

1



Mesure des vitesses de cisaillement en forage

C. Vergnault, J.-L. Mari

1.1 Contexte

1.1.1 Panorama des mesures V_s invasives et non invasives

La mesure des ondes de cisaillement (S) peut se faire de façon invasive (sismique en forage et diagraphies) ou non invasive (ondes de surface (Multi Analysis of Surface Waves, MASW) et bruit de fond (Ambiance Measurement Vibration, AMW)). Évidemment, chaque méthode présente des avantages et des inconvénients que le gestionnaire du projet (coté client et sous-traitant) doit évaluer afin de sélectionner la méthode la plus adaptée au projet. Pour l'aider dans cette démarche, le tableau 1.1 résume les avantages et les inconvénients de chaque méthode.

Ce chapitre de l'ouvrage *Sismique en forage et diagraphies acoustiques* est publié en Open Access sous licence creative commons CC-BY-NC-ND permettant l'utilisation non commerciale, la distribution, la reproduction du texte, sur n'importe quel support, à condition de citer la source.

© EDP Sciences, 2018

DOI: 10.1051/978-2-7598-2262-1.c003

Tableau 1.1 *Avantages et inconvénients des méthodes invasives et non invasives.*

	Méthode	Profondeur cible	Résolution verticale	Contraintes	Application à l'offshore
Méthode non invasive	Réfraction S	50 m, mais parfois moins de 10 m dans un environnement industriel	Plusieurs mètres	Affecté par le bruit dans un environnement industriel, limité par des inversions de vitesse	Oui
	MASW	15 à 20 m	Plusieurs mètres	Nécessite un milieu tabulaire au droit de la zone investiguée	Oui
	AMV	Plusieurs centaines de mètres	Plusieurs mètres à décimètres	Nécessite un milieu tabulaire au droit de la zone investiguée	Pas actuellement
Diagraphies	Sonic log de type monopôle	> 1 000 m, pour les forages profonds de l'exploration production	Plusieurs décimètres	Nécessite un forage en trou nu et que la V_s soit supérieure à la V_p du fluide de forage	Oui
	PSSL ou sonic log de type dipôle	Jusqu'à 300 m, pour les forages profonds de la géotechnique	1 m	De préférence dans un forage en trou nu mais il est aussi possible de faire un PSSL à travers un tubage scellé	Oui, mais en trou nu
Sismique en forage	Crosshole	Jusqu'à 50 m, exceptionnellement 100 m	1 m	Nécessite 2 forages en trou nu ou avec un tubage scellé et une déviation limitée	Généralement trop cher
	Downhole	Jusqu'à 50 m, exceptionnellement 100 m, pour les ondes S. Peut aussi être très profond pour les ondes P (>1 000 m)	Plusieurs mètres	Nécessite 1 forage en trou nu ou avec un tubage scellé	Oui pour les ondes P, encore trop complexe pour les ondes S
	Uphole	10 m pour les ondes S, 50 m pour les ondes P	Plusieurs mètres	Difficile d'avoir une source S puissante sans endommager le tubage	Difficile d'avoir une source S adaptée

Sur la base des capacités et des limites de chaque méthode, décrites dans le tableau 1.1, plusieurs choix seront possibles en fonction de la finalité du projet et de l'état des connaissances du site. Ces choix sont résumés dans le tableau 1.2. Enfin, l'aspect économique départagera les différentes options possibles.

Tableau 1.2 Adéquation objectif méthode.

Besoin	Modélisation de la réponse du sol pour le design d'une construction sensible		Design d'une construction courante basée sur la classification de sol de l'Eurocode 8	
État de connaissance du site	Connaissance globale du site, insuffisante pour établir un log de vitesse au droit du bâtiment en projet	Connaissance précise (logs de vitesses) en plusieurs points du site, mais pas au droit du bâtiment en projet	Pas de connaissance particulière	La V_s 30 est connue en plusieurs points du site, mais pas au droit du bâtiment en projet
Mesure préconisée	Crosshole couplé avec downhole ou PSSL couplé avec crosshole dans les 10 premiers mètres	Downhole ou PSSL couplé avec MASW et AMV	Downhole couplé avec MASW et AMV	MASW et AMV si l'espace est suffisant et non affecté par de nombreux réseaux enterrés

Le périmètre de ce chapitre est celui des méthodes géophysiques invasives pour déterminer un log V_s , soit les méthodes : downhole, uphole, crosshole et les diagraphies. Les cas d'études présentés proviennent du retour d'expérience d'EDF suite à de nombreuses reconnaissances de sol ces cinq dernières années ainsi que du projet de recherche Inter Pacific dont l'objectif était de comparer les méthodes géophysiques pour la caractérisation sismique d'un site (Garofalo, 2016). En revanche, les méthodes non invasives ne seront pas détaillées dans cet ouvrage.

1.1.2 Applications

L'application la plus courante concerne la conception et le dimensionnement des structures de génie civil. En effet, dans la classification des sols par l'Eurocode 8, un des trois principaux paramètres permettant de classer les sols est basé sur la vitesse moyenne de propagation des ondes de cisaillement dans les 30 premiers mètres. Ce paramètre est classiquement appelé « V_s 30 ».

Tableau 1.3 Paramètres mécaniques en fonction de V_p , V_s et ρ (d'après Bourbié, 1986).

Paramètre mécanique	Équation avec V_p , V_s et ρ
Le module d'Young, E_{dmax} (Pa)	$\rho V_s^2 \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2}$
La constante de Lamé, λ (Pa)	$\rho(V_p^2 - 2V_s^2)$
Le module d'incompressibilité volumique, K (Pa)	$\rho\left(V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2\right)$
Le module de cisaillement, rigidité ou coefficient de Coulomb (G_{dmax} ou μ en Pa)	ρV_s^2
Le coefficient de Poisson, γ (sans dimension)	$\frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$

Par ailleurs, pour une densité donnée, les mesures P et S en forages permettent également de pouvoir déterminer les paramètres in situ nécessaires à la définition d'un modèle élastique aux petites déformations (tableau 1.3). On distingue principalement le module d'Young et le module de cisaillement.

