

Détection de failles par méthodes sismiques lors du creusement des tunnels

Benoît CELSE
Ingénieur d'étude

Bernard VAYSSADE
Maître de conférence

Jean-Pierre HENRY
Professeur
École des Mines d'Alès

Philippe CÔTE
Directeur de recherche

Odile ABRAHAM
Ingénieur des Travaux publics de l'État
Laboratoire central des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes

Bogdan PIWAKOWSKI
Professeur
École centrale de Lille

RÉSUMÉ

L'objectif de cet article est de présenter une nouvelle méthode de reconnaissance à l'avancement. Le but est la caractérisation tridimensionnelle du massif en avant du front de taille par méthodes sismiques. La tomographie réflexion a été choisie car elle permet d'obtenir, « en temps réel » une et avec une bonne résolution, une cartographie des vitesses des ondes dans le massif. Elle impose cependant la détection des ondes réfléchies. Une première étude des caractéristiques géométriques et acoustiques du massif a permis de déterminer les caractéristiques des failles les plus facilement détectables, de caractériser les ondes réfléchies et de mettre au point un algorithme d'optimisation du dispositif. Une stratégie de traitement du signal a ensuite été proposée pour détecter les ondes réfléchies. Les temps d'arrivée des ondes directes et réfléchies ont alors été utilisés dans un algorithme d'inversion : la tomographie réflexion permettant de caractériser finement le massif en avant d'un front de taille. Deux études expérimentales montrant l'efficacité de la méthode choisie sont alors proposées.

MOTS CLÉS : 54 - Tunnel - Excavation - Front de taille - Faille - Onde - Vitesse - Détection sismique - Réflectivité - Méthode - Reconnaissance (prospect.).

Introduction

Le besoin de développer les reconnaissances à l'avancement dans la construction des ouvrages souterrains se fait particulièrement, mais non exclusivement, sentir pour le creusement dans les terrains difficiles pour lesquels de nouvelles techniques mécanisées sont mises en œuvre. Si les reconnaissances initiales sont indispensables, elles ne peuvent être aussi complètes et précises qu'une étude à très haute résolution effectuée à l'avancement. Celle-ci permet d'améliorer la conduite du chantier, en localisant à l'avance les hétérogénéités géologiques, et en adaptant les outils de creusement et les caractéristiques du soutènement à la nature et aux propriétés réelles du terrain rencontré. Les reconnaissances à l'avancement contribuent ainsi à diminuer les risques liés aux travaux souterrains, en évitant les accidents de travail (Saini et *al.*, 1989) et les incidents de chantier qui introduisent des interruptions coûteuses (Tunnels et ouvrages souterrains, 1992).

Il existe actuellement plusieurs méthodes permettant de reconnaître les terrains sur quelques dizaines de mètres en avant du front de taille. Le cylindre électrique (Européenne de Géophysique, 1994) mesure les résistivités des roches autour d'un seul forage. Cette méthode est efficace mais ne permet pas de donner des indications en azimut. Le radar géologique (Nord et *al.*, 1989) détermine les propriétés diélectriques du massif et les indications obtenues sont très précises. Cependant, les matériaux conducteurs tel l'argile absorbent l'onde électromagnétique et rendent l'interprétation des mesures délicate. Les méthodes sismiques de reconnaissance à l'avancement (Hasegawa et

al., 1993) ont un pouvoir de résolution plus limité mais présentent moins d'aléas.

La méthode choisie est semblable à celle proposée par Sattel (Sattel et al., 1992). Des sources sont positionnées sur le front de taille et le parement, une flûte d'hydrophones est insérée dans un forage creusé en avant du front de taille (fig. 1).

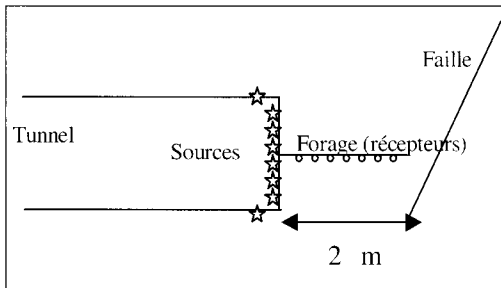


Fig. 1 - Dispositif proposé.

À l'heure actuelle, plusieurs méthodes de caractérisation du massif existent (Plessix, 1996 ; Hasegawa et al., 1993). La tomographie réflexion a été préférée à la tomographie transmission car elle présente deux avantages majeurs (Mari et al., 1998) :

- le champ d'investigation de la tomographie transmission est un cône centré sur le front de taille et dont le forage est une génératrice. Il est beaucoup plus réduit que celui de la tomographie réflexion ;
- l'image reconstruite dans le cadre de la tomographie par transmission est fortement dépendante de la direction des angles d'arrivée des rayons. Les variations d'ouverture d'angle et/ou la présence d'anisotropie peuvent produire des images présentant de fortes distorsions. Pour une tomographie réflexion, l'ouverture angulaire étant élevée, la résolution doit être améliorée.

L'objectif étant une caractérisation tridimensionnelle du massif, nous avons choisi d'utiliser une méthode géométrique similaire à celle proposée par Dyer et al., (1988) avec plusieurs améliorations notables :

- le massif n'est plus décomposé en une succession de couches pseudo-horizontales (seulement valable dans des milieux sédimentaires) mais il est maillé (la maille est métrique). Ceci permet de caractériser des modèles de vitesse hétérogène ;
- la reconstruction est tridimensionnelle ;
- la solution obtenue est régularisée à chaque itération afin de prendre en compte les contraintes physiques.

Par ailleurs, pour améliorer les temps de calculs et limiter les stockages mémoires, une méthode géométrique similaire à celle proposée par Côte (Côte, 1988) a été retenue.

Les résultats fournis permettent, d'une part, de localiser précisément les hétérogénéités majeures (failles, etc.) et, d'autre part, de décrire le champ de vitesse dont

on pourra déduire les paramètres mécaniques du massif.

Cependant, pour être utilisée, cette méthode impose la détection des ondes réfléchies sur les principales hétérogénéités et fait donc appel à des méthodes de traitement du signal élaborées. L'objectif de cet article est de proposer une méthode d'analyse des signaux permettant de prendre en compte les fortes contraintes temporelles (les résultats doivent être fournis en temps réel ou presque) et de fiabiliser la reconnaissance. Une première étude de sensibilité de paramètres permettra de déterminer la nature des ondes réfléchies. Une optimisation du dispositif d'acquisition sera ensuite proposée. Enfin une méthodologie de caractérisation du massif sera explicitée et illustrée sur des exemples expérimentaux.

Étude des ondes réfléchies

Variation du coefficient de réflexion

Dans le cas d'une faille sans déplacement de grande puissance, les équations de Zoeppritz (Zoeppritz, 1919) permettent de calculer le coefficient de réflexion. Un logiciel a alors été implanté pour résoudre le système linéaire correspondant (Celse, 1999a).

Les figures 2 et 3 présentent un exemple des variations de la valeur absolue du coefficient de réflexion en fonction de l'angle d'incidence (Celse, 1999b). La vitesse des ondes de compression est $V_i = 3\ 000$ m/s dans le milieu incident et $V_r = 2\ 000$ m/s dans le milieu réfléchissant (fig. 2), le cas symétrique ($V_i = 2\ 000$ m/s, $V_r = 3\ 000$ m/s) est présenté sur la figure 3. Le coefficient de Poisson est égal à 0,25 et la densité a été estimée par Gardner et al., 1974 :

$$\rho = 0,31 \times v^{0,25}$$

avec

ρ : densité (g/cm^3),

V : vitesse des ondes de compression (m/s).

L'ouverture de l'angle d'incidence favorise la création d'ondes de cisaillement qui introduiront des signaux

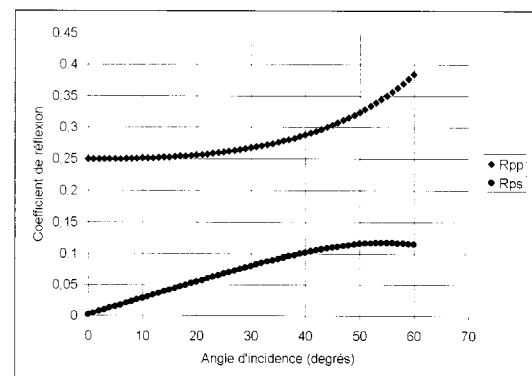


Fig. 2 - Configuration 1 ($V_i = 3\ 000$ m/s ; $v_r = 2\ 000$ m/s).

