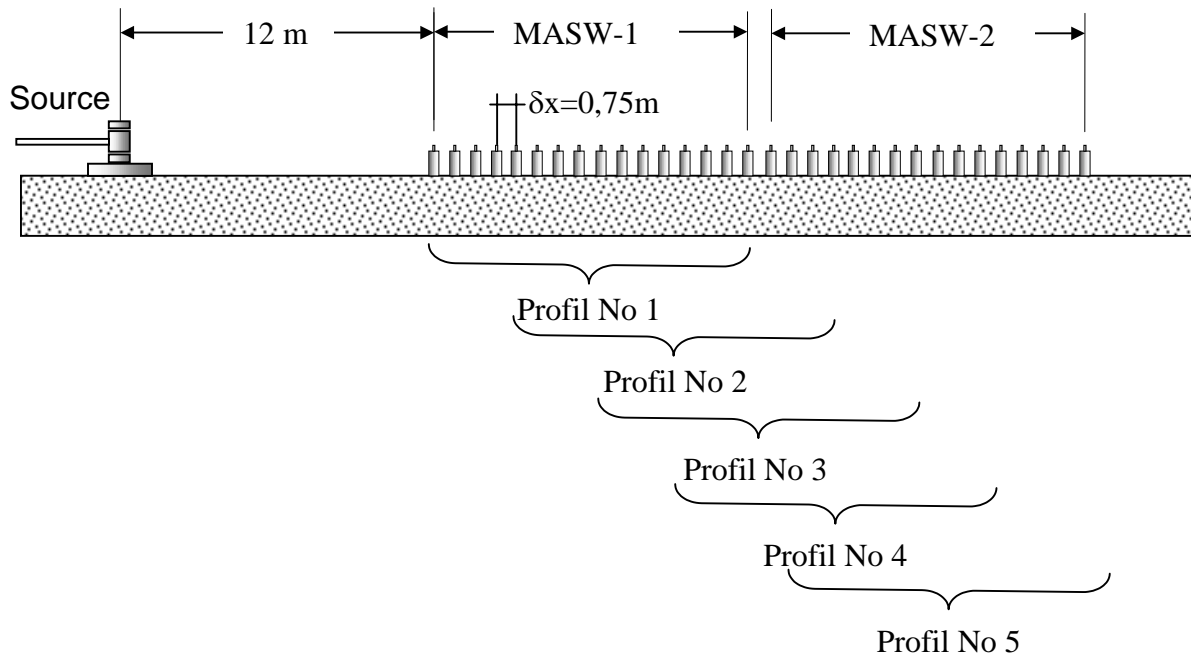
À la demande de GSI Environnement (lettre du 15 août 2001), l'Université de Sherbrooke a réalisé, les 11 et 12 octobre 2001, des essais MASW (Modal-Analysis-of-Surface-Waves) à quatre endroits sur le site BFI Usine de Triage Lachenaie (UTL), soit deux dans le secteur nord (terrain naturel), un au secteur est (secteur en exploitation) et un au secteur ouest déjà exploité. Ces essais, basés sur la vitesse de propagation des ondes de surface et réalisés entièrement à partir de la surface du sol, sans forage ou intrusion, avaient pour objectif d'évaluer les paramètres dynamiques du sol ainsi que ceux des matières résiduelles, nécessaires à l'étude parasismique des ouvrages prévus dans le secteur nord. Le but du présent rapport est de présenter et d'analyser les résultats obtenus par la méthode MASW.

## **2 PROGRAMME ET PROCÉDURE D'ESSAIS**

Quatre endroits ont été examinés à l'aide de la méthode MASW. Les deux premiers endroits sont situés dans le secteur nord (zones 3 et 4). La localisation approximative de ces endroits est montrée à la figure 1. Les deux autres séries d'essais ont été réalisées sur des dépôts de matières résiduelles recouverts d'une couche d'argile d'environ 8 à 10 m d'épaisseur (zones 1 et 2, Fig. 1). Le premier site (zone 1) correspond à une ancienne zone d'exploitation (environ 10 ans). Le deuxième (zone 2) correspond à des matières résiduelles plus récentes (âgées d'environ 5 ans).

Un essai MASW consiste à mesurer, à l'aide de seize capteurs placés à des intervalles de distances égaux, les ondes de surface générées au moyen d'une source d'impact. Le choix de l'intervalle de distance entre les capteurs ainsi que la distance entre la source et le premier capteur dépend de la profondeur à investiguer. Une description plus détaillée de la méthode MASW est présentée à l'annexe C.



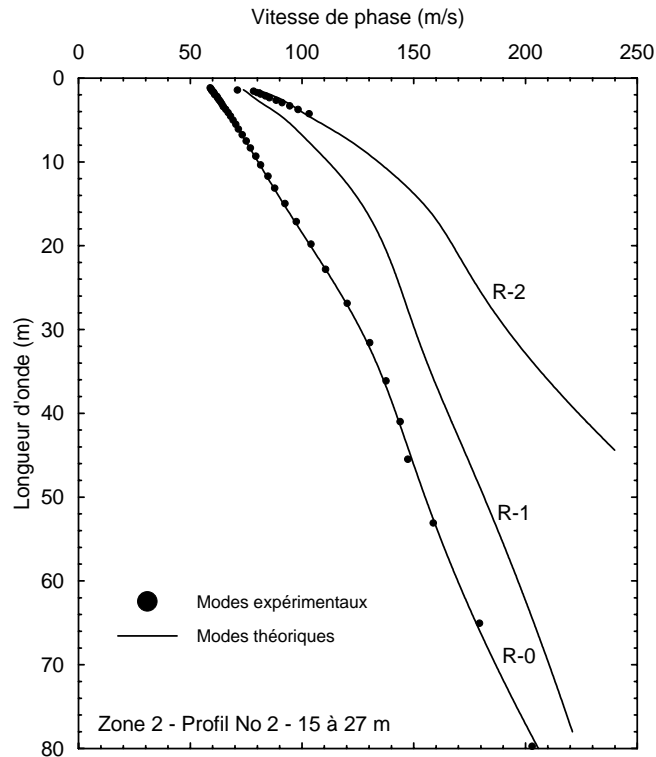


**Figure 2** Configuration des essais MASW effectués au site UTL

Un intervalle d'espacement entre les capteurs de 0,75 m et une distance source/premier capteur de 12 m ont été utilisés au site de UTL (Fig. 2). Dans chacun des sites testés, deux essais MASW successifs ont été réalisés en gardant la source au même endroit. La réalisation d'essais MASW successifs avec une source fixe permet une certaine tomographie à l'aide de plusieurs profils de vitesse des ondes de cisaillement obtenus en combinant les signaux des deux séries d'essais MASW, comme montré à la figure 2. L'étude vise à déterminer quatre ou cinq profils de vitesse des ondes de cisaillement pour chaque ligne d'essais réalisée (Fig. 2). Chacun de ces profils représente une moyenne des propriétés du milieu couvert par les seize capteurs. Donc, le profil 1 représente la zone située entre 12 et 24 m, le profil 2, la zone située entre 15 et 27 m et ainsi de suite.

### 3 ANALYSE ET PROCÉDURES D'INTERPRÉTATION

Les signaux mesurés sont interprétés en série de seize signaux en effectuant une analyse temps-espace. L'évaluation de la relation entre la vitesse de phase et la longueur d'onde (courbe de dispersion) des différents modes des ondes de Rayleigh est effectuée à l'aide d'un programme automatisé (FFTKONS) qui a été développé à l'Université de Sherbrooke. Un

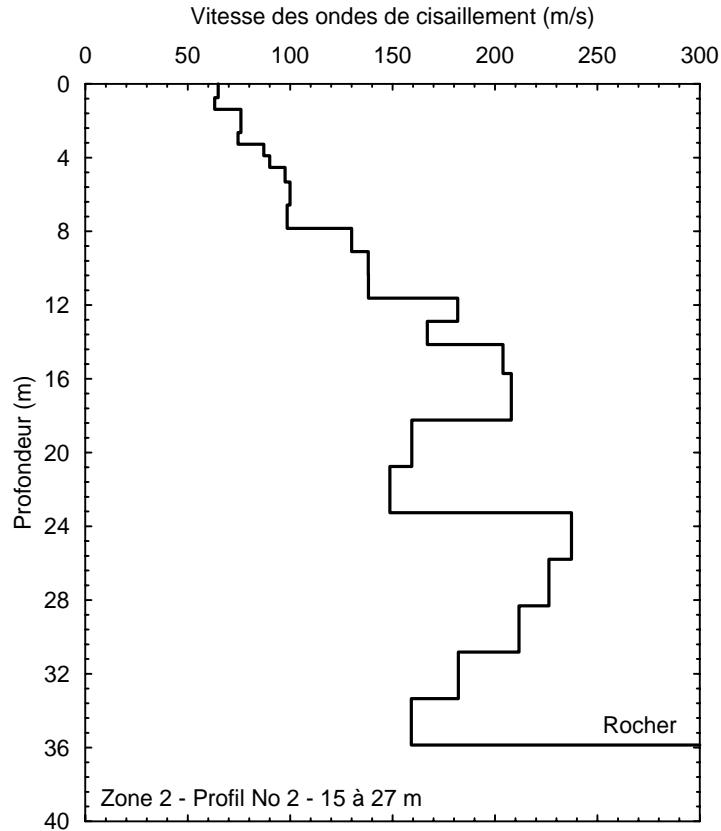


**Figure 3** Relation de dispersion déterminée à l'aide du programme FFTKONS

exemple de relation de dispersion déterminée à l'aide du programme FFTKONS est présenté à la figure 3.

L'inversion est effectuée à l'aide d'un programme automatisé, INVSS, développé à l'Université de Sherbrooke en considérant le mode fondamental (R-0) des ondes de Rayleigh uniquement. La première inversion est réalisée en considérant un profil de coefficient de Poisson ( $\nu$ ) hypothétique. Une fois cette inversion réalisée, les courbes de dispersion théoriques (modes de Rayleigh) sont évaluées et comparées à celles obtenues expérimentalement. Si les modes supérieurs, théoriques et expérimentaux ne correspondent pas, un nouveau profil de  $\nu$  est estimé et l'inversion est initialisée à nouveau jusqu'à la meilleure concordance possible entre les différents modes des ondes de Rayleigh.

Ce genre d'inversion permet d'avoir une évaluation précise du profil de vitesse des ondes de cisaillement ainsi qu'une bonne estimation du profil du coefficient de Poisson. La figure 4 donne un exemple d'inversion réalisée à l'aide du programme INVSS. La bonne concordance



**Figure 4** Profil de vitesse des ondes de cisaillement correspondant à la courbe de dispersion de la figure 3

entre les modes de Rayleigh, théoriques et expérimentaux, pour le mode fondamental et le deuxième mode supérieur des ondes de Rayleigh, est montrée à la figure 3. Le profil de vitesse des ondes de cisaillement correspondant est présenté à la figure 4. La figure 3 montre qu'il existe une certaine énergie des modes supérieurs ( $\lambda < 5$  m) des ondes de Rayleigh que seule la méthode MASW permet d'identifier et d'isoler. Il est important de noter qu'une erreur même sur une petite partie de la courbe de dispersion peut produire des erreurs importantes sur tout le profil de vitesse des ondes de cisaillement.

#### 4 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Les résultats des différents essais MASW sont présentés aux tableaux A-1 à A-4 de l'annexe A. Ces tableaux donnent la vitesse des ondes de cisaillement ( $V_s$ ) et le coefficient de Poisson en fonction de la profondeur déterminée à l'aide de la méthode MASW. Ces tableaux pré-

sentent également les profils du module de cisaillement maximum (nécessaires pour l'analyse dynamique) et évalués à partir de  $V_s$ . Le profil 1 correspond à l'analyse des seize signaux dont le premier est placé à une distance de 12 m de la source. Les deuxième, troisième, quatrième et cinquième profils correspondent à une position du premier capteur situé à 15, 18, 21 et 24 m. Les relations de dispersion ainsi que les profils de vitesse correspondants sont donnés aux figures B1 à B16 de l'annexe B.