1.1.3 Conditions environnementales

Il est important de noter que, dans le domaine de la géotechnique, les forages pour les mesures invasives traversent généralement des terrains instables. De ce fait, ils sont souvent tubés avec un cuvelage ou un tubage PVC, scellé à la formation par un coulis de ciment.

La qualité de ce scellement est un point sensible pour la bonne transmission des signaux sismiques. De ce fait, la réalisation du forage et son scellement doivent respecter les standards décrits dans les normes ASTM D7400 pour le downhole et D4428 pour le crosshole.

Les points clefs de cette phase peuvent être résumés dans le tableau 1.4.

Tableau 1.4 *Résumé des paramètres de trou, suivant les normes ASTM, pour une mesure géophysique en forage.*

Diamètre de forage max	175 mm (7 in)
Diamètre interne du cuvelage	50 à 100 mm (2 à 4 in)
Nature du tubage	PVC ou aluminium, fermé à son pied
Coulis de scellement	Coulis de bentonite-ciment dont la densité est proche de celle des terrains encaissants, afin de limiter la perte d'énergie par ce guide d'ondes

Pour des forages avec un tubage PVC, il est possible de réaliser un contrôle de la cimentation par une diagraphie d'adhérence du coulis CBL-VDL (*Cement Bond Log-Variable Density Log*), même si cet outil a été initialement développé pour des tubages en acier (voir chapitre 3). Le log CBL-VDL est un enregistrement réalisé avec un outil acoustique centré dans le trou de forage, ayant une source et un récepteur piézoélectrique qui sont distincts et distants de 3 ft et 5 ft, respectivement pour le CBL et le VDL. Si le couplage est bon (faible contraste de vitesse acoustique), la majeure partie de l'énergie est transmise et celle des ondes réfractées est faible, ce qui se traduit visuellement par une faible amplitude CBL et VDL (rectangles gris de la figure 1.1). Dans le cas contraire, l'amplitude des ondes enregistrées est forte. Ce signal a un caractère plutôt « rectiligne » (rectangle rouge de la figure 1.1). Il est à noter que si la formation a une vitesse élevée par rapport à celle du cuvelage (2 100 à 2 200 m/s pour le PVC contre 5 600 m/s pour l'acier), alors les ondes réfractées dans la formation vont arriver en premier, masquant ainsi les ondes réfractées dans le cuvelage (rectangle orange de la figure 1.1). D'un autre côté, si ces ondes dominent, c'est bien que l'ensemble cuvelage, coulis, formation est adhérent.

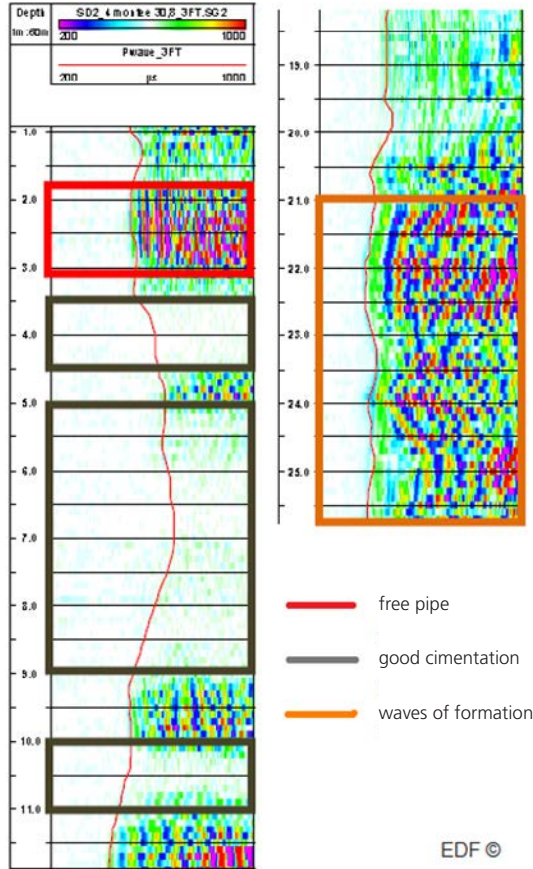


Figure 1.1 Illustration d'un log « Full wave sonic » utilisé comme un CBL-VDL pour évaluer la qualité de la cimentation (acquisition LIM Logging pour EDF).

Cette diagraphie peut être réalisée avec un outil acoustique de type « sonic Full Waves Form ». Elle doit être exigée pour un crosshole à travers une formation instable (sablo-graveleuse). En effet, en fonction des résultats, l'attribution des forages émetteurs et récepteurs pourra être revue.

1.2 Les mesures V_s par méthode sismique en forage

La sismique en transmission utilisée en forage peut être illustrée comme un cas particulier de profil sismique vertical (PSV, voir chapitre 2) où le sujet d'intérêt n'est pas les ondes réfléchies aux interfaces, mais le temps de première arrivée de l'onde transmise entre la source en surface et le récepteur en forage. Ceci est illustré par la figure 1.2 ci-après.

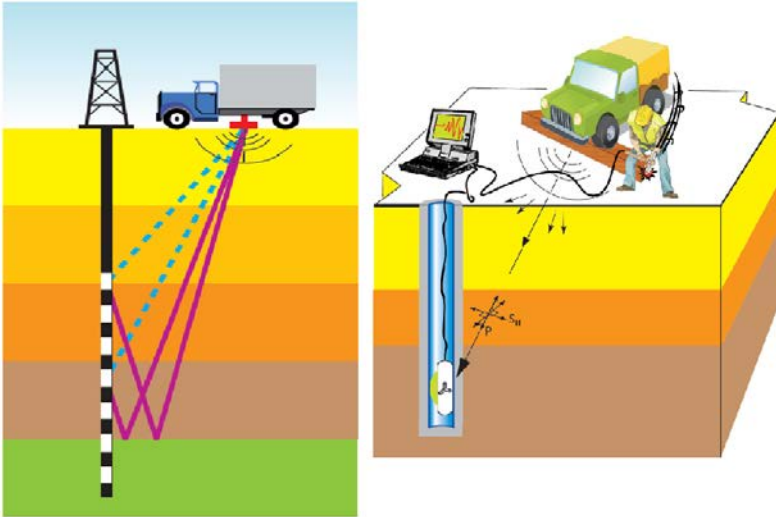


Figure 1.2 *Illustration du trajet des rais sismiques lors d'un PSV ou d'un sismosondage (gauche) et d'un downhole (droite), avec en violet les ondes réfléchies et en pointillé les ondes directes.*

Vis-à-vis de l'étude des ondes transmises ou directes, en prospection sismique pétrolière, on parlera plutôt de sismosondage ou « checkshot », mais aussi de carottage sismique.