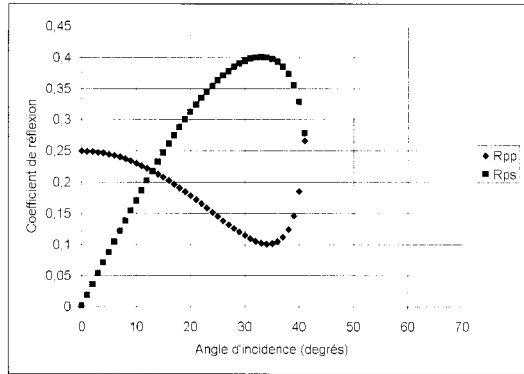


Fig. 3 - Configuration 2 ($V_i = 2\,000\text{ m/s}$; $v_r = 3\,000\text{ m/s}$).

Avec : R_{pp} valeur absolue du coefficient de réflexion pour les ondes PP,
 R_{ps} valeur absolue du coefficient de réflexion pour les ondes PS.

parasites sur les enregistrements (fig. 2 et 3). De manière globale, et si la nature du milieu réfléchissant est inconnue, un angle d'incidence minimal sur la faille est garant d'une réflexion suffisamment énergétique et de la diminution de signaux parasites.

Variation des attributs

Pour réaliser une étude de sensibilité de paramètres, le logiciel Axitra, développé par O. Coutant au sein du LGIT (Bouchon, 1981), a été choisi. Dans l'exemple proposé (Celse, 1999b), un milieu tri-couche est utilisé (fig. 4). La faille est de puissance : 1 m, de pendage 90 degrés et est localisée à 20 m du front de taille. Les milieux (1) et (3) correspondent à l'encaissant, le milieu (2) au remplissage. Les paramètres acoustiques dans chaque milieu sont (Q_i correspond au facteur d'atténuation dans la couche i) :

- > $V_{p1} = 3\,000\text{ m/s}$, $V_{s1} = 1\,700\text{ m/s}$, $\rho_1 = 2\text{ g/cm}^3$, $Q_1 = 80$,
- > $V_{p2} = 2\,500\text{ m/s}$, $V_{s2} = 1\,500\text{ m/s}$, $\rho_2 = 2\text{ g/cm}^3$, $Q_2 = 50$,
- > $V_{p3} = 4\,000\text{ m/s}$, $V_{s3} = 2\,300\text{ m/s}$, $\rho_3 = 2,2\text{ g/cm}^3$, $Q_3 = 100$.

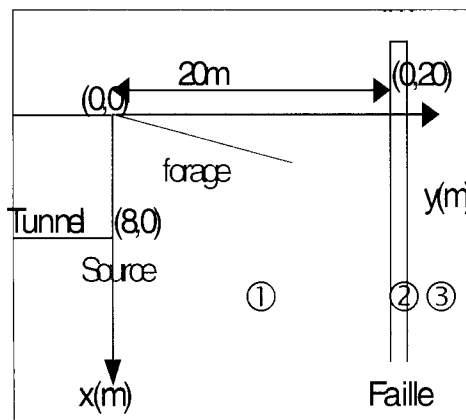


Fig. 4 - Modèle retenu.

L'ondelette source utilisée est un Ricker. Vingt accéléromètres ont été utilisés et sont disposés régulièrement à partir du point de coordonnées (0;9) (fig. 4). Le forage est de pendage 10 degrés. La source est placée sur le front de taille en (10;0) (fig. 4). La fréquence d'échantillonnage est de : $\Delta f = 50\text{ kHz}$, et le pas d'échantillonnage entre capteurs est de $\Delta d = 0,1\text{ m}$ (fig. 4).

La figure 5 présente le signal temporel obtenu avec la configuration choisie : les ondes réfléchies sont de faible amplitude mais leur vitesse apparente est de signe opposé à celui des ondes directes.

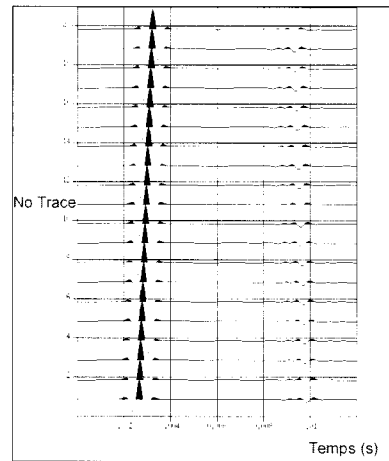


Fig. 5 - Signal enregistré ($f_d = 1\,000\text{ Hz}$).

Une analyse temps-fréquence du signal étudié est alors proposée sur la figure 6. L'information apportée par cette présentation est très riche. On détermine clairement sur la figure :

- > le temps d'arrivée des ondes directes : $t = 0,003\text{ s}$. Elles sont de fréquence dominante : $2\,800\text{ Hz}$ (point A, fig. 6).
- > le temps d'arrivée des ondes réfléchies est $0,011\text{ s}$ et le spectre des deux réflexions est composé de deux parties : un pic de basse fréquence : $2\,200\text{ Hz}$ (point B, fig. 6) et un pic de haute fréquence : $3\,200\text{ Hz}$ (point C, fig. 6).

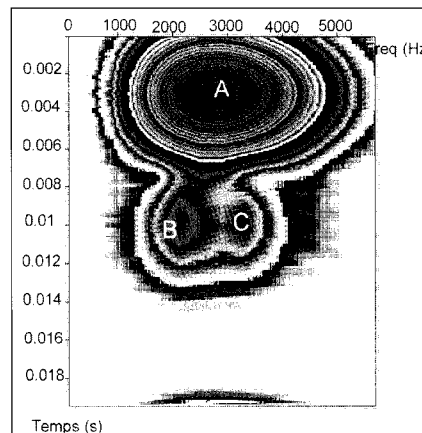


Fig. 6 - Analyse temps-fréquence.

Il est important de noter que la fenêtre spectrale des ondes réfléchies est incluse dans la fenêtre spectrale des ondes directes : un simple filtre fréquentiel ne permettra pas de séparer ces deux ondes. L'attribut sismique le plus sensible aux ondes réfléchies reste donc la vitesse apparente. Un filtre FK (Glangeaud et *al.*, 1991) devrait être efficace pour séparer les différentes ondes volumiques. En effet, cette opération, qui utilise une double transformée de Fourier en temps et en espace, projette les ondes de vitesse apparente positive (respectivement négative) dans le demi-plan $k > 0$ (respectivement $k < 0$). En outre, la fréquence dominante des ondes réfléchies étant semblable à celle des ondes directes, elle est supérieure à celle des ondes d'interface (Celse, 1999a) et un filtre passe-haut permettra de réduire ces ondes parasites tout en gardant l'information primordiale (i.e. l'onde réfléchie).

Étude du dispositif optimal

Étude de la fréquence optimale

Le pouvoir de résolution est donné par la surface de Fresnel : deux points se trouvant dans cette zone sont considérés comme inséparables. Aki et *al.* (1995) ont montré que la largeur de la zone de Fresnel est donnée par :

$$Z_f = \sqrt{\left(\frac{ZV}{2f}\right)}$$

avec

V : vitesse dans le massif,

f : fréquence,

Z : distance de la source à l'objet,

Z_f : largeur de la zone de Fresnel.

Le pouvoir de résolution croît donc avec la fréquence de source choisie. Cependant, l'atténuation visco-élastique est proportionnelle à la fréquence choisie. Un compromis doit donc être trouvé entre le champ d'investigation (qui est inversement proportionnel à la fréquence des sources) et le pouvoir de résolution désiré.

Pour déterminer précisément la fréquence dominante optimale, trois simulations avec le dispositif précédent vont être présentées mais avec trois fréquences de sources différentes : $f_d = 2$ kHz, $f_d = 1$ kHz et $f_d = 0.5$ kHz (fig. 7 à 9).