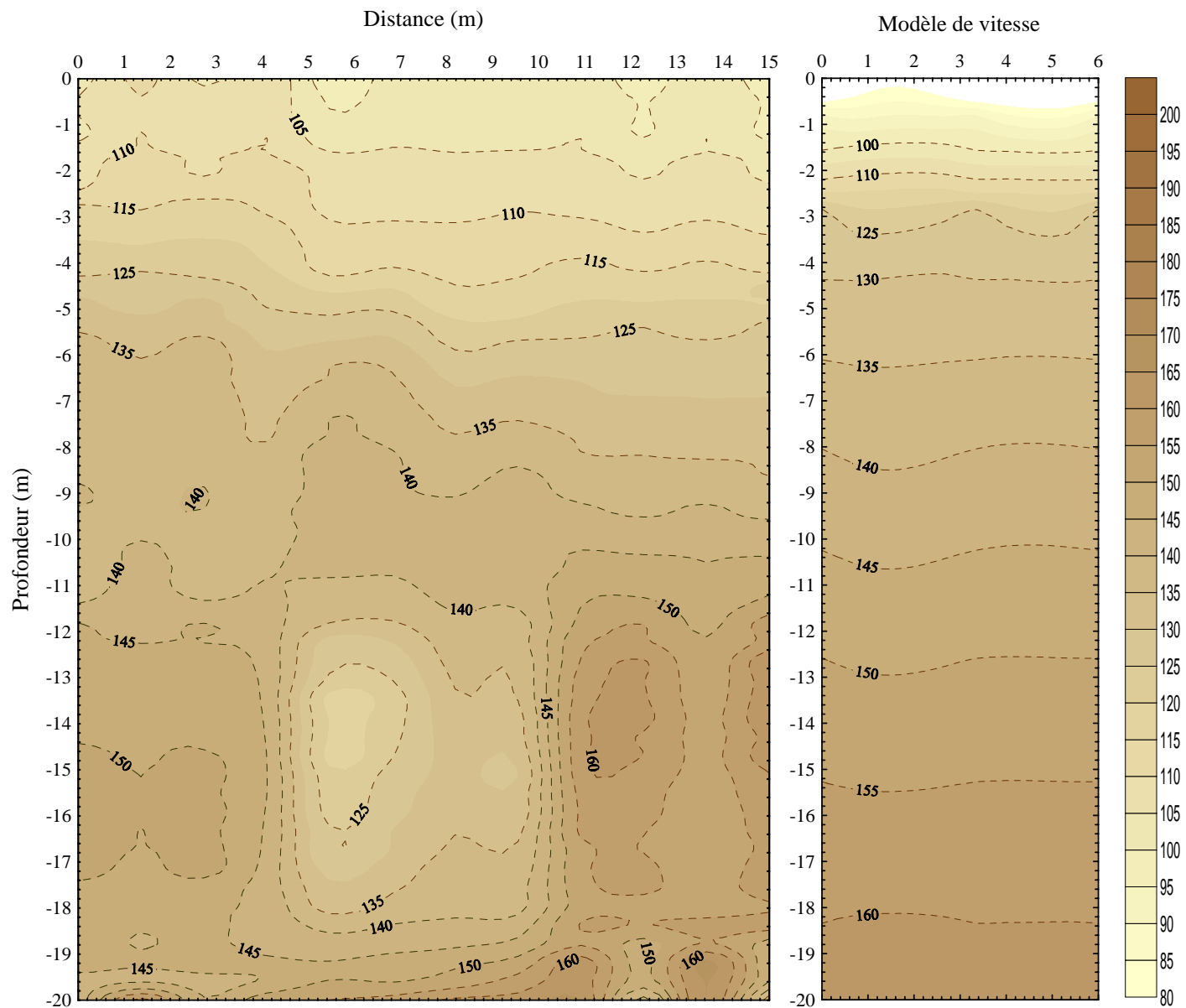
## **5 ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS**

La vitesse de propagation des ondes de cisaillement est reliée essentiellement au type de sol, à l'état de densité et à la contrainte effective. Comme la contrainte effective peut être assez facilement estimée et que  $V_s$  varie comme  $\sigma'^{1/4}$ , il est intéressant pour fins d'interprétation de normaliser la vitesse pour faire disparaître l'effet de la contrainte effective ou encore de comparer le profil de  $V_s$  à un accroissement normal selon la profondeur.

### **5.1 Essais effectués sur le terrain naturel (Zones 3 et 4)**

Les profils de vitesse des ondes de cisaillement déterminés dans la zone 4 (Fig. B-1 à B-4 de l'annexe B) indiquent des valeurs variant entre 90 et 100 m/s dans les premiers mètres du dépôt. Ces vitesses augmentent ensuite de façon régulière avec la profondeur pour atteindre des valeurs de 160 à 170 m/s à 20-24 m. Les essais MASW ont permis de situer la profondeur du rocher dans la zone 4 à une profondeur variant entre 22,3 et 25,1 m.

Afin de mieux apprécier les résultats, les profils de vitesse des ondes de cisaillement ont été convertis en courbes de contour de  $V_s$  à la figure 5. Un modèle présentant l'augmentation de la vitesse des ondes de cisaillement dans le cas d'un dépôt de sol naturel (l'augmentation de la vitesse dans ce cas est directement liée à la contrainte effective moyenne dans le sol,  $(\sigma'_m)^{1/4}$ ) est également présenté à la figure 5. Ces contours permettent une meilleure visualisation des variations de la vitesse des ondes de cisaillement avec la profondeur ainsi qu'une meilleure identification des variations locales dans le dépôt. La vitesse des ondes de cisaillement augmente de manière assez conforme avec l'augmentation de la contrainte effective. La



**Figure 5** Tomographie de vitesse des ondes de cisaillement pour la zone 4 (terrain naturel)

vitesse normalisée ( $V_s/\sigma^{1/4}$ ) est alors voisine de 48 m/s. À des profondeurs supérieures à 12 m, les variations locales de vitesse sont cependant plus importantes.

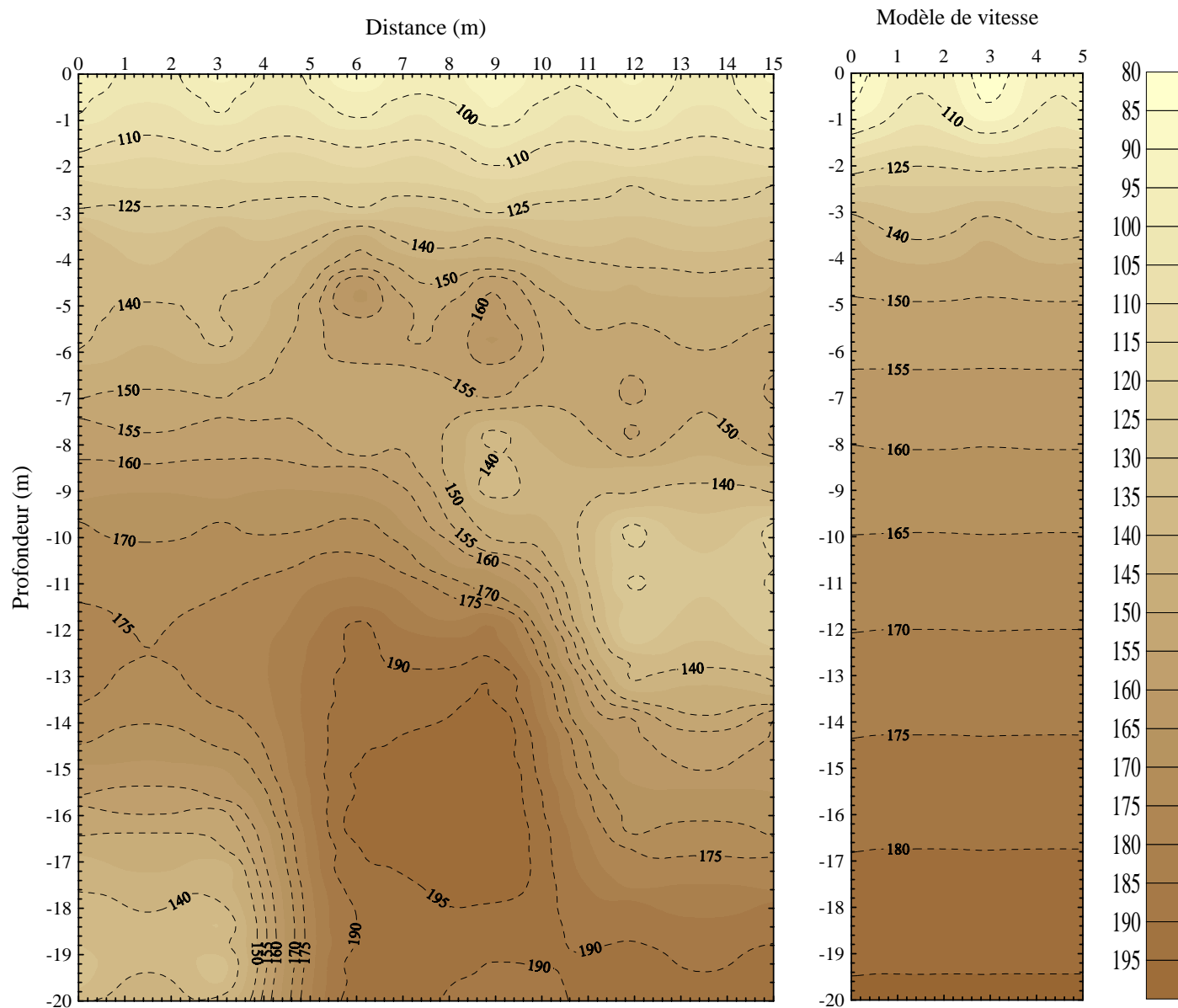
Les profils de vitesse des ondes de cisaillement déterminés à la zone 3 indiquent, dans l'ensemble, des valeurs plus élevées que celles déterminées dans la zone 4 avec une vitesse normalisée voisine de 54 m/s. La profondeur du rocher a été identifiée dans cette zone à une profondeur d'environ 24,5 m. La qualité des signaux enregistrés dans ce site était quelque peu moins bonne que celle des signaux enregistrés dans les autres sites testés.

Les contours de vitesse des ondes de cisaillement ainsi qu'un modèle correspondant à l'augmentation de la contrainte effective ( $(\sigma'_m)^{1/4}$ ) sont présentés à la figure 6. La figure 6 indique que la vitesse des ondes de cisaillement augmente dans l'ensemble conformément à l'augmentation de la contrainte effective moyenne avec peu de variation latérale dans les 10 à 12 premiers mètres du sol. On note cependant des variations de vitesse plus importantes à des profondeurs supérieures à 12 m.

## **5.2 Essais sur des matières résiduelles récentes (Zone 2)**

Les profils de vitesse des ondes de cisaillement déterminés dans la zone 2 (Fig. B-9 à B-12 de l'annexe B) indiquent des vitesses variant de 60-65 m/s à 100-105 m/s dans les 8 à 9 premiers mètres du sol. On constate ensuite une augmentation rapide de la vitesse des ondes de cisaillement à des profondeurs de 8,5 à 10 m de profondeur. D'une manière générale, la vitesse augmente ensuite (à partir de 8 m de profondeur) de 150 m/s à 240 m/s à des profondeurs variant entre 22 et 25 m. On remarque ensuite une diminution de la vitesse à des valeurs variant entre 160 et 220 m/s. La profondeur du rocher a été identifiée à des profondeurs variant entre 32 et 35,9 m. Les profils sont présentés en contours de vitesses des ondes de cisaillement à la figure 7. Les contours de vitesse normalisée par la contrainte effective moyenne sont également présentés sur cette figure. Les essais MASW permettent de distinguer trois couches différentes ainsi que le contact avec le socle rocheux. Les vitesses plus faibles dans les premiers 8 à 9 m de profondeur (vitesses normalisées variant entre 30 et 36 m/s) sont associées à la couche de recouvrement constituée d'argile remaniée. Les vitesses





**Figure 6** Tomographie de vitesse des ondes de cisaillement pour la zone 3 (terrain naturel)

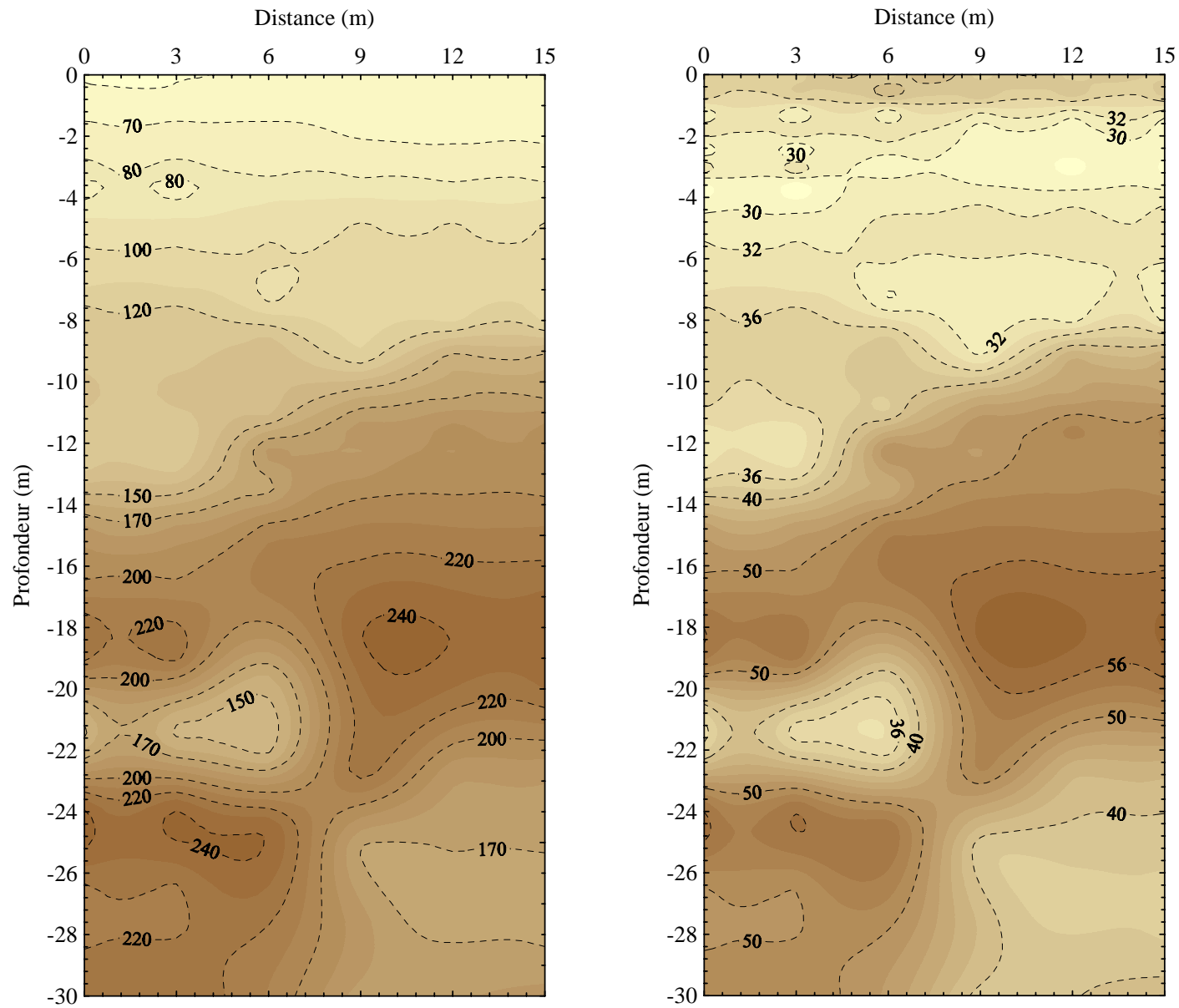
sont sensiblement plus élevées entre 8 et 24 m de profondeur (vitesse normalisée de 40 et 55 m/s). Ces vitesses plus élevées sont associées à la couche de matières résiduelles. À des profondeurs supérieures à 24 m, les vitesses normalisées diminuent à des valeurs variant entre 40 et 52 m/s. Ces vitesses normalisées correspondent assez bien aux valeurs retrouvées dans les zones 3 et 4 (sol naturel).