- En général, le sismosondage est réalisé sur toute la hauteur d'un forage pétrolier (échelle kilométrique). Il est utilisé pour le calage sismique, c'est-à-dire la caractérisation géologique des marqueurs sismiques. En effet, les résultats d'un sismosondage sont présentés sous la forme de courbes : temps-profondeur, vitesses moyennes d'intervalles, vitesses quadratiques moyennes en fonction de la profondeur et des formations géologiques rencontrées dans le forage.
- Le carottage sismique est habituellement réalisé dans un forage de faible profondeur (échelle hectométrique ou décamétrique). Il est utilisé pour déterminer les paramètres de la zone altérée (*Weathering Zone* ou WZ, on parle aussi de carottage WZ), notamment son épaisseur et sa vitesse qui sont des paramètres indispensables pour réaliser les corrections statiques. Souvent son acquisition est plutôt suivant la configuration uphole (source en forage, de type dynamite) que downhole (source en surface).

En géotechnique, on parle de downhole (DH) et l'on s'intéresse également voire principalement aux ondes en cisaillement (S). Pour des applications nécessitant une évaluation fine du log V_s en fonction de la profondeur (modélisation de la réponse du sol pour le design d'une construction sensible), on privilégie souvent une mesure de transmission entre forages, permettant d'établir un profil de vitesse avec un pas métrique, on parle alors de crosshole.

1.2.1 Downhole

Lors d'une acquisition downhole, le récepteur sismique est dans un forage et la source en surface. Des configurations alternatives peuvent être mises en œuvre avec un récepteur sismique dans le cône d'un pénétromètre CPT (Seismic Cone SCPT) ou dans un dilatomètre (SDMT). De plus, une configuration avec deux récepteurs espacés d'une distance fixe est également envisageable. En fonction du type de frappe à la surface du sol (verticale ou horizontale), la source sismique permet de générer un signal contenant respectivement un maximum d'énergie dans l'onde de compression (P) ou de cisaillement (S) (figure 1.3).

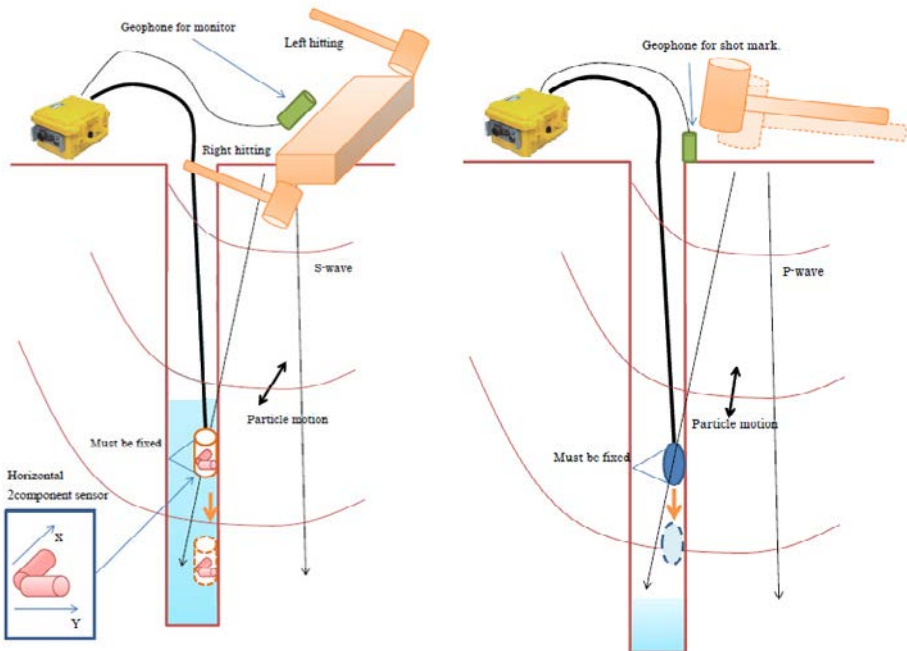


Figure 1.3 Configuration classique d'un downhole où les ondes de cisaillement vont principalement être enregistrées par les composantes horizontales et l'onde en compression par la composante verticale du géophone en forage (d'après la documentation technique de Seislmager 2013).

1.2.1.1 Dispositif d'acquisition

Il est nécessaire de dissocier l'acquisition et l'analyse des ondes en compression (P) et en cisaillement (S).

Sources

La norme ASTM D7400-08 (*Standard Test Methods For Downhole Seismic Testing*) définit clairement la source S la plus commune. Elle consiste en un madrier de 2,4 m de long et 15 cm d'épaisseur, afin qu'un véhicule puisse être positionné dessus, comme masse de couplage. Dès lors, un signal riche en ondes S_H est alors obtenu par des frappes latérales, sur les côtés du madrier, avec un marteau de 5 à 15 kg. Ce dernier peut être monté sur un axe pivotant comme l'illustrent les photos de la figure 1.4.

Pour générer des ondes P, il suffit d'une frappe verticale sur une enclume, soit à côté du madrier sur l'axe entre le point milieu et la tête de forage, soit à côté de chaque extrémité du madrier.



Figure 1.4 Illustration d'une source S utilisée en downhole et conforme à la norme ASTM (gauche, source IgeoTest ; droite, source IMG).