La figure 7 montre qu'une fréquence dominante de l'ordre de 2 kHz doit être utilisée pour déterminer précisément la puissance de la faille : les deux réflexions sur chacune de ses interfaces sont visibles (elles sont notées PP1 et PP2 sur la figure 7). La figure 9 montre qu'avec la configuration choisie, une fréquence dominante de 500 Hz permet d'augmenter l'amplitude de l'onde réfléchie et donc de faciliter sa détection. On assiste à l'effet du Tuning (Widess, 1973) c'est à dire qu'il y a interférence constructive entre les réflexions engendrées sur les premières et secondes interfaces (la réflexion résultante est notée PP sur la figure 9). En revanche, la puissance de la faille ne peut pas être esti-

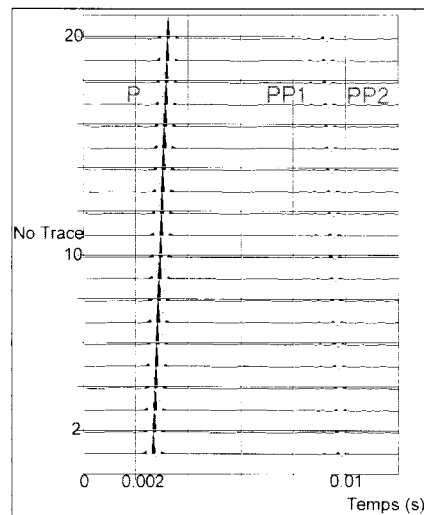


Fig. 7 - Signaux correspondants à une fréquence dominante de 2 kHz.

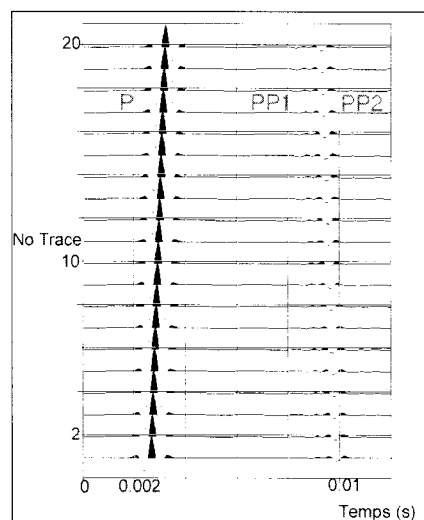


Fig. 8 - Signaux correspondants à une fréquence dominante de 1 kHz.

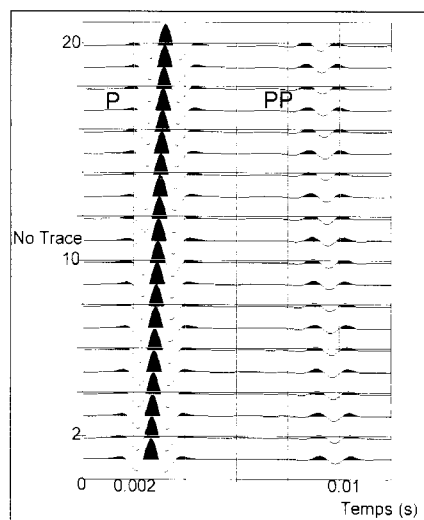


Fig. 9 - Signaux correspondants à une fréquence dominante de 500 Hz.

mée. Une fréquence dominante de 1 kHz permet de réaliser un bon compromis : les deux réflexions (notées PP1 et PP2 sur la figure 8) sont suffisamment énergétiques et la puissance de la faille peut être estimée.

De manière plus quantitative et pour les configurations choisies, le rapport des amplitudes des ondes transmises et réfléchies (calculé à partir des simulations) est présenté dans le tableau I suivant :

TABLEAU I
Différence d'amplitudes

λ	$A_i/A_{1,2}$	$A_i/A_{2,3}$
2 kHz	8,23	6,36
1 kHz	6,875	6,875
500 Hz	3,6	?

A_i : amplitude de l'onde incidente,
 $A_{1,2}$: amplitude de l'onde réfléchie sur l'interface 1,
 $A_{2,3}$: amplitude de l'onde réfléchie l'interface 2.

En conclusion, si l'objectif de l'étude est la détection de l'hétérogénéité sans volonté d'estimer sa puissance et pour des vitesses sismiques de l'ordre de celles présentées dans ces simulations, une fréquence dominante de l'ordre de 500 Hz devra être choisie. Par contre, si la campagne géophysique est menée dans le but d'estimer une puissance de faille (ou de filon dans l'industrie minière) et pour des vitesses sismiques semblables à celles présentées dans cette étude, une fréquence dominante de l'ordre de 2 kHz devra être choisie.

Étude de la géométrie d'acquisition

Premières constatations

L'étude spectrale précédente a montré que les fréquences dominantes des ondes directes et réfléchies étaient voisines (fig. 6). Les phases sont difficilement exploitables dans le cas de signaux bruités (Celse, 1999 a), l'attribut sismique le plus sensible est donc le signe de la vitesse apparente. Les dispositifs expérimentaux doivent tenir compte de ce critère qui permettra de s'assurer que l'onde détectée n'est pas un artefact du filtre.

L'analyse des signaux sismiques s'effectue en utilisant deux types de regroupement :

- un regroupement par source commune : l'ensemble des signaux émis par une même source sont analysés simultanément,
- un regroupement par récepteur commun : l'ensemble des signaux enregistrés par un même récepteur sont analysés simultanément.

Les regroupements doivent donc être choisis de manière à ce que les ondes directes et réfléchies aient des vitesses apparentes de signe opposé :

- si l'objectif est la reconnaissance d'une hétérogénéité en avant du front de faille, un regroupement par

source commune (placée sur le front de faille) doit être utilisé (fig. 10),

- si l'objectif est la détection du toit ou du mur d'une couche, un regroupement par récepteur doit être utilisé (fig. 11).

Par ailleurs, la présence d'ondes d'interface parasites (ondes de tube, etc.) est un handicap souvent insurmontable. Elles sont en effet très énergétiques et espérer les séparer est souvent illusoire notamment à cause des fortes contraintes de délai. Dans le meilleur des cas, les ondes réfléchies seront visibles mais les résidus de filtrage introduiront des parasites sur les temps d'arrivée des ondes. Dans le cadre de ce projet, nous avons donc considéré que les ondes réfléchies ne pouvaient être détectées que dans deux cas de figure :

1. l'hétérogénéité est très proche du front de faille et l'onde réfléchie « arrive » avant l'onde de tube du moins sur un nombre conséquent d'hydrophones. L'objectif est alors de séparer les ondes P, S et PP ;
2. l'hétérogénéité est plus éloignée et l'objectif est alors l'extraction de l'onde réfléchie dans un signal très bruité.

La stratégie choisie est donc d'effectuer un fenêtrage temporel avant et après les ondes d'interface et d'appliquer les techniques de traitement du signal pour détecter d'éventuelles ondes réfléchies dans chacune des fenêtres temporelles.

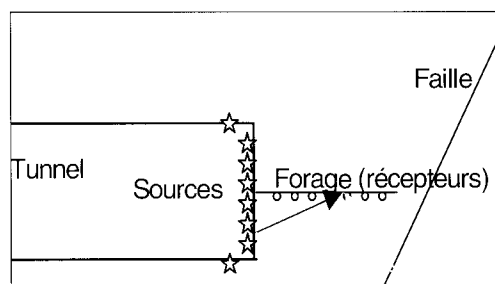


Fig. 10 - Regroupement des signaux par source commune.

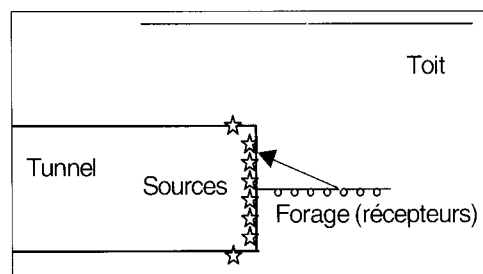


Fig. 11 - Regroupements des signaux par récepteur commun.