### **5.3 Essais sur matières résiduelles anciennes (Zone 1)**

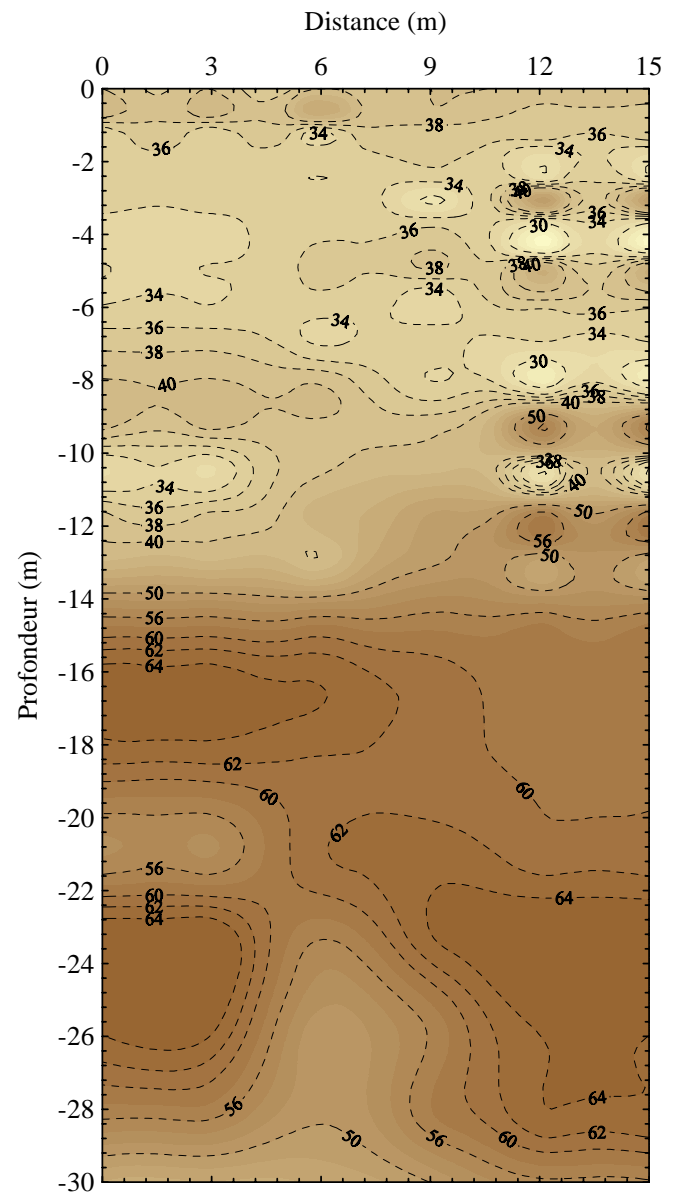
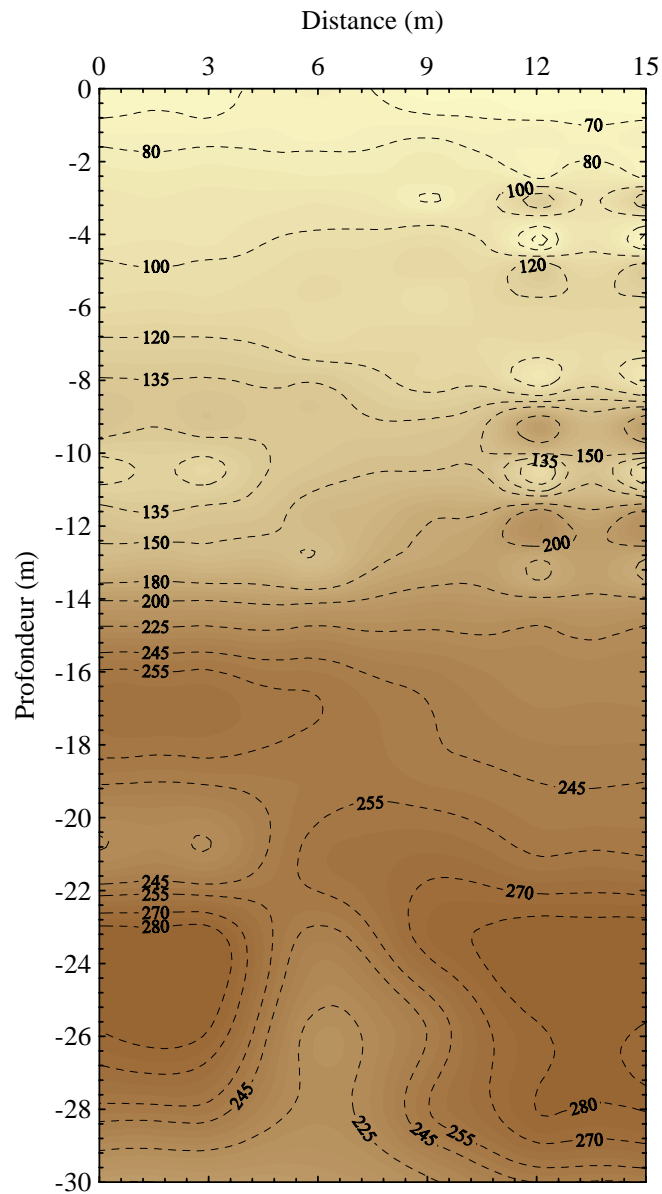
Les profils de vitesse des ondes de cisaillement déterminés dans la zone 1 (Fig. B-13 à B-16 de l'annexe B) indiquent des vitesses variant de 60-70 m/s à 110-125 m/s dans les 8 ou 9 premiers mètres du sol. On constate ensuite une augmentation rapide de la vitesse des ondes de cisaillement à des profondeurs de 8,5 à 10 m de profondeur. D'une manière générale, la vitesse augmente ensuite de 150 m/s à 280 m/s jusqu'à des profondeurs variant entre 22 et 25 m. On remarque ensuite une légère diminution de la vitesse. La profondeur du rocher a été identifiée à une profondeur voisine de 34 m.

Les profils sont présentés en contours de vitesses des ondes de cisaillement à la figure 8. Les contours de vitesse normalisée par la contrainte effective moyenne sont également présentés sur cette figure. Les essais MASW permettent de distinguer trois couches différentes ainsi que le contact avec le socle rocheux.

Dans les 8 ou 9 premiers mètres du dépôts (Fig. 8), on observe des vitesses normalisées variant entre 32 et 38 m/s, associées à la couche d'argile de recouvrement qui serait ici légèrement plus consolidée que dans la zone 2. À des profondeurs variant entre 8 et 24 m, les vitesses normalisées varient entre 50 et 64 m/s et sont, dans l'ensemble, supérieures de 15 à 20% à celles obtenues dans les matières résiduelles récentes. Les vitesses des ondes de cisaillement obtenues dans la zone 1 sont aussi généralement plus uniformes que celles obtenues dans la zone 2. À des profondeurs supérieures à 24 m, les vitesses normalisées varient entre 50 et 64 m/s. Ces vitesses sont légèrement supérieures aux valeurs retrouvées dans les dépôts de sols naturels (zones 3 et 4) et indiquent vraisemblablement une certaine consolidation dans la fondation argileuse.



**Figure 7** Tomographie pour la zone 2 (secteur Est – actuellement en exploitation) en termes de vitesse des ondes de cisaillement et de vitesse normalisée



**Figure 8** Tomographie pour la zone 1 (ancienne zone d'exploitation) en termes de vitesse des ondes de cisaillement et de vitesse normalisée

## 6 CONCLUSION

L'étude présentée dans ce rapport avait pour objectif de déterminer les paramètres dynamiques du sol naturel à faibles déformations ( $V_s$  et  $G_{max}$ ) pour l'analyse parasismique de l'agrandissement du secteur nord de BFI Usine de Triage Lachenaie Ltee. L'étude avait également pour but d'établir les caractéristiques dynamiques des matières résiduelles.

Les résultats ont été discutés seulement en termes de vitesse de propagation des ondes de cisaillement et de vitesse normalisée. Les valeurs de module de cisaillement à petite déformation ( $G_{max}$ ) ainsi que les coefficients de Poisson sont cependant présentés sous forme de tableaux à l'annexe A et permettent une bonne caractérisation des couches des dépôts de sols naturels et des couches de matières résiduelles. Le coefficient de Poisson permet, en particulier, une certaine appréciation de l'état de saturation, un module de Poisson de 0,5 étant généralement associé à une saturation complète. La profondeur du socle rocheux a aussi été identifiée à chacun des sites. La caractérisation en termes de module par la méthode MASW offre, par exemple, un potentiel intéressant pour le suivi et la classification de la compétence géotechnique des matières résiduelles.

Pour les essais réalisés en terrains naturels (zones 3 et 4), les résultats confirment une certaine variabilité des profils à l'intérieur de distances relativement courtes, surtout aux profondeurs supérieures à 12 m, comme observé dans les profils scissométriques. La profondeur du rocher a été identifiée à des profondeurs variant entre 22 et 25 m. Pour les essais effectués sur les dépôts de matières résiduelles, les résultats montrent des vitesses assez importantes dans la couche de matières résiduelles. Ces vitesses sont plus élevées dans les matières résiduelles plus anciennes. Le contact entre la limite inférieure des matières résiduelles et l'argile de la fondation est généralement caractérisé par une diminution de la vitesse et n'est pas défini avec précision dans tous les cas. Les vitesses dans l'argile de fondation plus élevées au site 1 qu'au site 2 semblent indiquer une légère consolidation de la fondation sous les matières résiduelles anciennes.