Choix de la position de la source

La distance entre le point milieu du madrier et la tête de sondage (offset) doit être judicieusement choisie afin de limiter l'impact des ondes de tube, des ondes réfractées ainsi que l'angle d'incidence. Cette distance est en général entre 1 et 3 m. Si un déport plus important est nécessaire (4 à 6 m) ou si le milieu présente plusieurs couches de vitesses différentes dans les 10 premiers mètres, alors la prise en compte des ondes réfractées et des trajets réels dans l'analyse (loi de Snell-Descartes) est indispensable (figure 1.5).

L'impact des ondes de tube est une réalité qu'il faut prendre en compte. La figure 1.6 ci-après représente un downhole dont le forage était respectivement plein d'eau (signal bleu) puis sans eau (signal noir). Ceci permet de matérialiser le signal des ondes de tube et sa complexité, car le temps de 60 ms à 30 m n'est pas cohérent avec un simple signal réfléchi au fond et transitant dans l'eau. La vitesse correspond

plus à celle d'un mode guidé transitant à l'interface eau-tubage (voir chapitre 2, paragraphes sur les ondes acoustiques).

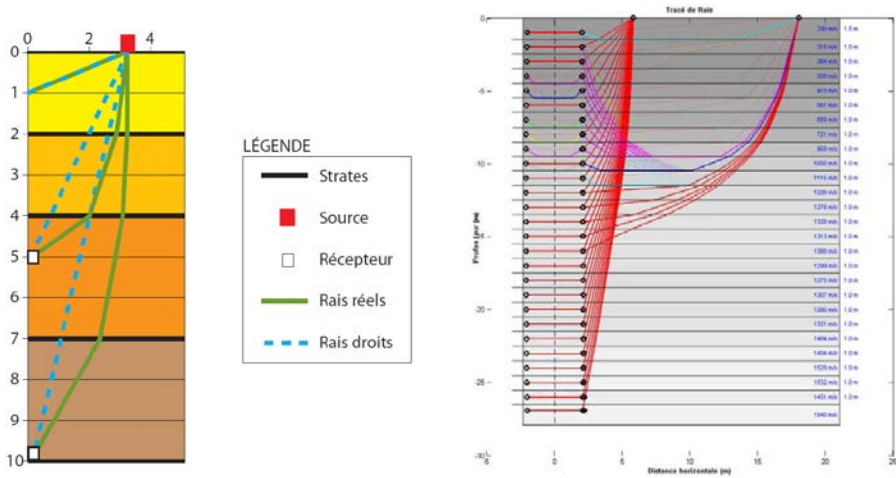


Figure 1.5 Illustration de la différence entre les trajets réels et les rais droits qui sont considérés par une analyse downhole classique (gauche). À droite, le modèle de rais après inversion jointe (Fugro pour EDF) d'un crosshole et de 2 downholes avec des dépôts différents illustre que les ondes réfractées sont plus présentes lorsque le dépôt de la source augmente.

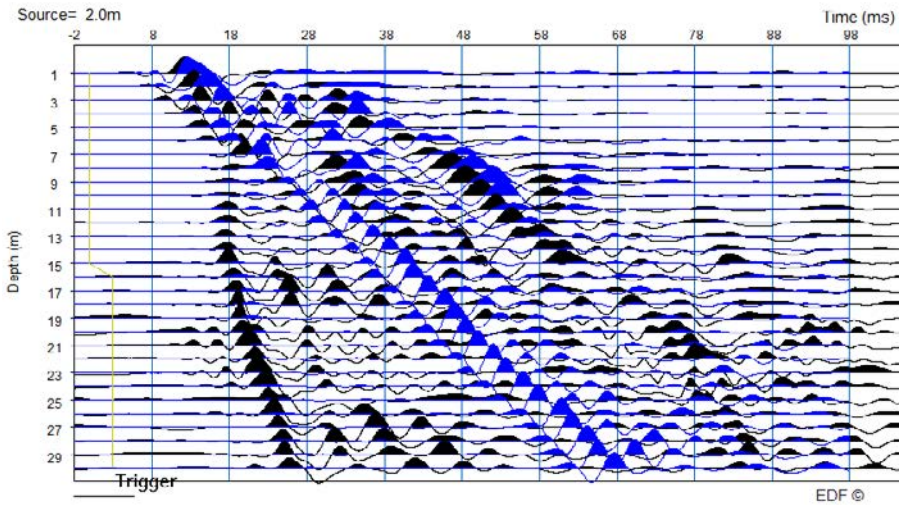


Figure 1.6 Illustration d'une onde de tube dans un forage en eau.

Le figure 1.7 suivante permet de montrer qu'une onde aérienne existe également dans le forage sans eau, mais nettement moins énergétique (réflexion de 95 ms à 30 m). De plus, son effet peut être atténué en plaçant un bouchon acoustique en tête de forage.

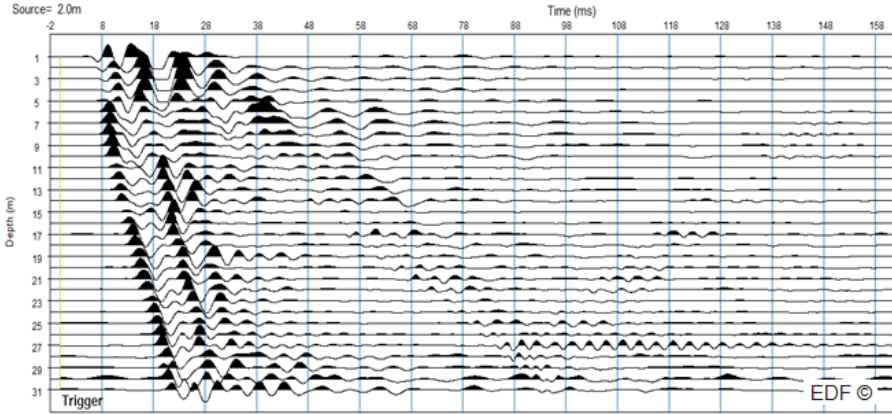


Figure 1.7 Illustration d'une onde de tube dans un forage sans eau.