Modélisation du problème

Pour modéliser le problème, nous avons choisi de définir une fonction objectif correspondant à une combinaison linéaire des trois critères définis précédemment. Pour une vitesse de compression des ondes directes de l'ordre de 3 000 m/s, des études expérimentales (Celse,

1999 a) ont permis d'estimer la fenêtre temporelle d'arrivée des ondes parasites à 0,005 s. Un écart entre les temps d'arrivée des ondes parasites et des ondes PP inférieur à 0,005 s est donc éliminatoire. Cette durée correspond à la longueur du train d'ondes des ondes d'interface et dépend de la nature du massif.

Les critères précédents sont formalisés de la manière suivante :

➤ C_1 : angle d'incidence moyen sur la faille. Si l'angle est inférieur à 20 degrés, le critère est nul. Des simulations ont en effet montré qu'un angle d'incidence inférieur à 20 degrés était suffisant pour détecter l'onde réfléchie (Celse, 1999 a) ;

➤ C_2 : nombre de cellules parcourues par moins de dix rayons. Ce critère permet d'élargir le champ d'investigation et donc la répartition angulaire ;

➤ C_3 : nombre de rayons pour lesquels la différence des temps d'arrivée des ondes réfléchies et des ondes de tube est inférieure à 0,005 s (si les ondes d'interface précèdent les ondes réfléchies).

La forme mathématique de chacun des critères est la suivante :

$$C_1 = \sum_{\text{nbrayons}} [(R_i S_i, R_i Q_i) - 20]^+$$

$$C_2 = \sum_{i=1}^{\text{nbcellules}} H[10 - N_{\text{rayon}}(i)]^+$$

$$C_3 = \sum_{i=1}^{\text{nbrayons}} H[(0,005 - |T_{\text{réf}}(i) - T_{\text{surf}}(i)|)^+] \times H[T_{\text{réf}}(i) - T_{\text{surf}}(i)]$$

avec

- R_i : point de réflexion i ,
- S_i : source i ,
- Q_i : récepteur i ,
- $N_{\text{rayon}}(i)$: nombre de rayons traversant la cellule i ,
- $T_{\text{réf}}(i)$: temps de propagation de l'onde réfléchie correspondant au $i^{\text{ème}}$ couple source-récepteur,
- $T_{\text{surf}}(i)$: temps de propagation de l'onde de surface correspondant au $i^{\text{ème}}$ couple source-récepteur,
- H : fonction de Heaviside ($H(x) = 1$ si $x > 0$, 0 sinon),
- $()^+$: fonction telle que $(x)^+ = x$ si $x > 0$, 0 sinon.

La fonction objectif que nous avons choisie est une combinaison linéaire de chacun des critères (après normalisation) :

$$J(\alpha, \beta, S_1 \dots S_n) = \alpha_1 C_1 / C_{01} + \alpha_2 C_2 / C_{02} + \alpha_3 C_3 / C_{03}$$

avec

- J : fonction objectif,
- α : orientation du forage,
- β : pendage du forage,

- S_i : position de la $i^{\text{ème}}$ source,
- C_{0i} : valeur du critère i à la première itération (permet de rendre le critère adimensionnel),
- C_i : valeur du critère i ,
- α_i : coefficient pondérateur du critère C_i .

Cette fonction étant non convexe et non différentiable, nous avons développé le logiciel **Optimis** permettant de la minimiser à l'aide de la méthode du recuit simulé (Celse et al. 1999a).

Simulation numérique

Pour montrer l'efficacité du logiciel, des simulations en utilisant simultanément les trois critères vont être présentées (Celse 1999 b).

Une configuration classique a été retenue : le forage est de longueur 15 m dans l'axe du tunnel. Vingt sources sont réparties le long du front de taille et trente hydrophones sont insérés dans une flûte avec un pas d'espacement régulier de 50 cm. Le réflecteur est vertical, il est situé à une distance de 25 m du front de taille, le tunnel est de diamètre 8 m (fig. 12).

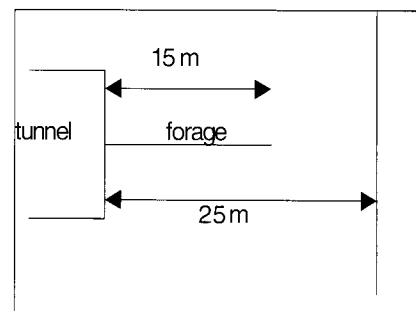


Fig. 12 - Configuration retenue.

L'objectif du test est de déterminer la position optimale des sources et du forage. Pour faciliter l'optimisation, le forage est exécuté à partir du centre du tunnel, initialement, il est choisi horizontal. La figure 13 présente le champ d'investigation initial. Il est centré autour du forage et on peut observer des zones sur-illuminées (i.e. elles sont parcourues par un grand nombre de rayons) tandis que d'autres sont sous-illuminées. Après optimisation, le forage est oblique, de pendage 23 degrés (fig. 14). Le champ d'investigation est beaucoup plus étendu qu'initialement (fig. 13), la répartition des rais est beaucoup plus homogène.

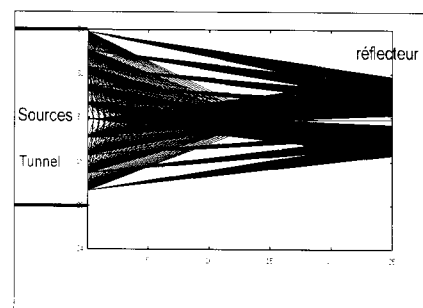


Fig. 13 - Résultats après optimisation.

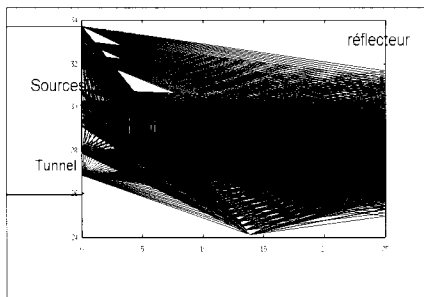


Fig. 14 - Résultats après optimisation. Configuration et résultats de l'optimisation de la géométrie d'acquisition.

Étude expérimentale

Pour tester les différentes méthodes de séparation d'ondes (dans les deux cas cités ci-dessus), une expérimentation a été effectuée dans une mine de calcaire asphaltique. Dans ces expérimentations, les contraintes techniques ne nous ont pas permis de remplir les forages. Nous avons donc utilisé des galeries en tant que forages et fronts de taille fictifs. Les dispositifs choisis sont donc différents de celui présenté en introduction (fig. 1) : le forage fictif n'est pas concentrique à l'équivalent du tunnel. Il permet cependant de réaliser une étude de faisabilité de la méthode proposée.

Le site Calpha (fig. 15) est situé dans la mine SFA (Société française des asphaltes) localisée à Saint-Jean-de-Maruejols (Gard). Le site est situé à une profondeur de 150 m à proximité d'une faille, dite faille de Rebésou, (d'orientation N 28 degrés et de pendage 83 degrés W) séparant deux milieux d'impédances acoustiques différentes :

- un calcaire asphaltique : $V_p = 3\,500$ m/s, $\rho = 2,1$ g/cm³,
- un calcaire à grains fins : $V_p = 4\,000$ m/s, $\rho = 2,4$ g/cm³.

Pour valider les réflexions théoriques précédentes, deux sites expérimentaux ont été retenus :

- ❶ Calpha1 : situé à proximité immédiate de la faille (une dizaine de mètres). Ce site a été choisi car les ondes PP précèdent les ondes d'interface. L'objectif est alors d'extraire les ondes PP interférant avec les ondes P et S ;
- ❷ Calpha2 : situé à plus grande distance de la faille (une quarantaine de mètres). Ce site a été choisi car les ondes d'interface précèdent les ondes PP. L'objectif est alors l'extraction d'une onde PP dans un signal composé de bruit très énergétique mais peu cohérent.