## ANNEXE A

### RÉSULTATS DES ESSAIS MASW

**Tableau A-1** Profil de vitesse des ondes de cisaillement, du coefficient de Poisson et du module de cisaillement maximum déterminés à la Zone 4

Profil No 1				Profil No 2				Profil No 3				Profil No 4			
Prof (m)	V <sub>s</sub> (m/s)	ν	G <sub>max</sub> (MPa)	Prof (m)	V <sub>s</sub> (m/s)	ν	G <sub>max</sub> (MPa)	Prof (m)	V <sub>s</sub> (m/s)	ν	G <sub>max</sub> (MPa)	Prof (m)	V <sub>s</sub> (m/s)	ν	G <sub>max</sub> (MPa)
0-1	103	0,4	17,4	0-1	88	0,4	12,9	0-1	94	0,4	14,6	0-1	95	0,4	15,0
1-2	105	0,499	18,2	1-2	107	0,499	19,0	1-2	105	0,499	18,0	1-2	101	0,499	16,8
2-3	112	0,499	20,7	2-3,05	114	0,499	21,3	2-3	113	0,499	21,1	2-2,9	106	0,499	18,7
3-4	122	0,499	24,5	3,05-4,1	103	0,499	17,5	3-4	110	0,499	20,1	2,9-3,8	107	0,499	19,0
4-5	125	0,499	25,6	4,1-5,15	117	0,499	22,8	4-5	108	0,499	19,3	3,8-4,7	117	0,499	22,5
5-6	139	0,499	31,9	5,15-6,2	137	0,499	30,9	5-6	122	0,499	24,5	4,7-5,6	124	0,499	25,6
6-7	139	0,499	32,0	6,2-7,25	143	0,499	33,9	6-7	132	0,499	28,6	5,6-6,5	130	0,499	27,8
7-8	138	0,499	31,6	7,25-8,3	147	0,499	35,5	7-8	138	0,499	31,3	6,5-7,4	128	0,499	27,0
8-9	136	0,499	30,4	8,3-9,35	149	0,499	36,6	8-9	144	0,499	34,2	7,4-8,3	135	0,499	30,2
9-10	145	0,499	34,8	9,35-10,4	148	0,499	36,2	9-10	145	0,499	34,8	8,3-9,2	133	0,499	29,2
10-11	132	0,499	28,6	10,4-11,4	146	0,499	35,3	10-11	147	0,499	35,7	9,2-10,1	141	0,499	33,0
11-12	143	0,499	33,6	11,4-12,5	133	0,499	29,4	11-12	141	0,499	32,7	10,1-11	147	0,499	35,6
12-13	148	0,499	36,2	12,5-13,5	107	0,499	18,9	12-13	131	0,499	28,3	11-11,9	151	0,499	37,8
13-14	149	0,499	36,6	13,5-14,6	107	0,499	19,0	13-14	137	0,499	30,8	11,9-12,8	164	0,499	44,2
14-15	150	0,499	37,0	14,6-15,6	113	0,499	21,1	14-15	122	0,499	24,4	12,8-13,7	167	0,499	46,2
15-16	153	0,499	38,5	15,6-16,7	123	0,499	24,9	15-16	122	0,499	24,5	13,7-14,6	164	0,499	44,3
16-17	150	0,499	37,4	16,7-17,8	120	0,499	23,7	16-17	130	0,499	28,0	14,6-15,5	163	0,499	43,9
17-18	155	0,499	39,8	17,8-18,8	139	0,499	32,0	17-18	140	0,499	32,2	15,5-16,4	156	0,499	40,1
18-19	136	0,499	30,3	18,8-19,9	147	0,499	35,8	18-19	126	0,499	26,1	16,4-17,3	159	0,499	41,7
19-20	160	0,499	42,0	19,9-20,9	161	0,499	42,7	19-20	163	0,499	44,1	17,3-18,2	162	0,499	43,4
20-21	124	0,499	25,3	20,9-22	155	0,499	39,5	20-21	153	0,499	38,7	18,2-19,1	149	0,499	37,0
21-22	131	0,499	28,3	22-23	168	0,499	46,3	21-22	168	0,499	46,5	19,1-20	138	0,499	31,6
22-23	130	0,499	28,1	23-24,05	173	0,499	49,3	22-23	162	0,499	43,4	20-20,9	124	0,499	25,3
23-24	133	0,499	29,2	24,0-25,1	175	0,499	50,7	23-24	170	0,499	48,0	20,9-22,3	133	0,499	29,4
24 +	Roc	----	----	25,1 +	Roc	----	----	24 +	Roc	----	----	22,3 +	Roc	---	---

**Tableau A-2** Profil de vitesse des ondes de cisaillement, du coefficient de Poisson et du module de cisaillement maximum déterminés à la Zone 3

Profil No 2				Profil No 3				Profil No 4				Profil No 5			
Prof (m)	V <sub>s</sub> (m/s)	ν	G <sub>max</sub> (MPa)	Prof (m)	V <sub>s</sub> (m/s)	ν	G <sub>max</sub> (MPa)	Prof (m)	V <sub>s</sub> (m/s)	ν	G <sub>max</sub> (MPa)	Prof (m)	V <sub>s</sub> (m/s)	ν	G <sub>max</sub> (MPa)
0-0,75	91	0,4	13,5	0-0,8	85	0,4	11,8	0-0,8	86	0,4	12,2	0-0,8	92	0,4	14,0
0,75-1,5	108	0,499	19,2	0,8-1,6	110	0,499	19,9	0,8-1,6	103	0,499	17,7	0,8-1,6	99	0,499	16,2
1,5-2,55	110	0,499	20,0	1,6-2,64	111	0,499	20,5	1,6-2,64	106	0,499	18,6	1,6-2,64	121	0,499	24,1
2,55-3,6	134	0,499	29,8	2,64-3,7	131	0,499	28,3	2,64-3,7	130	0,499	27,7	2,64-3,7	133	0,499	29,3
3,6-4,65	143	0,499	33,8	3,7-4,7	169	0,499	46,9	3,7-4,7	156	0,499	40,2	3,7-4,7	139	0,499	32,0
4,65-5,7	136	0,499	30,6	4,7-5,8	167	0,499	46,3	4,7-5,8	168	0,499	46,4	4,7-5,8	152	0,499	38,2
5,7-6,75	140	0,499	32,5	5,8-6,8	150	0,499	37,0	5,8-6,8	165	0,499	45,1	5,8-6,8	153	0,499	38,7
6,75-7,8	158	0,499	41,05	6,8-7,8	150	0,499	36,7	6,8-7,8	148	0,499	36,1	6,8-7,8	159	0,499	41,9
7,8-8,85	157	0,499	40,8	7,8-8,9	151	0,499	37,7	7,8-8,9	127	0,499	26,6	7,8-8,9	152	0,499	38,3
8,85-9,9	169	0,499	47,2	8,9-9,9	177	0,499	51,8	8,9-9,9	145	0,499	34,6	8,9-9,9	129	0,499	27,6
9,9-11	173	0,499	49,6	9,9-11	169	0,499	46,9	9,9-11	151	0,499	37,7	9,9-11	115	0,499	21,8
11-12	175	0,499	50,8	11-12	193	0,499	61,5	11-12	182	0,499	54,9	11-12	133	0,499	29,2
12-13,05	178	0,499	52,5	12-13	191	0,499	60,1	12-13	190	0,499	59,7	12-13	117	0,499	22,8
13-14,1	178	0,499	52,4	13-14,1	193	0,499	61,3	13-14,1	200	0,499	66,0	13-14,1	162	0,499	43,1
14-15,15	168	0,499	46,5	14-15,1	194	0,499	62,4	14-15,1	199	0,499	65,2	14-15,1	160	0,499	42,3
15-16,2	160	0,499	42,0	15,-16,2	197	0,499	64,1	15,-16,2	202	0,499	66,9	15,-16,2	167	0,499	46,1
16-17,25	143	0,499	33,7	16,17,2	199	0,499	65,1	16,17,2	199	0,499	65,2	16,17,2	169	0,499	47,4
17-18,3	139	0,499	32,0	17-18,2	190	0,499	59,7	17-18,2	205	0,499	69,4	17-18,2	183	0,499	55,5
18-19,35	130	0,499	27,9	18-19,3	190	0,499	59,6	18-19,3	182	0,499	54,4	18-19,3	193	0,499	61,6
19-20,4	133	0,499	29,3	19-20,3	194	0,499	62,1	19-20,3	198	0,499	64,7	19-20,3	195	0,499	62,4
20-21,45	147	0,499	35,4	20-21,4	195	0,499	63,0	20-21,4	174	0,499	50,1	20-21,4	195	0,499	62,9
21-22,5	174	0,499	50,2	21-22,4	194	0,499	62,0	21-22,4	191	0,499	60,0	21-22,4	189	0,499	58,9
22-23,55	170	0,499	47,6	22-23,4	195	0,499	63,0	22-23,4	179	0,499	52,8	22-23,4	184	0,499	55,8
23-24,6	197	0,499	64,0	23-24,48	193	0,499	61,4	23-24,48	205	0,499	69,3	23-24,48	196	0,499	63,1
24,6 +	Roc	----	----	24,48+	Roc	----	----	24,48+	Roc	----	----	24,48+	Roc	---	---



**Tableau A-3** Profil de vitesse des ondes de cisaillement, du coefficient de Poisson et du module de cisaillement maximum déterminés à la Zone 2

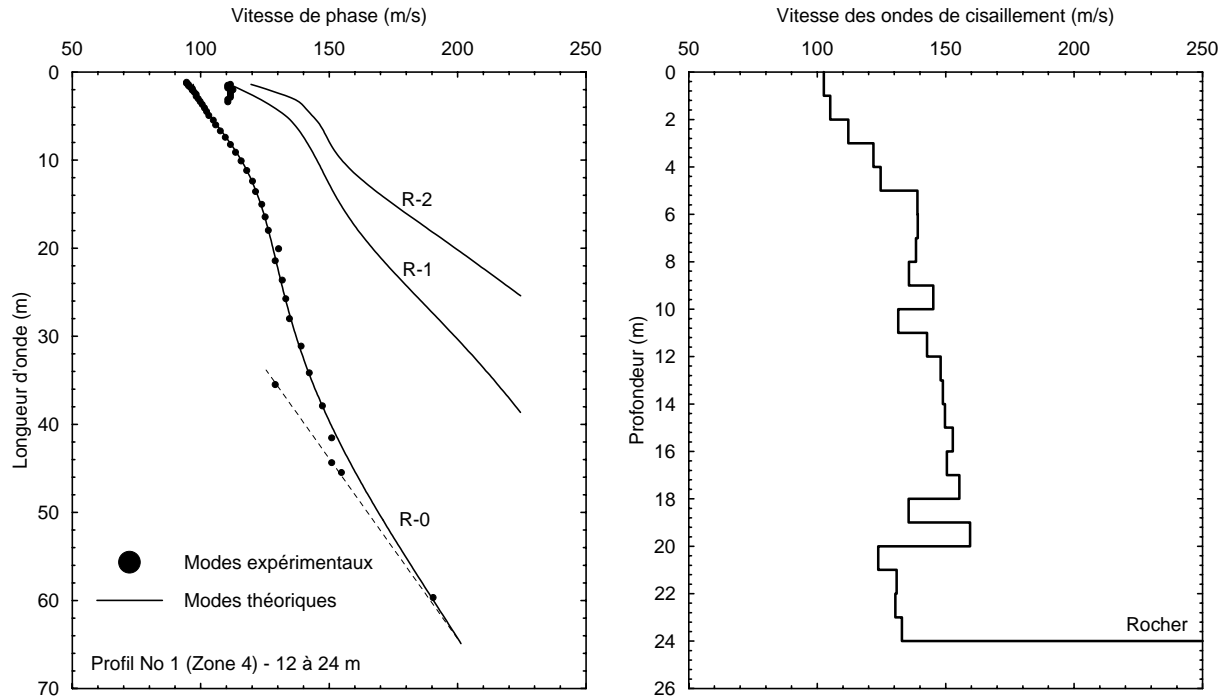
Profil No 1				Profil No 2				Profil No 3				Profil No 4			
Prof (m)	V <sub>s</sub> (m/s)	ν	G <sub>max</sub> (MPa)	Prof (m)	V <sub>s</sub> (m/s)	ν	G <sub>max</sub> (MPa)	Prof (m)	V <sub>s</sub> (m/s)	ν	G <sub>max</sub> (MPa)	Prof (m)	V <sub>s</sub> (m/s)	ν	G <sub>max</sub> (MPa)
0-0,75	60	0,4	5,9	0-0,75	65	0,4	7,0	0-0,75	62	0,4	6,4	0-0,75	61	0,4	6,2
0,75-1,36	62	0,4	6,4	0,75-1,38	63	0,4	6,6	0,75-1,33	66	0,4	7,1	0,75-1,33	64	0,4	6,7
1,36-1,97	76	0,4	9,5	1,38-2,0	76	0,4	9,5	1,33-1,91	66	0,4	7,3	1,33-1,91	65	0,4	7,1
1,97-2,59	71	0,4	8,3	2-2,64	76	0,4	9,5	1,91-2,5	72	0,4	8,7	1,91-2,5	70	0,4	8,2
2,59-3,2	87	0,4	12,4	2,64-3,3	75	0,4	9,2	2,5-3,08	75	0,4	9,2	2,5-3,08	72	0,4	8,5
3,20-3,8	73	0,4	8,9	3,3-3,9	87	0,4	12,5	3,08-3,66	85	0,4	12,0	3,08-3,66	82	0,4	11,2
3,8-4,4	84	0,4	11,6	3,9-4,5	90	0,4	13,4	3,66-4,24	84	0,4	11,8	3,66-4,24	84	0,4	11,8
4,4-5,2	92	0,4	14,1	4,5-5,3	97	0,4	15,7	4,24-4,97	99	0,4	16,3	4,24-4,97	99	0,4	16,3
5,2-6,4	101	0,4	16,8	5,3-6,58	100	0,4	16,5	4,97-6,13	101	0,4	17,1	4,97-6,13	102	0,4	17,1
6,4-7,6	109	0,4	19,4	6,58-7,8	99	0,4	16,0	6,13-7,3	103	0,4	17,5	6,13-7,3	103	0,4	17,5
7,6-8,86	128	0,3	26,9	7,8-9,1	130	0,3	27,9	7,3-8,5	106	0,3	18,7	7,3-8,5	106	0,3	18,7
8,86-10,1	128	0,3	26,9	9,1-10,4	138	0,3	31,5	8,5-9,6	113	0,3	21,0	8,5-9,6	153	0,3	38,6
10,1-11,3	135	0,3	30,1	10,4-11,6	138	0,3	31,5	9,6-10,8	156	0,3	40,1	9,6-10,8	166	0,3	45,5
11,3-12,5	123	0,3	25,1	11,6-12,9	182	0,3	54,5	10,8-11,9	183	0,3	55,4	10,8-11,9	193	0,3	61,6
12,5-13,8	129	0,3	27,9	12,9-14,1	167	0,3	46,0	11,9-13,1	181	0,3	54,3	11,9-13,1	191	0,3	60,4
13,8-15,3	179	0,3	53,1	14,1-15,7	204	0,3	68,6	13,1-14,6	203	0,3	67,8	13,1-14,6	203	0,3	67,8
15,3-17,7	201	0,3	66,6	15,7-18,2	208	0,3	71,3	14,6-16,9	220	0,3	79,9	14,6-16,9	220	0,3	80,0
17,7-20,2	223	0,3	81,8	18,2-20,8	159	0,3	41,9	16,9-19,2	238	0,3	93,5	16,9-19,2	238	0,3	93,5
20,2-22,6	148	0,3	35,9	20,8-23,3	149	0,3	36,4	19,2-21,6	227	0,3	85,7	19,2-21,6	228	0,3	85,7
22,6-25,1	238	0,499	94,1	23,3-25,8	237	0,499	93,0	21,6-23,9	225	0,499	83,4	21,6-23,9	185	0,499	56,3
25,1-27,5	220	0,499	79,8	25,8-28,3	226	0,499	84,5	23,9-26,2	170	0,499	47,8	23,9-25,9	170	0,499	47,8
27,5-30	222	0,499	81,4	28,3-30,8	212	0,499	74,0	26,2-28,5	183	0,499	55,2	25,9-27,9	163	0,499	43,8
30-32,4	158	0,499	41,2	30,8-33,4	182	0,499	54,7	28,5-30,9	174	0,499	50,0	27,9-30,0	174	0,499	50,0
32,4-35,9	161	0,499	42,8	33,4-35,9	159	0,499	41,8	30,9-33,2	175	0,499	51,0	30,0-32	176	0,499	51,0
35,9 +	Roc	---	----	35,9 +	Roc	---	---	33,2 +	Roc	---	----	32 +	Roc	---	----