En fonction de la vitesse du milieu, l'onde de tube dans l'eau peut masquer l'arrivée P ou S (figure 1.8). Il est donc indispensable de s'en prémunir en vidant le forage autant que possible ou en augmentant la distance entre la source et la tête du forage. Toutefois, cette dernière option va favoriser la génération d'ondes réfractées (voir figure 1.5).

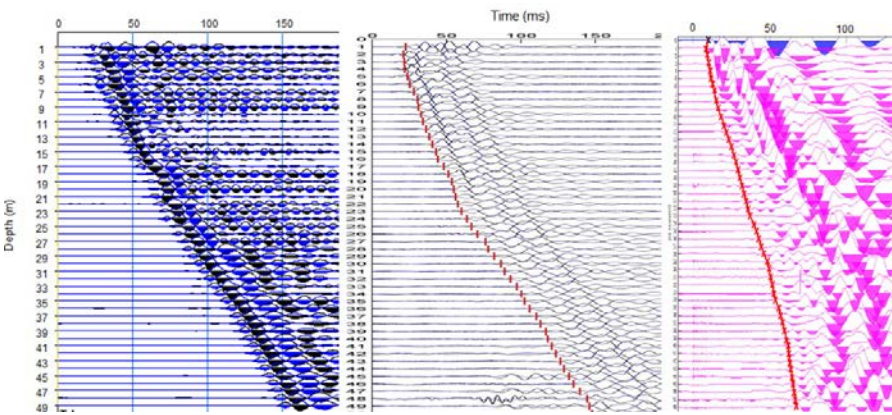


Figure 1.8 Illustration de l'impact de l'onde de tube (Projet InterPacific).

Couplage de la source sismique

Le couplage de la source sismique est également un point sensible (figure 1.9). La source doit être préférentiellement positionnée sur du terrain naturel (figure 1.9a). En présence d'un remblai, atténuant fortement les ondes sismiques (figure 1.9b), il peut être souhaitable de le décaisser jusqu'à retrouver le terrain naturel. Il est à noter que les techniques de forage et de cimentation ont une forte influence sur la qualité de la transmission des signaux, comme le montre l'exemple présenté en figure 1.9c.

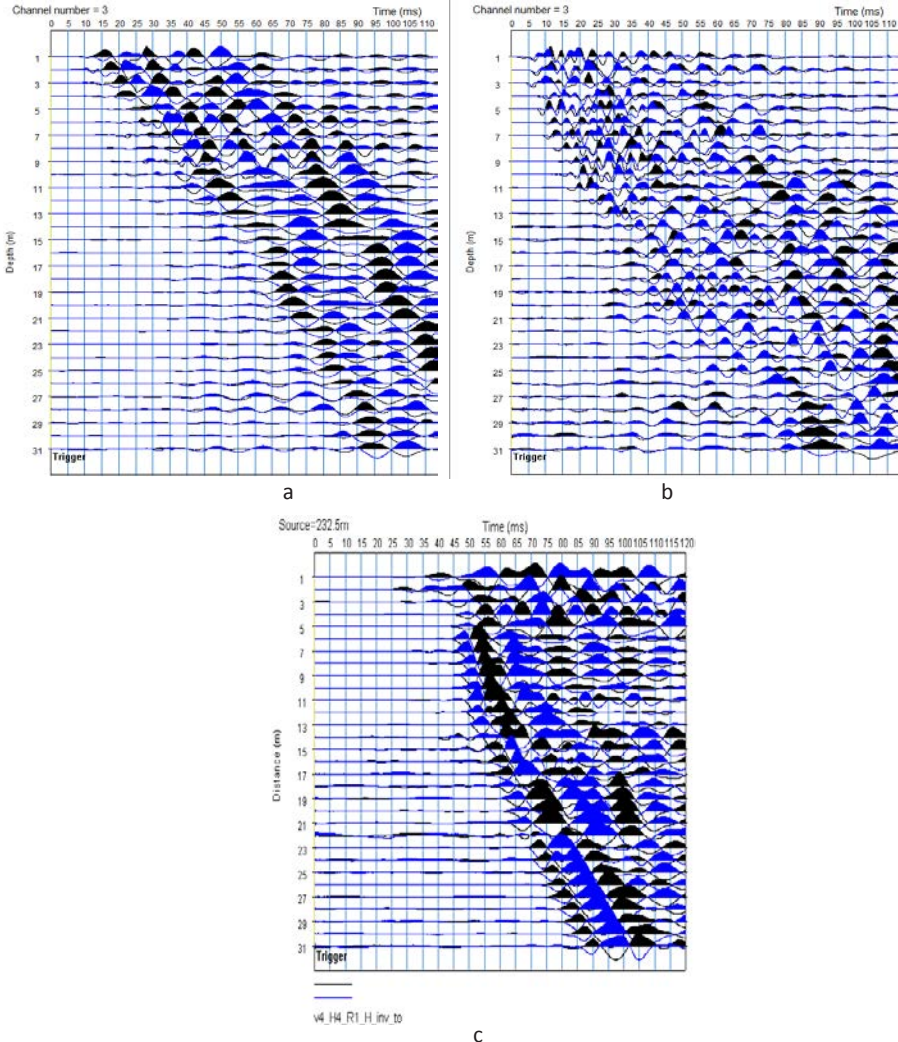


Figure 1.9 Effet du couplage de la source en opération de type Downhole ; a : downhole avec une source sur le terrain naturel ; b : downhole avec une source sur un remblai (nappe à 9,8 m) ; c : downhole sur le même site que a et b, mais avec forage fait avec carottier sonique (nappe à 4 m, hors nappe le signal est pollué par des ondes réfractées car l'offset est trop grand).

Il n'est pas toujours possible de mettre la source sur le terrain naturel ; en revanche, il est possible de réaliser un forage court pour pouvoir utiliser une source de forage directement sous le remblai, en complément de celle de surface. Toutefois, il est important de conserver la source de surface, car les sources de forage sont généralement moins puissantes et l'atténuation peut être trop importante pour réaliser des mesures pour des trajets supérieurs à 10 m (limite que l'on retrouve sur la mesure uphole, sans un nombre important d'addition de tirs ou « stack »).