Prise de mesures

Les enregistrements ont été effectués avec un sismographe de type « Strata-View ». La fréquence d'échantillonnage a été fixée à 30 kHz. Le signal est émis à l'aide d'une massette, la fréquence dominante est de l'ordre de 500 Hz pour les ondes de surface et 1 kHz

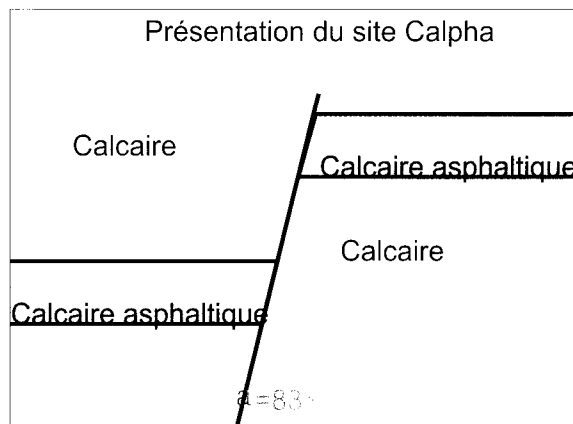


Fig. 15 - Présentation du site Calpha (coupe verticale).

pour les ondes volumiques directes. La fenêtre spectrale globale est comprise entre 200 et 3 000 Hz.

Dans les deux expérimentations, les signaux enregistrés sont de qualité médiocre : le rapport signal sur bruit est faible. Ils reflètent cependant la réalité : les signaux enregistrés dans des « vrais » chantiers seront de qualité semblable.

Étude du site Calpha1

Le site Calpha1 est situé à proximité immédiate de la faille de Rebésou (fig. 16). Les deux galeries ont un diamètre moyen de 4 m. Les sources sont placées le long de la galerie principale (équivalent au front de taille) avec un pas d'espacement moyen de 1 m. La source la plus éloignée (S_{16}) est située à 12 m de l'intersection des deux galeries, la plus proche (S_{2bis}) à 1 m. La galerie auxiliaire (équivalente au forage) permet d'accéder à la faille. Les quatorze accéléromètres sont placés le long de cette galerie avec un pas d'espacement de 20 cm. L'accéléromètre le plus proche (a_{14} , trace 15) est situé à 30 cm de la faille, le plus éloigné (a_1 , trace 2) est à 3 mètres.

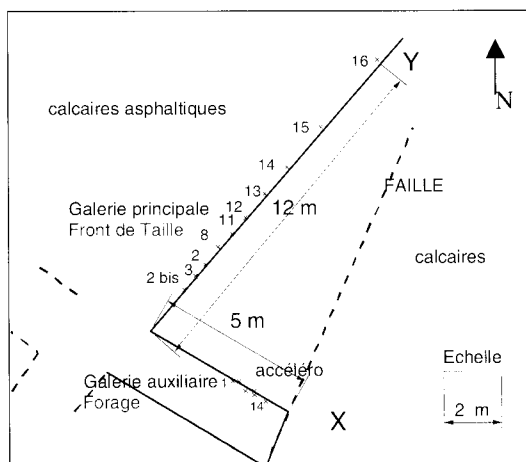


Fig. 16 - Site Calpha1 (coupe plane).

La figure 17 présente les signaux émis par la source S_8 qui permet d'obtenir le meilleur rapport signal sur bruit. Les premières ondes (temps = 0,002 s sur la trace 2) sont parfaitement visibles, elles sont suivies d'ondes de plus forte amplitude qui correspondraient à des ondes de surface (temps = 0,004 s sur la trace 2).

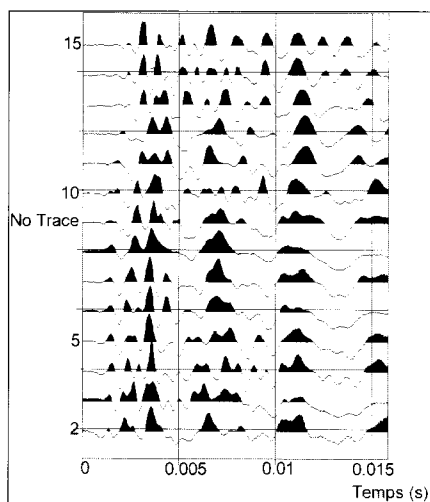


Fig. 17 - Signal émis en 8 avec agc.

Pour visualiser les ondes directes et réfléchies, un filtre passe-haut de fréquence de coupure $f_c = 500$ Hz est utilisé. Un fenêtrage temporel est ensuite appliqué pour s'affranchir des ondes de surface qui sont très énergétiques et occultent les ondes de volume.

Pour séparer ces ondes, un filtre FK (Glangeaud et al., 1993) est utilisé (fig. 18 et 19). Deux ondes directes sont alors parfaitement visibles. La première (temps = 0,0013 s sur la trace 2, sur la figure 18) est la plus rapide, de haute fréquence et possède une vitesse apparente positive. Il s'agit donc d'une onde directe P. La seconde (temps = 0,002 s sur la trace 2 sur la figure 18) est moins rapide, de vitesse apparente positive, non dispersive et également de haute fréquence. Il s'agit vraisemblablement d'une onde directe S.

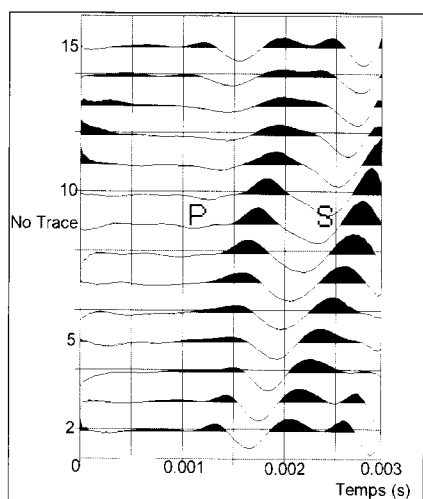


Fig. 18 - Champ direct en 8 (FK).

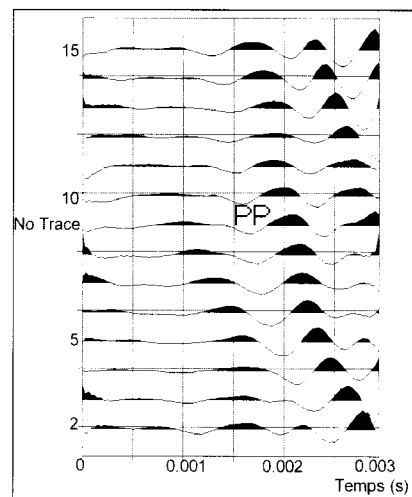


Fig. 19 - Champ réfléchi en 8 (FK).

L'onde réfléchie sur la faille de Rebésou est très nette (temps = 0,0015 s sur la trace 15, figure 19). L'étude des temps d'arrivée et de la vitesse apparente montre qu'il s'agit d'une onde PP. Ceci permet de conclure à la présence de la discontinuité recherchée.

Les résultats précédents ont été établis à l'aide d'une analyse fréquentielle et d'une étude du signe de la vitesse apparente. Afin de les valider, les temps d'arrivée expérimentaux sont comparés à des résultats numériques. Un logiciel de tracé de rayons, nommé **Calc3D**, utilisant le principe de Fermat et minimisant le temps de parcours à l'aide d'un algorithme de gradient est alors utilisé (Celse, 1999 a). La vitesse moyenne choisie est de 3 500 m/s, ce qui correspond aux vitesses moyennes du terrain étudié (fig. 20). Les résultats sont alors relativement bien corrélés aux simulations numériques. En outre, les fenêtres temporelles des ondes PP et des ondes de surface sont bien séparées.

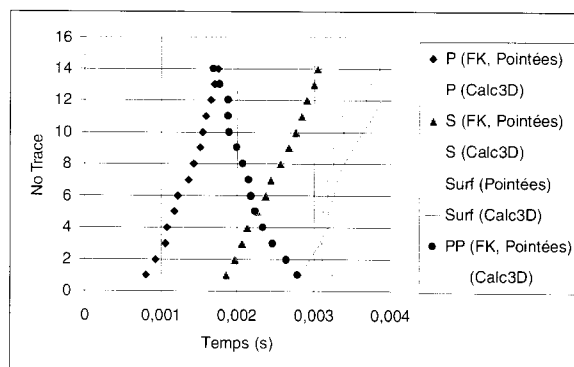


Fig. 20 - Comparaison entre temps d'arrivée réels et simulés.

Étude du site Calpha2

Le site Calpha2 est situé à une quarantaine de mètres de la faille principale. Il est composé de deux galeries orthogonales dont l'une est dirigée vers la faille (fig. 21, gauche). La seconde galerie a été instrumentée de sources et simule le forage dans le dispositif général proposé. Le front de taille correspond alors à la galerie auxiliaire.