**Tableau A-4** Profil de vitesse des ondes de cisaillement, du coefficient de Poisson et du module de cisaillement maximum déterminés à la Zone 1

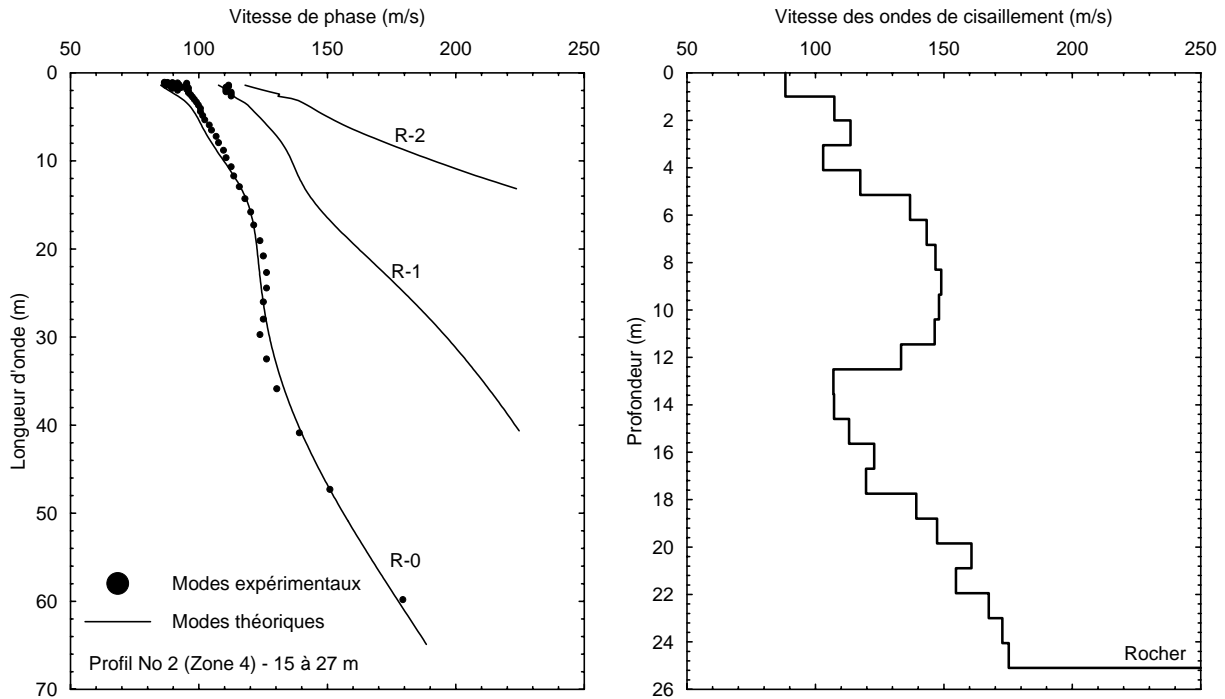
Profil No 1				Profil No 2				Profil No 3				Profil No 4			
Prof. (m)	V <sub>s</sub> (m/s)	ν	G <sub>max</sub> (MPa)	Prof. (m)	V <sub>s</sub> (m/s)	ν	G <sub>max</sub> (MPa)	Prof. (m)	V <sub>s</sub> (m/s)	ν	G <sub>max</sub> (MPa)	Prof. (m)	V <sub>s</sub> (m/s)	ν	G <sub>max</sub> (MPa)
0-0,7	68	0,4	7,7	0-0,75	77	0,4	9,7	0-0,7	61	0,4	6,1	0-0,75	60	0,4	5,9
0,7-1,3	71	0,4	8,3	0,75-1,36	68	0,4	7,7	0,7-1,3	80	0,4	10,5	0,75-1,36	75	0,4	9,2
1,3-1,9	81	0,4	10,8	1,36-1,96	81	0,4	10,8	1,3-1,9	77	0,4	9,9	1,36-1,96	81	0,4	10,7
1,9-2,5	85	0,4	12,0	1,96-2,6	83	0,4	11,3	1,9-2,5	96	0,4	15,3	1,96-2,6	64	0,4	6,8
2,5-3,1	91	0,4	13,6	2,6-3,17	93	0,4	14,1	2,5-3,1	74	0,4	9,0	2,6-3,17	124	0,4	25,4
3,1-3,7	94	0,4	14,7	3,17-3,78	97	0,4	15,4	3,1-3,7	92	0,4	13,9	3,17-3,78	107	0,4	19,1
3,7-4,4	91	0,4	13,8	3,78-4,38	102	0,4	17,2	3,7-4,4	103	0,4	17,6	3,78-4,38	57	0,4	5,4
4,3-5,05	101	0,4	16,7	4,38-5,14	108	0,4	19,4	4,3-5,05	117	0,4	22,4	4,38-5,14	123	0,4	25,0
5,05-6,25	104	0,4	17,9	5,14-6,36	111	0,4	20,2	5,05-6,25	101	0,4	16,9	5,14-6,36	116	0,4	22,4
6,25-7,45	121	0,4	23,9	6,36-7,57	109	0,4	19,5	6,25-7,45	115	0,4	21,8	6,36-7,57	112	0,4	20,7
7,45-8,65	137	0,3	30,8	7,57-8,78	137	0,3	31,2	7,45-8,65	115	0,3	21,8	7,57-8,78	96	0,3	15,2
8,7-9,85	144	0,3	33,9	8,78-9,99	138	0,3	31,6	8,7-9,85	139	0,3	31,7	8,78-9,99	203	0,3	67,9
9,8-11,05	114	0,3	21,3	9,99-11,2	144	0,3	34,1	9,8-11,05	149	0,3	36,6	9,99-11,2	101	0,3	17,0
11-12,25	141	0,3	32,9	11,2-12,4	160	0,3	42,1	11-12,25	178	0,3	52,1	11,2-12,4	222	0,3	81,5
12-13,45	155	0,3	39,7	12,4-13,6	151	0,3	37,8	12-13,45	185	0,3	56,4	12,4-13,6	175	0,3	50,7
13-14,95	206	0,3	70,2	13,6-15,1	213	0,3	74,9	13-14,95	213	0,3	74,7	13,6-15,1	217	0,3	77,9
15-17,35	258	0,3	109,9	15,1-17,6	253	0,3	106,1	15-17,35	242	0,3	96,6	15,1-17,6	232	0,3	89,0
17-19,75	252	0,3	105,6	17,6-20	251	0,3	103,6	17-19,75	247	0,3	100	17,6-20	244	0,3	98,0
20-22,15	225	0,3	83,6	20-22,4	259	0,3	111	20-22,15	265	0,3	116	20-22,4	256	0,3	108
22-24,55	288	0,499	136,9	22,4-24,8	237	0,499	92,7	22-24,55	274	0,499	124	22,4-24,8	290	0,499	139
24-26,95	281	0,499	130,2	24,8-27,3	219	0,499	79,0	24-26,95	245	0,499	99	24,8-27,3	278	0,499	128
27-29,35	249	0,499	102,4	27,3-29,7	219	0,499	79,5	27-29,35	254	0,499	107	27,3-29,7	277	0,499	127
29-31,75	190	0,499	59,8	29,7-32,1	194	0,499	62,1	29-31,75	213	0,499	75,1	29,7-32,1	227	0,499	85,1
32-34,15	207	0,499	70,9	32,1-34,5	195	0,499	62,6	32-34,15	251	0,499	104	32,1-34,5	238	0,499	93,9
34,15 +	Roc	---	---	34,5 +	Roc	---	---	34,15 +	Roc	---	---	34,5 +	Roc	---	---

## ANNEXE B

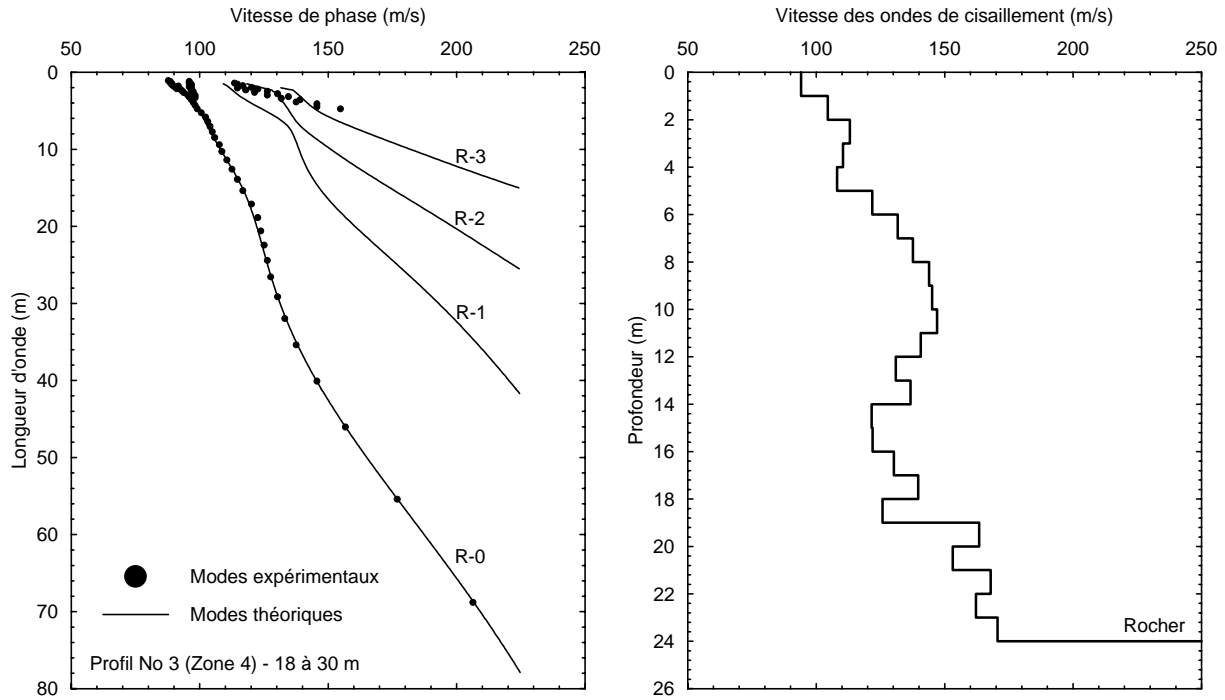
# RELATIONS DE DISPERSION ET PROFILS DE VITESSE DES ONDES DE CISAILLEMENT



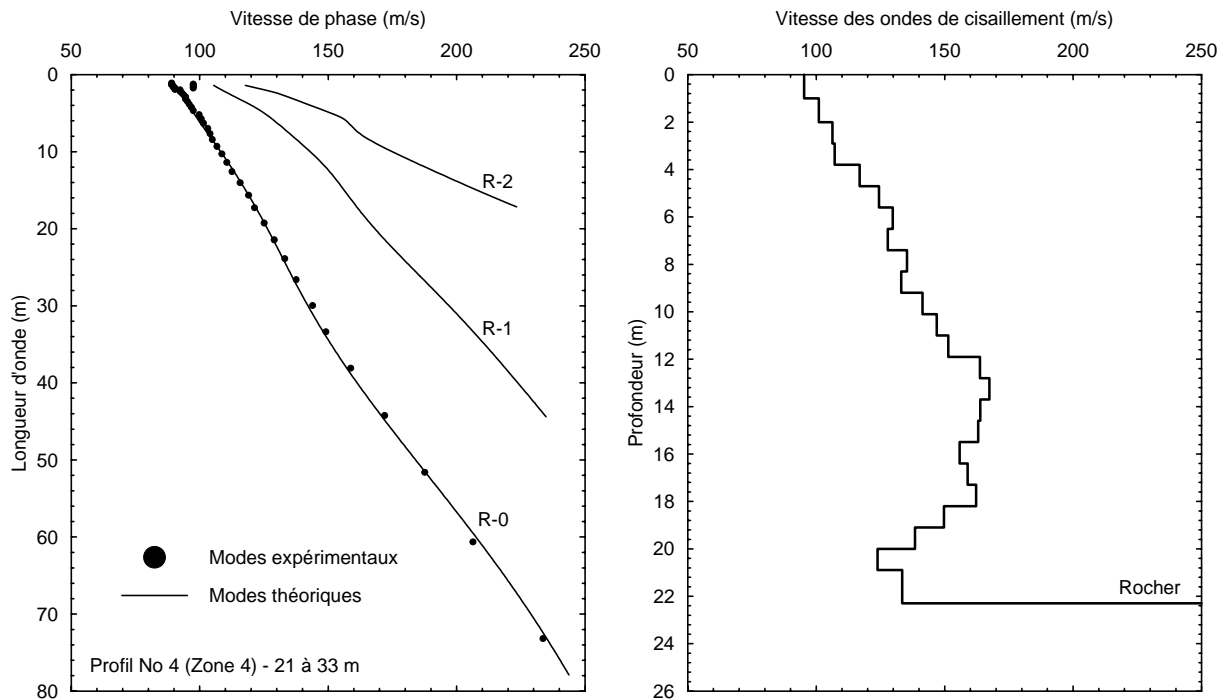
**Figure B-1** a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement – Zone 4 – profil 1 (12 à 24 m)