Récepteurs

En downhole, l'énergie des ondes P va arriver principalement sur la composante verticale du récepteur et l'énergie de l'onde S_H sera répartie sur les composantes horizontales. Dans la mesure où un « offset » court est appliqué (1 à 3 m), il est nécessaire de vider le forage de son eau pour éviter les ondes de tube. Toutefois, pour un downhole profond, la vidange du tube ne doit pas excéder 50 m, sinon le risque d'écrasement du tube devient trop fort. En conséquence, il n'est pas possible d'utiliser des hydrophones proches de la surface pour réaliser un downhole en ondes P. Un récepteur 3 composantes ancré à la paroi du forage, de type géophone ou accéléromètre, est donc préconisé.

1.2.1.2 Analyse d'un downhole (DH)

La première étape de l'analyse consiste à réaliser le pointé des premières arrivées P et S. Si le signal est de bonne qualité, le pointé des ondes P n'est pas problématique. Pour les ondes S, il est impératif d'exploiter la propriété de polarisation de l'onde en fonction du sens de la frappe (figure 1.10). Pour cela, l'opposition de phase des tirs de sens opposé permet d'identifier sans ambiguïté l'arrivée S (les signaux bleus et noirs doivent être de signe opposé, sur la figure 1.10). Si cette dernière n'existe pas, il faut alors se méfier du signal enregistré, car cela peut traduire une pollution par des ondes de tube ou une interférence avec les ondes P.

La figure 1.10 illustre qu'avec une source classique, l'opposition de phase caractérisant les ondes S peut s'observer jusqu'à 50 m de profondeur. Dans des terrains favorables, les mêmes types de signaux s'observent jusqu'à 100 m de profondeur.

Comme en sismique réfraction, la première étape de l'analyse consiste à afficher le graphe des dromochroniques (courbe distance source-récepteur en fonction du temps). Sur les 10 premiers mètres, cette courbe diffère sensiblement de la courbe profondeur-temps en raison de l'offset de la source (voir figure 1.5). À ce stade, le trajet entre la source et le récepteur est considéré comme linéaire. Toutefois, cette approximation est fautive si le milieu présente des variations de vitesse notables dans les 10 premiers mètres. L'impact augmente avec le déport de la source. À partir de la dromochronique, l'analyse d'un downhole se fait par plages de profondeur (tranches). Le découpage en tranches doit certes se faire en lien avec les ruptures de pentes de la dromochronique, mais aussi et surtout *en lien avec le découpage géologique réalisé sur la base des carottes*.

Sur les tranches ainsi définies, la pente entre les variations de distance et de temps de chaque segment fournit la vitesse moyenne sur l'intervalle correspondant (figure 1.11).

La pente du rayon reliant un point à l'origine donne la vitesse moyenne du sol à la profondeur correspondante. En raison de l'incertitude sur les pointés, chaque tranche doit contenir un minimum de 3 points de mesure, idéalement 4 ou 5 (figure 1.12). De ce fait, l'acquisition downhole avec 2 récepteurs en même temps pour effectuer un calcul de vitesse sur ces 2 mesures n'est pas préconisée. Enfin, on constate aussi qu'une analyse downhole, même avec un pas de mesure métrique, est plus intégrative qu'une mesure crosshole.

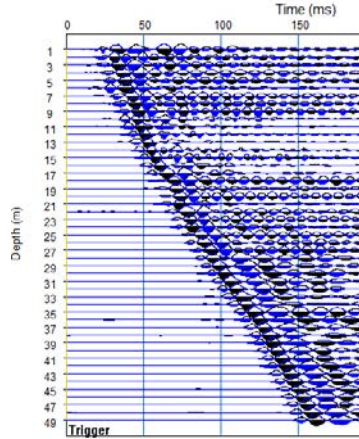


Figure 1.10 Downhole S jusqu'à 50 m de profondeur (Inter Pacific).

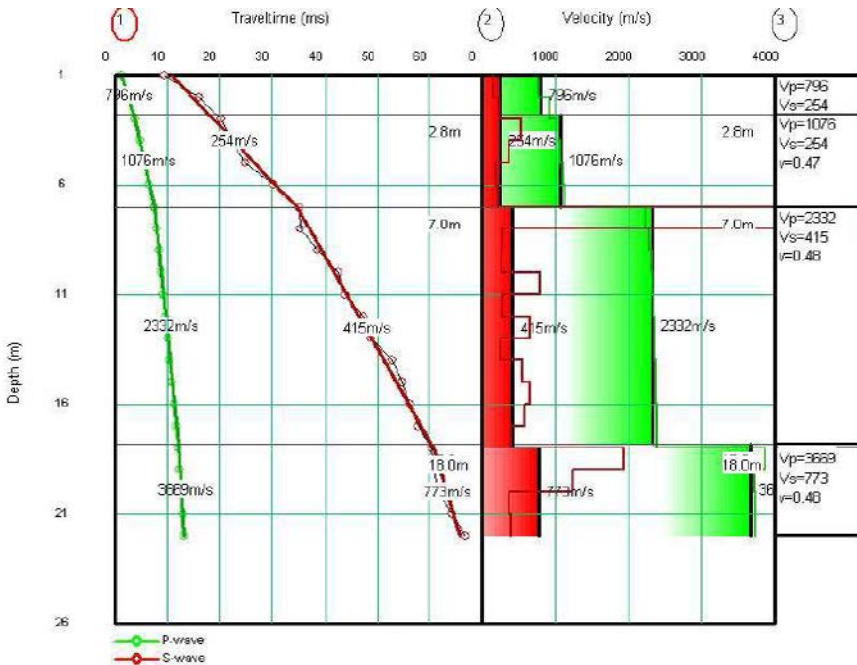


Figure 1.11 Illustration d'une analyse d'un downhole (DH) en ondes P et S suivant 4 tranches.