Ce site est marqué par la présence de nombreuses fractures en piédroit de galerie, notamment les fractures F₂₄ (N35 degrés, 75 degrés W), F₂₅ (N30 degrés, 70 degrés W) et F₂₈ (N-S, 80 degrés W) qui sont marquées par des suintements d'hydrocarbures (fig. 21, droite) ; les vitesses des ondes devraient être rapides au voisinage de ces fractures. Par ailleurs, les fractures F₃₂ et F₃₃ ont également été repérées. Ce sont des fractures importantes avec des rejets décimétriques sans suintement d'hydrocarbures. Il peut donc s'agir de zones de faibles vitesses. La galerie principale est d'une longueur de 30 m et de diamètre moyen de 4 m. Les sources sont placées le long de cette galerie avec un pas moyen de 1 m près de l'intersection des deux galeries, il s'agrandit par la suite. La galerie auxiliaire est perpendiculaire à la galerie principale et de diamètre moyen de 4 m. Sept accéléromètres (notés a*) ont été disposés le long de la galerie auxiliaire avec un pas d'espacement de 1,7 m. L'accéléromètre le plus proche

(a₁₇) est situé à 5,5 m de l'intersection des deux galeries, le plus éloigné se situe à 13 m (a₂₃).

Sur ce site, seuls sept accéléromètres ont pu être utilisés ; un regroupement par source commune ne pouvait donc être envisagé. En outre, l'espacement entre les sources étant assez faible (variant entre 0,5 m sur la partie haute et 5 m sur la partie basse), un regroupement par accéléromètre a été choisi. Les sources utilisées lors du regroupement par accéléromètre commun sont les sources 13 à 8, il s'agit de vingt-deux sources disposées de manière plus ou moins régulière suivant les accidents géologiques (fig. 21, droite).

Sur le signal initial (fig. 22), les ondes directes sont nettes (temps = 0,004 s, trace 1) ; elles sont suivies d'ondes de surface plus énergétiques et de basse fréquence. Les ondes réfléchies restent par contre invisibles. Afin de réduire le nombre d'ondes dans la fenêtre de travail, un fenêtrage temporel est effectué (fig. 23).

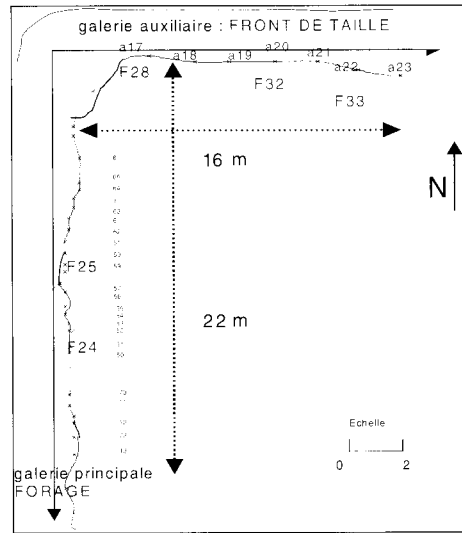
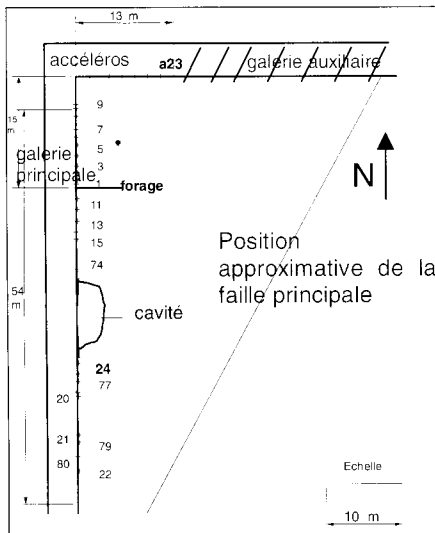


Fig. 21 - Position des sources (Coupe plane).
Les symboles « a* » représentent l'accéléromètre correspondant à la voie*.
Les nombres correspondent aux différents points de tir.

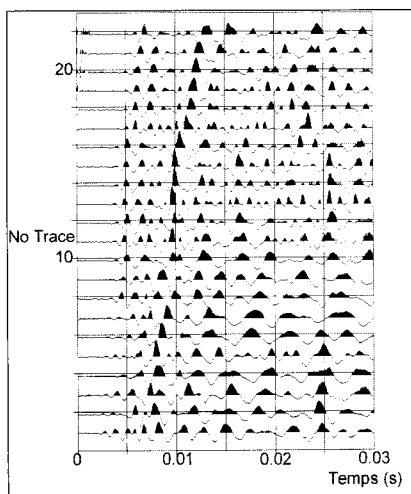


Fig. 22 - Signal en 20 avec agc.

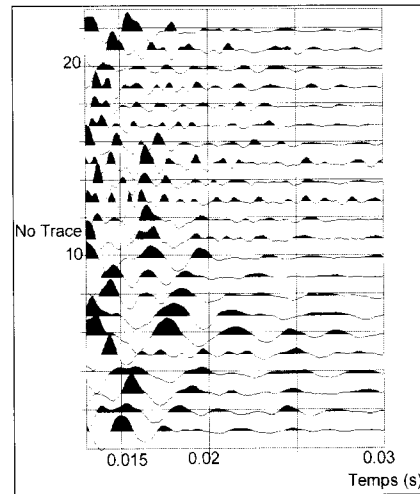


Fig. 23 - Fenêtrage du signal.

En outre, pour s'affranchir des ondes de surface, un filtre passe-haut est utilisé, il est suivi d'une moyenne glissante (fig. 24). Une onde réfléchie semble apparaître notamment sur les traces 10 à 15 (temps = 0,017 s).

Pour extraire l'onde réfléchie du signal, un filtre FK est alors appliqué (fig. 25). Une onde réfléchie devient parfaitement visible (notée PP sur la figure 25).

Un pointé a été réalisé et une comparaison est effectuée entre les temps d'arrivée simulés et réels (la vitesse moyenne utilisée est de 3 500 m/s et la modélisation considérée est tridimensionnelle) (fig. 26). La corrélation est relativement bonne bien que la vitesse apparente semble trop faible. L'utilisation de la moyenne glissante suivie d'un filtre FK permet donc la détection de la faille.

Il est par ailleurs intéressant de noter que le dispositif choisi est bien optimal dans le sens où les fenêtres temporelles d'arrivée des ondes d'interface et des ondes réfléchies sont disjointes.

Étude tomographique

Après avoir déterminé les temps d'arrivée des ondes P et PP, une étude tomographique a pu être réalisée sur le site Calpha2 (Celse et al., 1998). Les figures 27 et 28 présentent les modèles de vitesse obtenus en tomographie transmission et réflexion. La taille de maille est de 1*1 m (les deux images sont représentées à la même échelle).

La qualité des deux images est comparable. La vitesse moyenne est de l'ordre de 3 700 m/s, ce qui est légèrement supérieur aux mesures effectuées sur échantillons ($V = 3\,500$ m/s). En outre, des zones de faibles vitesses correspondant aux failles F_{32} et F_{33} et des zones de forte vitesse correspondant aux failles F_{24} , F_{25} et F_{28} sont visibles. Enfin, la faille est localisée avec une bonne précision : l'ensemble des points de réflexion obtenus est très proche de la position réelle de la faille (fig. 29).

Une analyse a posteriori est réalisée en présentant les rayons utilisés lors de la simulation (fig. 30). Les

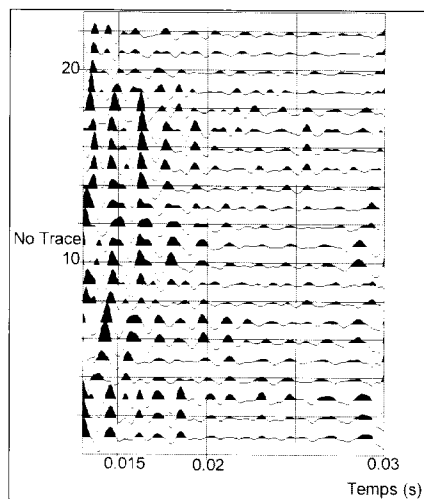


Fig. 24 - Filtre passe haut ($f_c = 500$ Hz et MA).