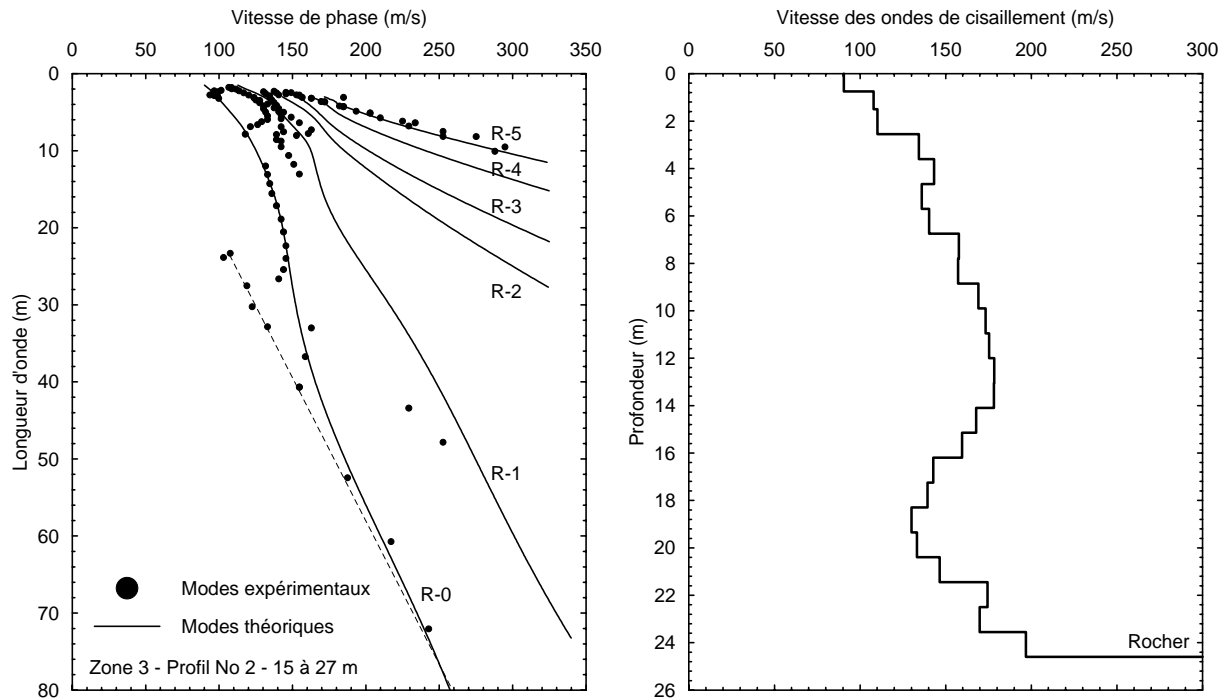
**Figure B-2** a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement – Zone 4 – profil 2 (15 à 27 m)



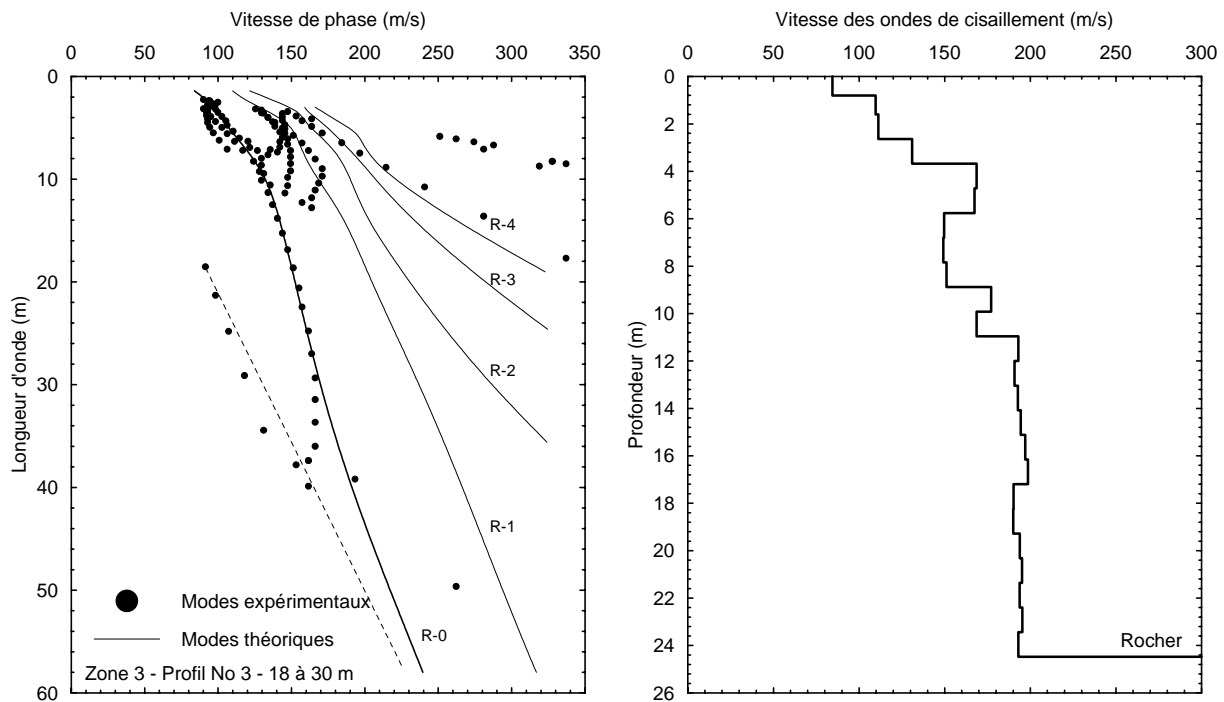
**Figure B-3** a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement – Zone 4 – profil 3 (18 à 30 m)



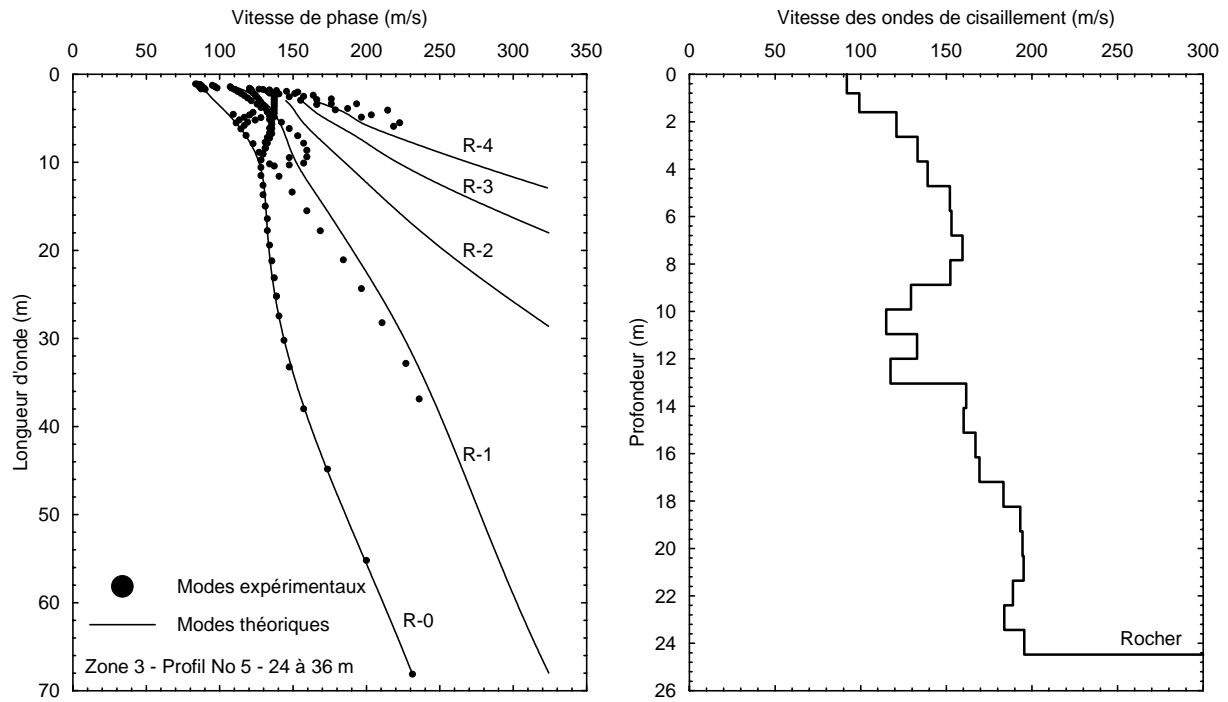
**Figure B-4** a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement – Zone 4 – profil 4 (21 à 33 m)



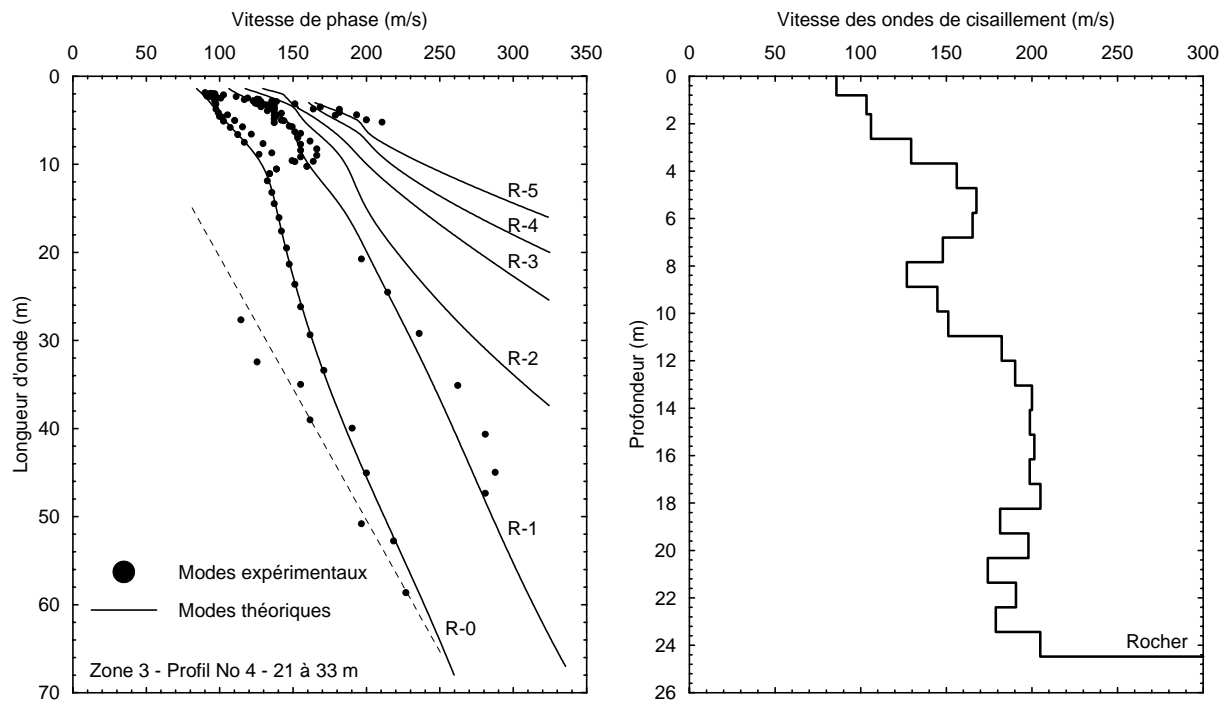
**Figure B-5** a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement – Zone 3 – profil 2 (15 à 27 m)