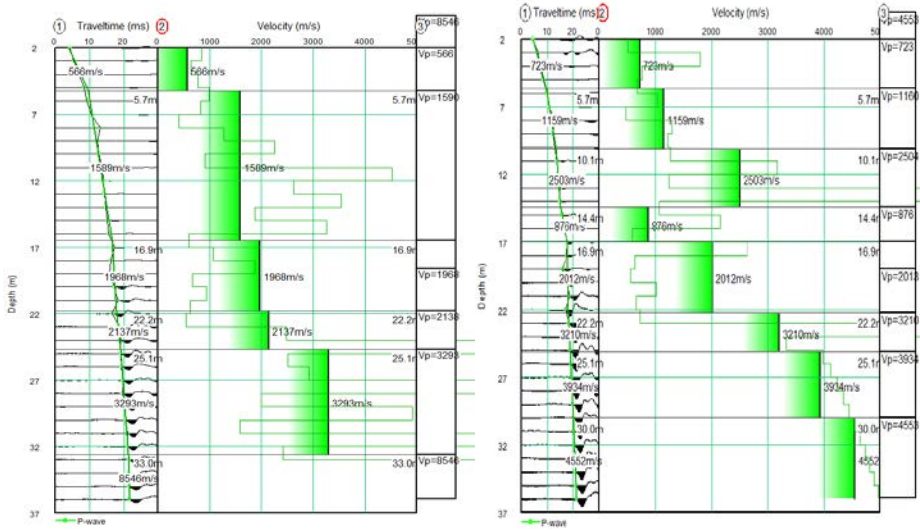


Figure 1.12 Illustration de la sensibilité de l'analyse d'un même downhole (DH) en fonction du choix des tranches.

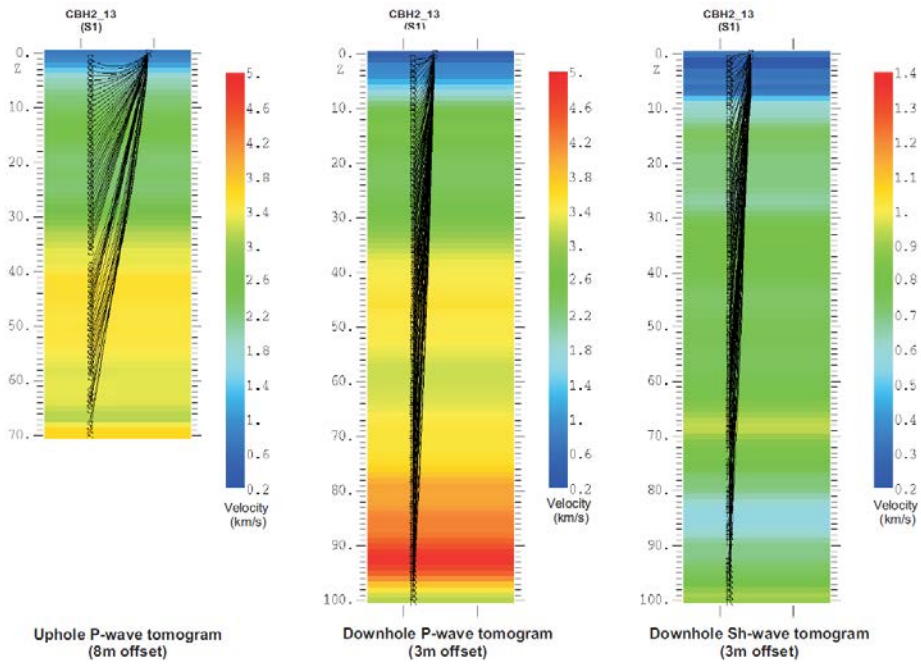


Figure 1.13 Résultat uphole et downhole après inversion avec le logiciel GEOTOMGC (Terradata pour EDF).

Afin de fiabiliser l'analyse des 10 premiers mètres, une approche par modélisation directe ou inversion itérative est possible (figure 1.13). C'est-à-dire qu'un calcul direct des temps de trajet, pour un modèle de vitesse donné, doit intégrer les trajets directs et réfractés. Ensuite, en fonction de l'écart entre les temps mesurés et les temps calculés, le modèle est ajusté. Cette itération est répétée jusqu'à ce que le critère d'erreur soit acceptable.

Actuellement, les logiciels du marché ne sont pas optimisés pour les mesures en forage et ils ne différencient pas directement les ondes directes et réfractées, mais considèrent des rais droits et courbes, les rais droits correspondant aux trajets transmis et les rais courbes aux ondes réfractées.

1.2.1.3 Cas particulier de l'offshore

Il est possible de réaliser un downhole P en mer dans un forage en trou nu, avec une source de type canon à air ou sparker proche de la surface. Trouver une source S opérationnelle au fond de l'eau et un capteur 3 composantes est nettement plus compliqué. Enfin, si le terrain est instable, le downhole P à travers le tubage non scellé de protection peut marcher si les terrains traversés sont suffisamment plastiques pour établir un couplage acceptable avec le tubage (figure 1.14).

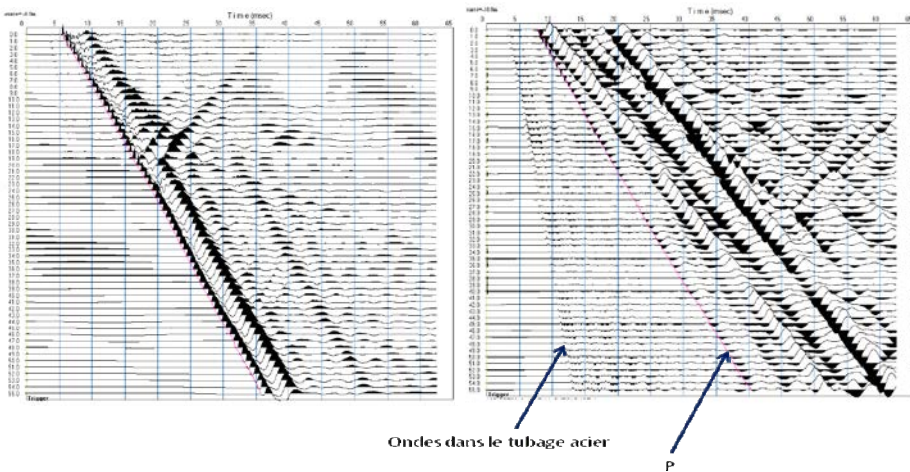


Figure 1.14 Downhole en mer dans un trou nu et à travers un tubage de protection non scellé (Fugro pour EDF).