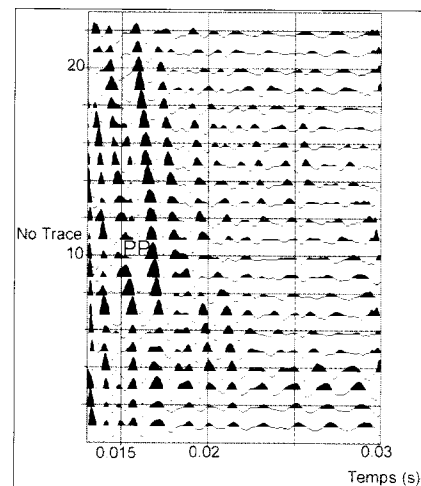


Fig. 25 - Filtre FK en 20.

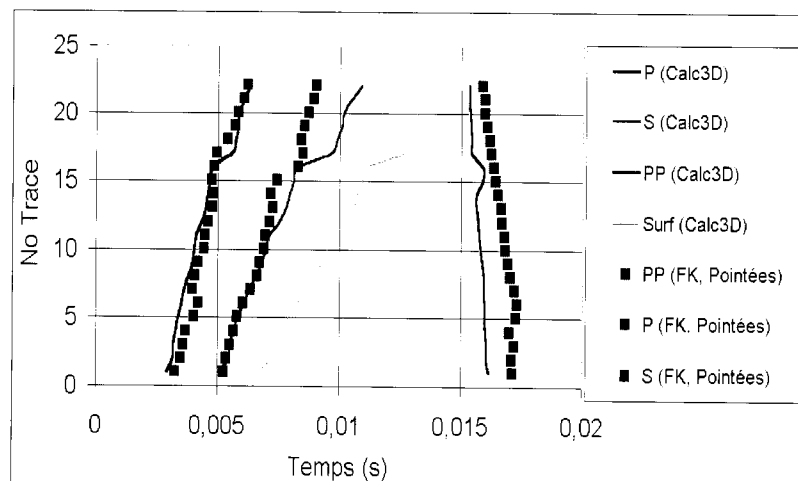


Fig. 26 - Comparaison entre temps d'arrivée théoriques et réels.

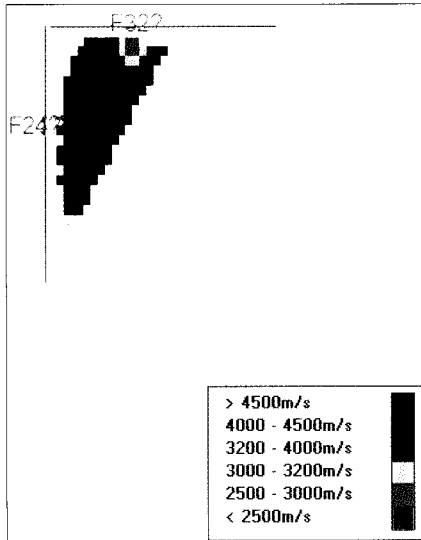


Fig. 27 - Vitesses obtenues par tomographie transmission.

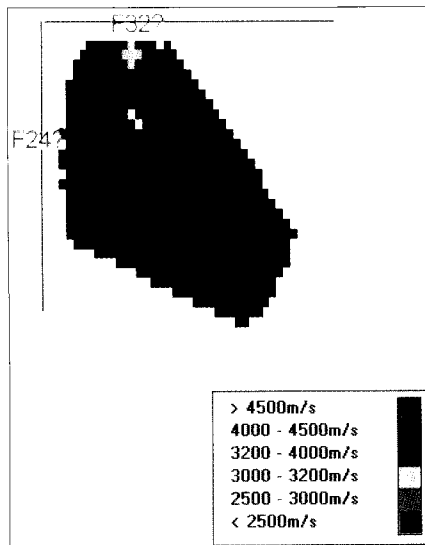


Fig. 28 - Vitesses obtenues par tomographie réflexion.

micro-fractures (zones lentes) repérées sur les figures 27 et 28 pourraient donc être validées car l'ouverture angulaire ainsi que le nombre de rayons sont suffisamment importants (Celse, 1999a).

Le dispositif choisi est bien optimal dans le sens où l'angle d'incidence des ondes est très faible et le champ d'investigation est considérablement amélioré.

Conclusion

L'objectif de ce travail était de proposer une nouvelle méthode de reconnaissance à l'avancement. Les ondes sismiques ont été choisies car elles présentent le moins d'aléas. En outre, afin de proposer une méthode pouvant fonctionner en temps réel avec une résolution suffisante, nous avons choisi d'utiliser la tomographie

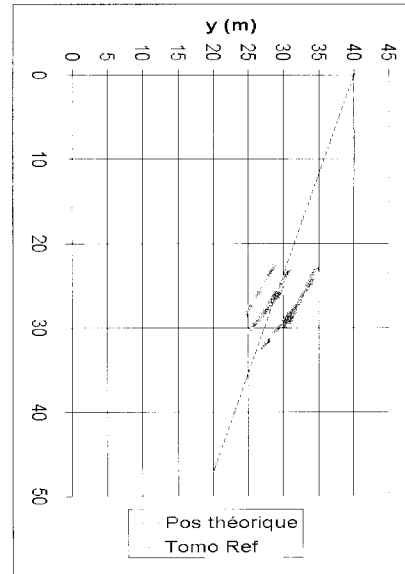


Fig. 29 - Points de réflexion obtenus.

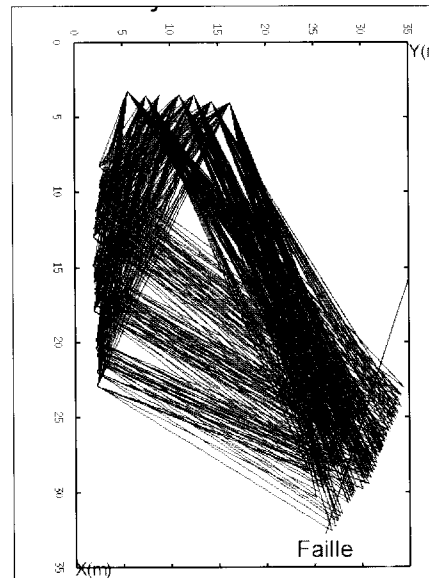


Fig. 30 - Tracé de rayons utilisés.

réflexion. En effet, du fait de l'utilisation des ondes réfléchies, les images obtenues sont moins sensibles aux variations angulaires et à la présence d'anisotropie. Cependant, ceci impose la détection des ondes réfléchies.

Après une étude de sensibilité de paramètres, nous avons montré que l'attribut le plus sensible était la vitesse apparente. Les ondes P et PP ont en effet des vitesses apparentes de signe opposé. De plus, pour faciliter la détection des ondes réfléchies, un algorithme d'optimisation du dispositif a été écrit de manière à ce que les ondes soient temporellement séparées et de vitesse apparente de signe opposé. L'utilisation de filtres FK permet alors la séparation des ondes.

La stratégie utilisée dans ce projet repose sur le constat que les ondes d'interface sont beaucoup plus énergéti-

ques que les ondes réfléchies et il semble illusoire d'espérer les séparer. Les ondes réfléchies ne pourront donc être détectées que dans deux cas de figure :

- ❶ sur un site situé à proximité d'une hétérogénéité majeure, l'objectif est alors de séparer les ondes P, S et PP interférant ;
- ❷ sur un site éloigné de la faille, l'objectif est alors d'extraire un signal cohérent (c'est-à-dire une onde) d'un signal bruité correspondant à la « queue » de l'onde d'interface.