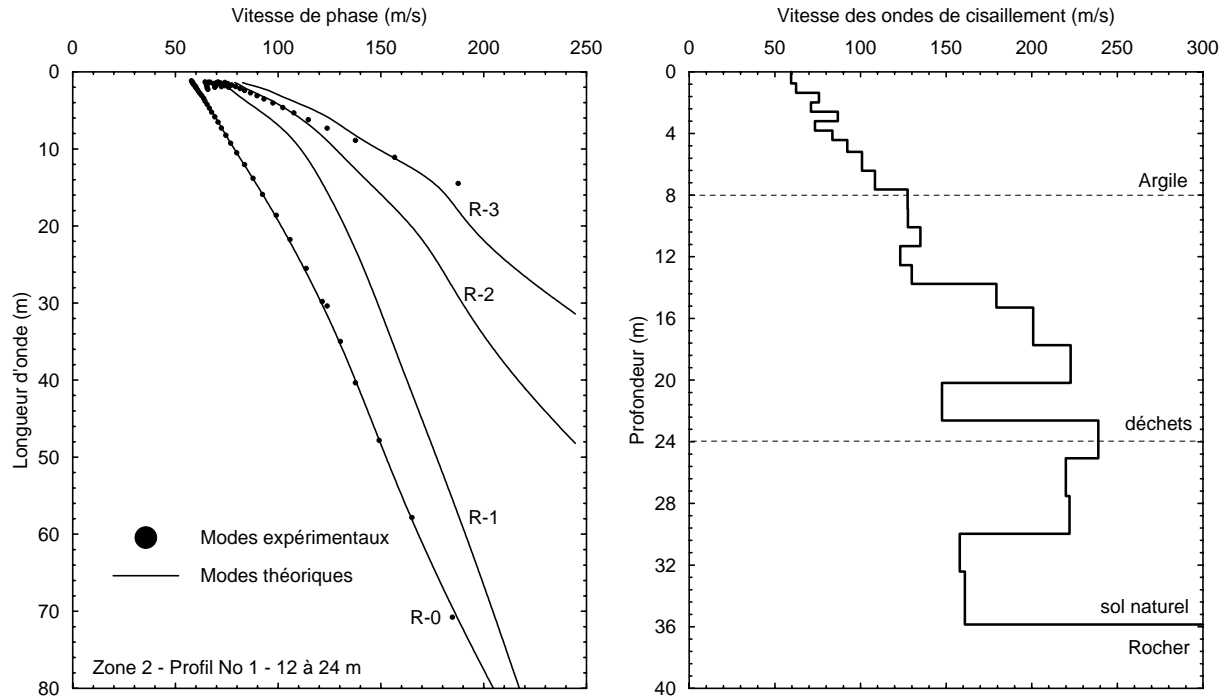
**Figure B-6** a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement – Zone 3 – profil 3 (18 à 30 m)



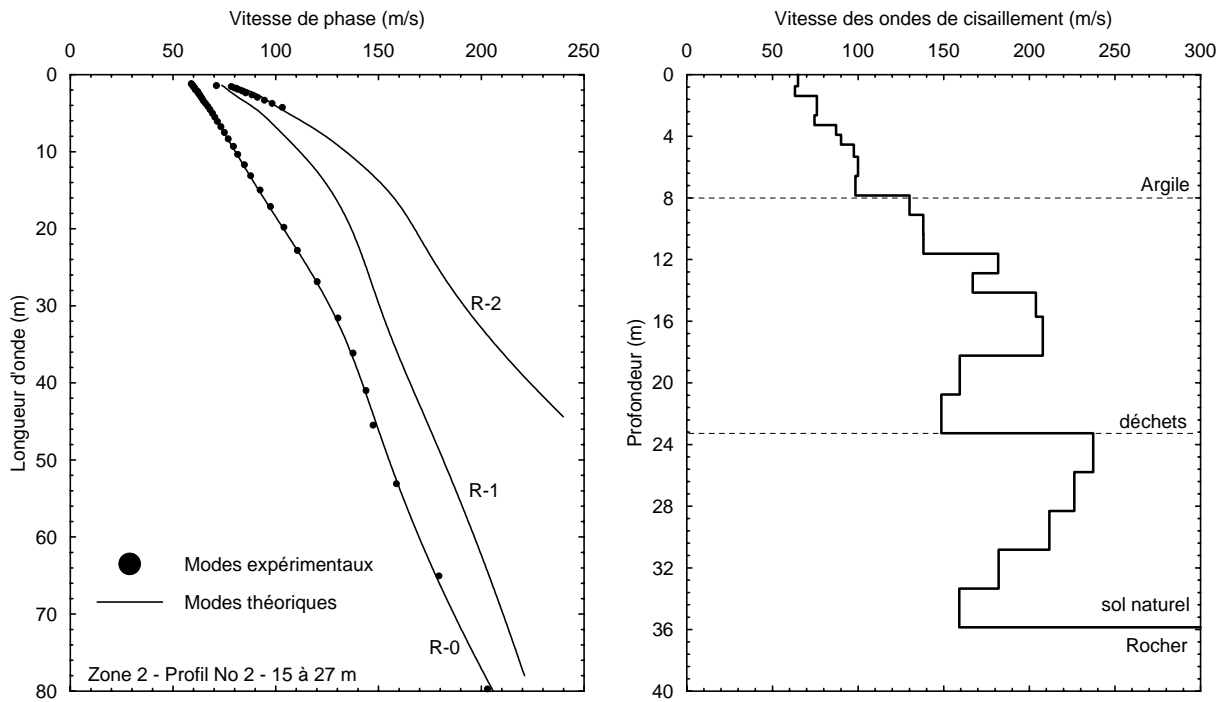
**Figure B-7** a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement – Zone 3 – profil 5 (24 à 36 m)