Les méthodes proposées se sont avérées très efficaces pour reconnaître des discontinuités repérées par une étude géologique préalable. De nouvelles expérimentations ont été effectuées pour valider définitivement cette méthode (Celse et al., 1999 b). On peut alors proposer la méthodologie suivante (fig. 31) :

- ❶ Après étude du site (présomption de faille avec son orientation et son pendage) : détermination du dispositif optimal grâce au logiciel **Optimis** et calcul des fenêtres temporelles grâce au logiciel **Calc3D**.
- ❷ Prise de mesures.
- ❸ Etude des ondes directes P et réalisation d'une tomographie transmission (grâce au logiciel **TomoRef3D**) pour donner les premières indications au conducteur de travaux.
- ❹ Si présomption d'une faille proche : étude des signaux « avant » l'arrivée des ondes de tube. Un fenêtrage temporel sur la première partie du signal sera effectué, il sera suivi d'un filtre passe haut pour éliminer les résidus des ondes d'interface. Un filtre FK sera ensuite appliqué.
- ❺ Si détection d'ondes réfléchies : utilisation de la tomographie réflexion pour élargir le champ d'investigation (utilisation du logiciel **TomoRef3D**).
- ❻ Etude des signaux « après » les ondes de tube pour localiser d'éventuelles réflexions sur des hétérogénéités insoupçonnées. Un fenêtrage temporel sur la seconde partie du signal sera effectué, il sera suivi d'un filtre passe-haut puis d'une moyenne glissante pour renforcer le champ d'ondes cohérent. Un filtre FK sera ensuite appliqué. On commencera par étudier les

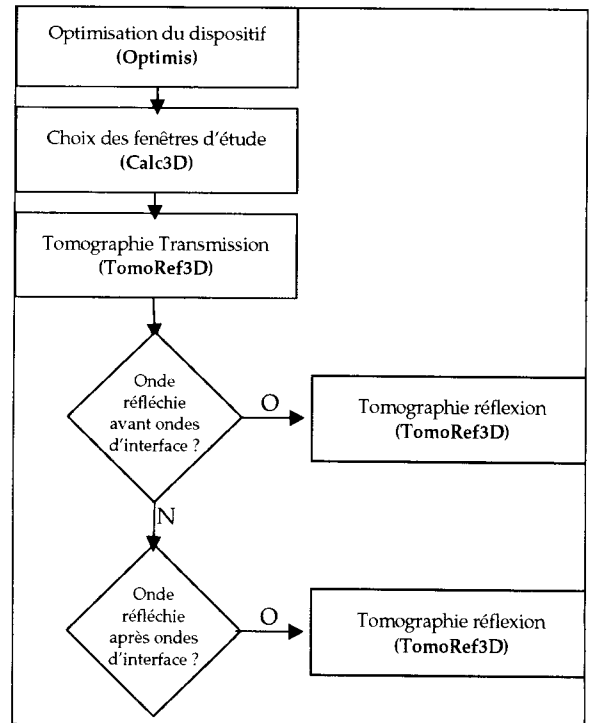


Fig. 31 - Proposition de méthodologie.

signaux enregistrés par les récepteurs situés le plus près du front de taille (la fenêtre temporelle d'arrivée des ondes d'interface sera alors éloignée de la fenêtre temporelle d'arrivée des ondes réfléchies).

❼ Si détection d'ondes réfléchies : utilisation de la tomographie réflexion pour élargir le champ d'investigation (utilisation du logiciel **TomoRef3D**).

Par ailleurs, avant que l'ensemble de la méthode soit industrialisée, des recherches doivent être menées pour diminuer :

- la durée de l'acquisition : le temps de chacune des expérimentations présentées était de l'ordre de 4 heures,
- le temps de traitement, il est de l'ordre de quelques dizaines de minutes.

Remerciements. Nous remercions tout le personnel de la mine SFA (Société française des asphaltes) et son directeur M. Gandon pour leur gentillesse et leur disponibilité ainsi que M. Campillo (directeur du LGIT) et Glangeaud (CEPHAG) pour leurs remarques très constructives.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AKI K., RICHARD P.G. (1980), *Quantitative seismology theory and method*, Vol. 1 & Vol. 2, Ed. W.H. Freeman and Company, San Francisco.

BOUCHON M. (1981), *A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media*, Bulletin of The Seismological Society of America, Vol. 71, pp. 959-971.

CELSE B. (1999 a), *Reconnaissance sismique tridimensionnelle en avant du front de taille*, Thèse de doctorat (Génie civil), Université de Lille.

CELSE B. (1999 b), *Reconnaissance géotechnique en avant du front de taille*, colloque de l'AUGC, pp. 57-62.

CELSE B., CÔTE PH., ABRAHAM O., PIWAKOWSKI B., VAYS-SADE B., HENRY J.-P. (1999 a), *Characterisation of rock masses in underground works using seismic reflection tomography*, Colloque GeoVision, Liège, pp. 45-48.

CELSE B., CÔTE PH., ABRAHAM O., PIWAKOWSKI B., VAYS-SADE B., HENRY J.-P. (1999b), *Three dimensional characteri-*

sation of rocks using reflection tomography, Congrès de l'EEGS, Budapest.

CÔTE PH., ABRAHAM O., PIWAKOWSKI B., VAYSSADE B., HENRY J.-P. (1998), *Characterisation of rock structures ahead of tunnel face. Feasibility study*, Congrès de l'EEGS, Barcelone, pp. 527-530.

CÔTE PH. (1988), *Tomographies sismiques en Génie Civil*, Thèse de doctorat ès Sciences, Université J.Fourier, Grenoble.

DYER B.C., WORTHINGTON M.H. (1988), *Seismic reflection tomography : a case study*, First break, **Vol. 6, n° 11**, pp. 354-366.

EUROPÉENNE DE GÉOPHYSIQUE, (1994), *Le cylindre électrique*, Brevet européen, BP 13 Nivolas Vermelle 38312 Bourgoin-Jaillieu (France).

GARDNER G.H.F., GARDNER L.W., GREGORY A.R. (1974), *Formation velocity and density – The diagnostic basics for stratigraphic traps*, Geophysics, **Vol. 39**, pp. 770-780.

GLANGEAUD F., MARI J.L. (1993), *Wave Separation*, Revue de l'IFP **Vol. 48, n° 5**, pp. 467-500.

HASEGAWA M., USUI M., GOTOH K. (1993), *Geological prognosis ahead of a tunnel face*, Engineering Geology, **Vol. 35**, pp. 229-235, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.

MARI J.L., ARENS G., CHAPPELLIER D., GAUDIANI P. (1998), *Géophysique de gisement et de Génie-civil*, Editions Technip, Paris.

NORD G., OLSSON P., BY T.L. (1989), *Geophysical ground probing in TBM Tunneling*, Congrès international de Mécanique des Roches (Pau), pp. 581-586.

PLESSIX R.E. (1996), *Détermination de la vitesse pour l'interprétation de données sismiques très hautes résolution à l'échelle géotechnique*, Th. Université Paris IX.

SAINI G.S., DUBE A.K. (1989), *Severe tunneling problems in young Himalayan rocks for deep underground opening*, « Rock at great depth », eds Balkema, pp. 677-685.

SATTEL G., FREY G., AMBERG R. (1992), « Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods-pilot project in Centovalli Tunnel, Locarno, Switzerland », First Break, **Vol. 10, n° 1**.

TUNNELS ET OUVRAGES SOUTERRAINS, (1992), *Les reconnaissances du tunnel de la Bretelle*, **Vol. 110**, pp. 78-128.

WIDESS M.B. (1973), *How thin is a thin bed*, Geophysics, **Vol. 38, n° 6**, pp. 1176-1180.

ZOEPPRITZ K. (1919), *Über Reflexion und Durchgang seismischer Wellen durch Unstetigkeitsfläche*, Über Erdbebenwellen VII zu Göttingen, Math Phys., K1 : 57-84.

ABSTRACT

Seismic techniques to detect faults when driving tunnels

B. CELSE, B. VAYSSADE, J.-P. HENRY, Ph. CÔTE, O. ABRAHAM, B. PIWAKOWSKI

A new tunnel heading survey method is presented which uses seismic techniques to characterize in three dimensions the rock in front of the tunnel face. The technique of reflection tomography was selected as this provides a high resolution "real-time" map of wave velocities in the rock. It is, however, necessary to detect the reflected waves. An initial study of the geometric and acoustic properties of the rock established the characteristics of the most easily detected faults, characterized the reflected waves and led to the development of an optimization algorithm for the device. A signal processing strategy was then proposed in order to detect the reflected waves. The arrival times of direct and reflected waves were then input to an inversion algorithm. Reflection tomography provided a detailed characterization of the rock in front of the tunnel face. Two experimental studies that demonstrate the effectiveness of the method are then presented.