**Figure B-8** a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement – Zone 3 – profil 4 (21 à 33 m)

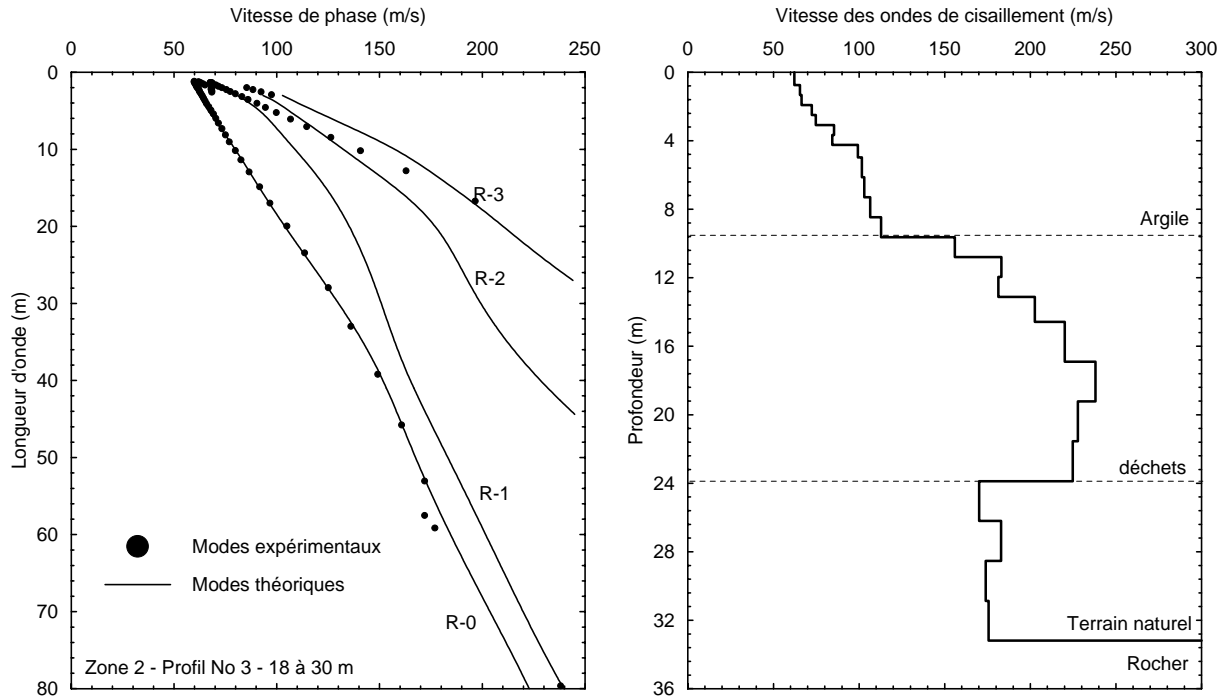


**Figure B-9** a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement – Zone 2 – profil 1 (12 à 24 m)

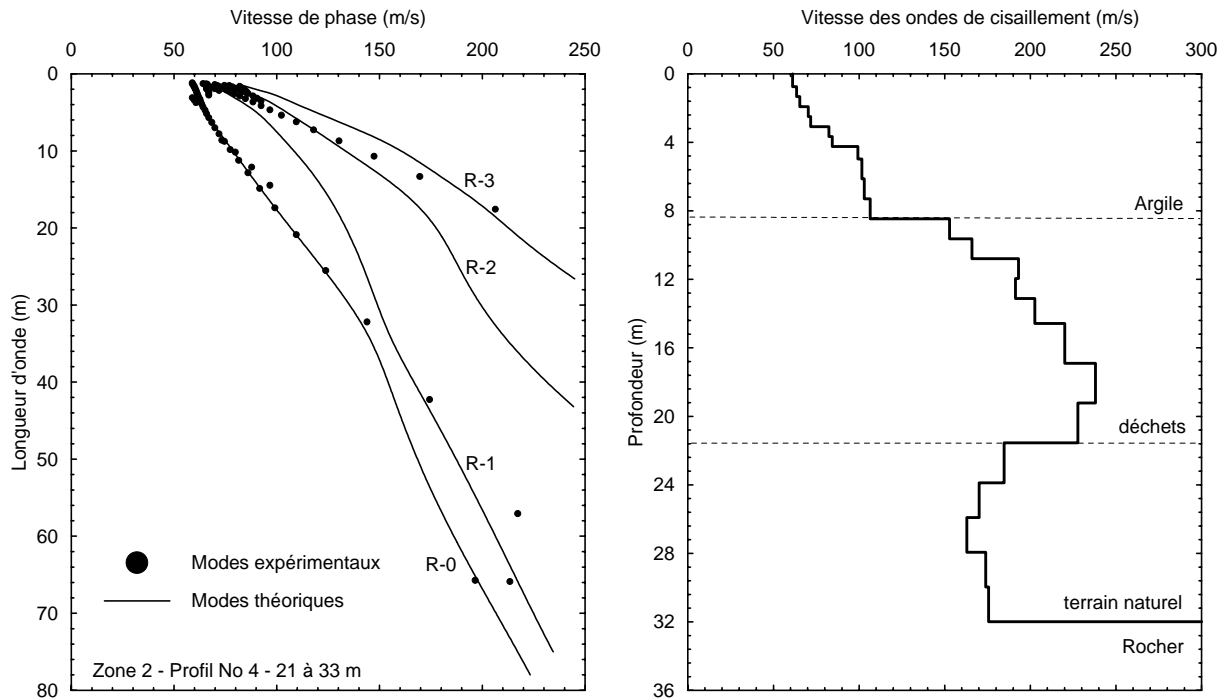


**Figure B-10** a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement – Zone 2 – profil 2 (15 à 27 m)

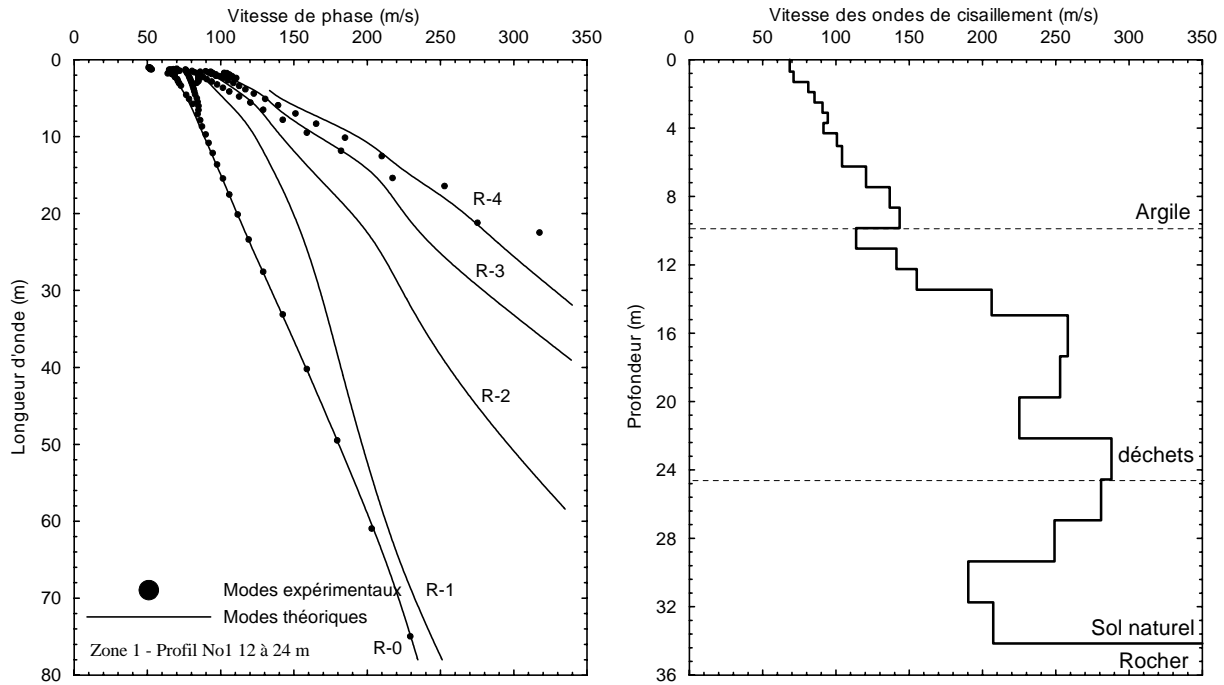




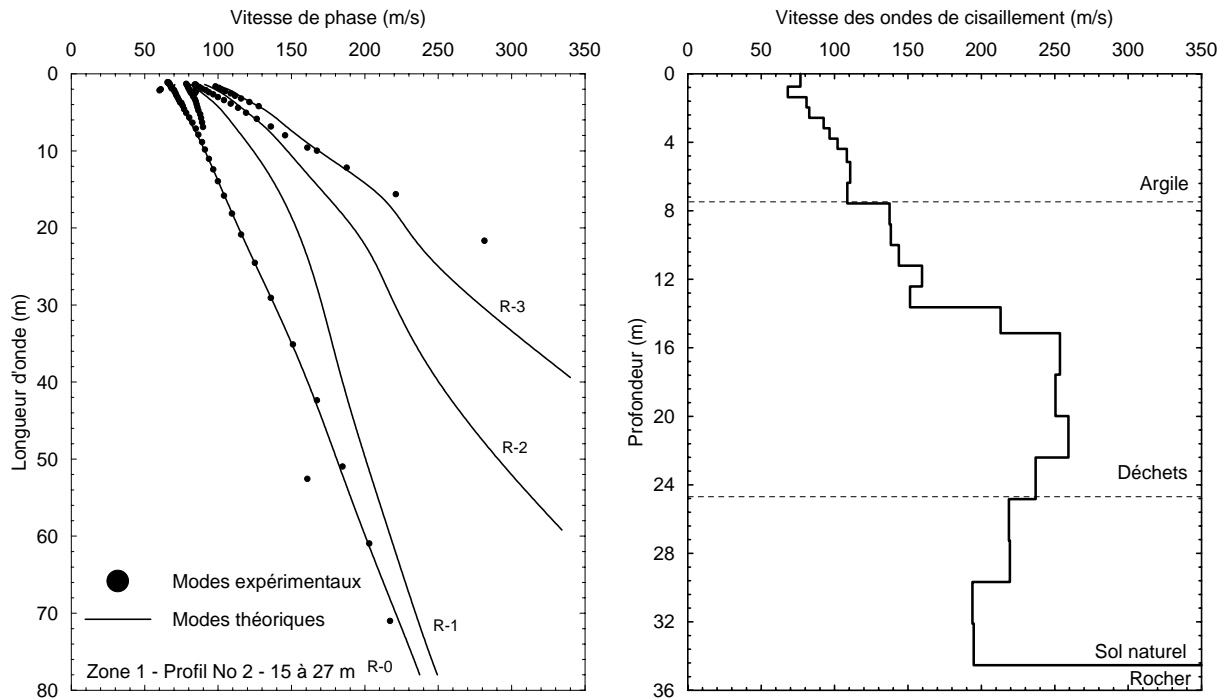
**Figure B-11** a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement – Zone 2 – profil 3 (18 à 30 m)



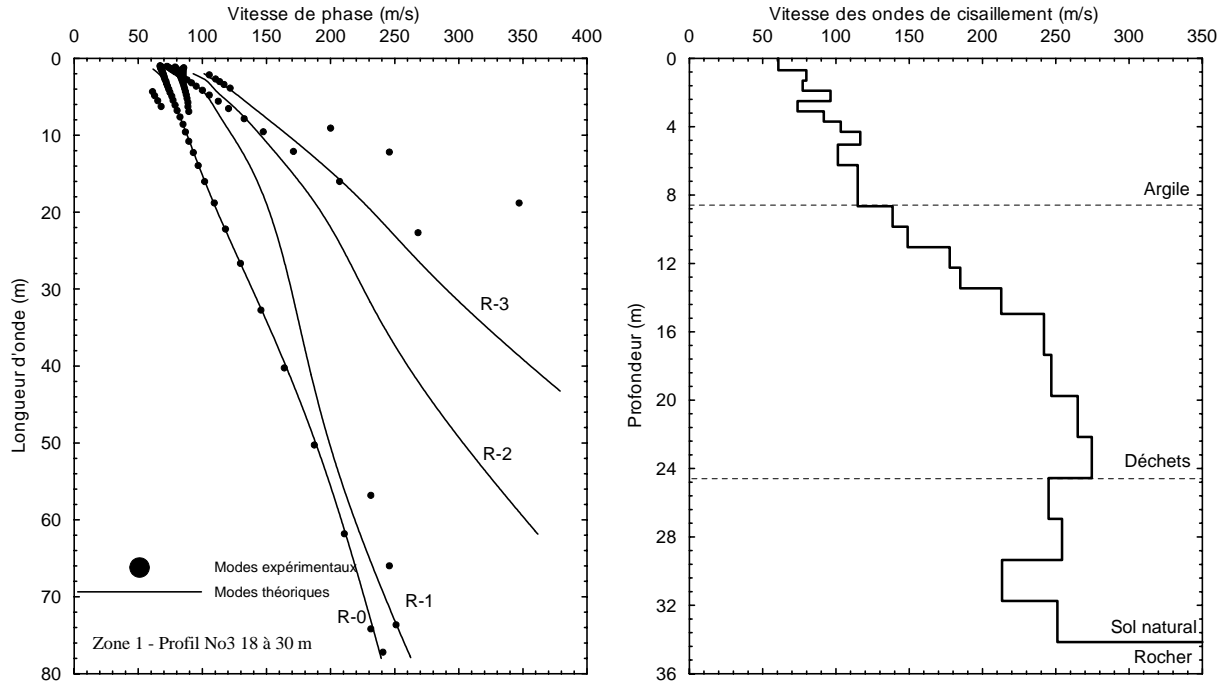
**Figure B-12** a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement – Zone 2 – profil 4 (21 à 33 m)



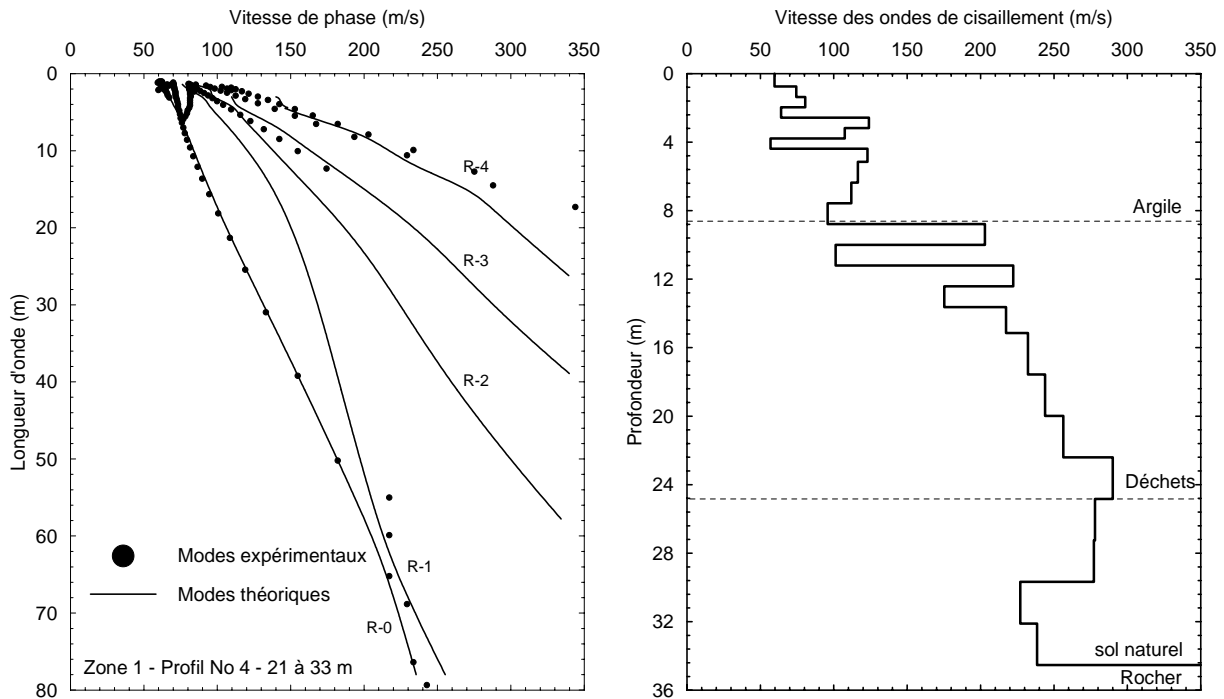
**Figure B-13** a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement – Zone 1 – profil 1 (12 à 24 m)



**Figure B-14** a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement – Zone 1 – profil 2 (15 à 27 m)



**Figure B-15** a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement – Zone 1 – profil 3 (18 à 30 m)



**Figure B-16** a) Comparaison des modes théoriques des ondes de Rayleigh aux modes expérimentaux b) Profil de vitesse des ondes de cisaillement – Zone 1 – profil 4 (21 à 33 m)

## ANNEXE C

# HISTORIQUE ET PROCÉDURE DE LA MÉTHODE MASW

Le développement de la méthode SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) dans les années 90 à l'Université du Texas (Nazarian, 1984; Stoköe et Nazarian, 1985) a constitué une étape importante dans l'utilisation des ondes de Rayleigh comme outil de caractérisation in-situ des matériaux (paramètres dynamiques et géotechniques). La méthode SASW consiste à mesurer, à l'aide de deux capteurs espacés d'une distance  $d$ , la vitesse de propagation des ondes de surface générée à l'aide d'une source d'impact placée à une distance  $d$  du premier capteur. La distance  $d$  est successivement augmentée en déplaçant les capteurs et la source jusqu'à obtenir une courbe de dispersion suffisante (relation de la vitesse de phase des ondes de surface en fonction de la longueur d'onde) pour caractériser les matériaux jusqu'à la profondeur voulue. Cette courbe de dispersion est ensuite transformée par un processus d'inversion en un profil de vitesse des ondes de cisaillement en fonction de la profondeur.

Dans la méthode SASW, la configuration de la source et des capteurs sur le terrain a pour objectif de minimiser la participation des modes supérieurs des ondes de Rayleigh. La méthode SASW admet, en effet, que la courbe de dispersion obtenue à partir des signaux enregistrés sur le terrain ne représente que le mode fondamental des ondes de Rayleigh. Il s'est cependant avéré, au cours des dernières années, que cette hypothèse est souvent non vérifiée et constitue un handicap sérieux pour la fiabilité et la précision de la méthode SASW (Karray et Lefebvre, 2000, Karray, 1999).

La méthode MASW (Modal Analysis of Surface Waves), développée à l'Université de Sherbrooke, se distingue de la méthode SASW d'abord, par le traitement des signaux obtenus sur le terrain afin d'identifier et de séparer les différents modes des ondes de Rayleigh qui ont contribué aux signaux enregistrés. La configuration de la source et des capteurs sur le terrain ne vise plus alors à minimiser la contribution des modes supérieurs des ondes de Rayleigh. Dans la méthode MASW, les signaux nécessaires pour définir la courbe de dispersion sont obtenus en une seule étape en disposant seize capteurs sur le terrain. C'est d'ailleurs cette configuration qui permet une approche plus efficace pour l'identification et la séparation des modes. Dans la méthode MASW, les courbes de dispersion sont obtenues non seulement pour le mode fondamental mais aussi pour un ou plusieurs modes supérieurs. L'utilisation d'au moins un mode supérieur en plus du mode fondamental, lors du processus d'inversion, permet d'assurer l'unicité

de la solution et de déterminer le profil du module de Poisson en plus du profil de vitesse des ondes de cisaillement. La méthode MASW permet également de déterminer le profil de vitesse des ondes de cisaillement en utilisant un espacement moindre entre le premier et le dernier capteur. Cette configuration permet aussi de réaliser une tomographie interne de vitesse ou de module des ondes de cisaillement à partir de la surface du sol en réalisant deux ou plusieurs essais MASW successifs en gardant la source au même endroit. En effet, la combinaison des seize signaux des différents essais permet de déterminer des profils de vitesse à différents emplacements par rapport à la source.

Rappelons enfin que la vitesse de propagation des ondes de cisaillement,  $V_s$ , est directement reliée à la compétence mécanique du matériau par :

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (1)$$

$G_{\max}$  est le module de cisaillement maximum ou à petites déformations;  $\rho$  est la masse volumique du matériau. La détermination du coefficient de Poisson en plus de  $V_s$  constitue une caractérisation complète du matériau d'un point de vue élasticité et permet de passer du module de cisaillement  $G$  au module de Young  $E$ , mais toujours à petites déformations :

$$E = 2(1 + \nu)G \quad (2)$$