1.2.2 Uphole

Un uphole est analogue à un downhole, mais avec la source dans le forage et le récepteur en surface. La pratique est plus limitée, car les sources S en forage génèrent un signal qui s'atténue sur une distance relativement courte. Même pour les ondes P , avec une source relativement puissante (sparker), il est nécessaire d'effectuer un grand nombre d'additions de tirs (stack). Toutefois, la figure 1.13 montre bien qu'en fonction du contexte, on peut arriver à des résultats intéressants en ondes P (graphe de gauche). Sinon, l'utilisation d'un uphole est intéressante lorsque la mesure est couplée à l'acquisition crosshole, car cela demande juste d'ajouter un capteur 3 composantes en surface.

1.2.3 Crosshole

Le principe consiste à mesurer les temps de trajet d'ondes sismiques compressives et cisailantes, transmises directement entre une source sismique dans un forage et un récepteur 3 composantes dans un forage voisin.

L'onde compressive (P) se propage dans le plan horizontal ainsi que la composante horizontale de l'onde cisailante (S_H). La composante verticale de l'onde cisailante (S_V) se propage dans le plan vertical. Donc, l'énergie de l'onde P et S_H est principalement répartie sur les récepteurs horizontaux et celle de l'onde S_V sur le récepteur vertical.

Le résultat d'une mesure crosshole est souvent pris aveuglément comme une référence, mais la méthode peut être confrontée aux limitations suivantes :

- être fortement affectée par des ondes réfractées dans des strates indurées proches ;
- présenter un « aliasing spatial », si l'épaisseur des bancs est inférieure à celle des intervalles ;
- être affectée par un fort pendage des formations ;
- être fortement affectée par une mauvaise cimentation (liaison tubage - coulis de scellement - formation) ;
- être fortement affectée par un endommagement dans l'environnement proche du forage.

En conséquence, il est préconisé d'effectuer un enregistrement downhole et/ou uphole pour compléter et valider le crosshole, dans l'hypothèse où l'anisotropie en grand est négligeable.

Cas particuliers

- Dans le cas d'une géologie fortement hétérogène, seule une tomographie sismique pourrait permettre d'apporter une information fiable, pour le profil d'ondes P . Dès lors, dans un milieu dont le caractère hétérogène est connu, il est également préconisé de réaliser une acquisition crosshole P additionnelle avec une flûte d'hydrophones de façon à pouvoir exploiter les données en

tomographie. Pour les ondes S, la mise en œuvre de plus de 2 capteurs ancrés est complexe dans le domaine géotechnique, il faut donc généralement se contenter de l'enregistrement downhole ou uphole.

- De même, si l'essai est réalisé dans un milieu dont la forte anisotropie horizontale est connue (bancs fracturés dans une direction donnée par exemple), le dispositif de mesures et l'interprétation des résultats doivent être adaptés (forages récepteurs à 90° avec des directions parallèles et perpendiculaires à celles de l'anisotropie).
- Enfin, si l'essai est réalisé dans un milieu dont la forte anisotropie verticale est en relation avec des bancs minces, le dispositif de mesures doit également comprendre une source spécifique S_H (sparker P- S_H).

1.2.3.1 Pré-requis

La qualité du scellement du tubage impacte bien plus fortement la mesure crosshole que downhole, car les signaux sont de plus haute fréquence.

Le calcul de la vitesse nécessite de connaître avec précision la distance entre les forages. Une erreur humaine est possible avec les mesures d'inclinométrie (figure 1.15) et un défaut de calibrage peut affecter les mesures de trajectométries (figure 1.16). Il est donc impératif d'appliquer en surface une procédure de contrôle des directions données par ces mesures.

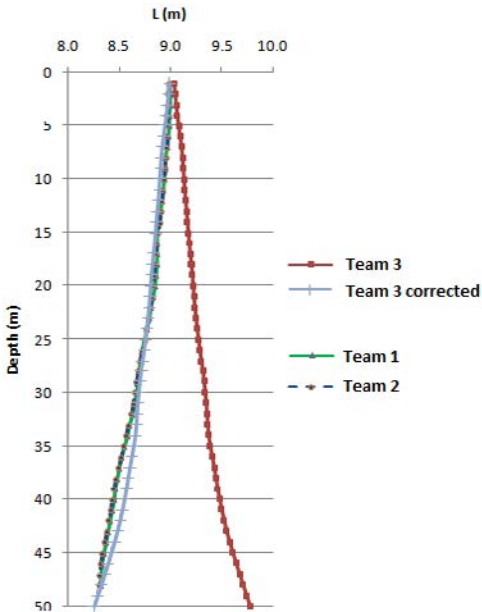


Figure 1.15 Exemple de résultat de 2 trajectométries distinctes et d'une inclinométrie dans un même forage (Projet Inter Pacific).

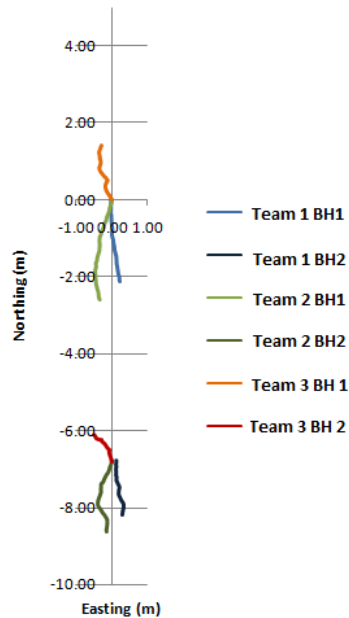


Figure 1.16 Exemple de résultat de 3 trajectométries distinctes dans un même forage (Projet Inter Pacific).

1.2.3.2 Dispositif d'acquisition

Il est nécessaire de dissocier l'acquisition et l'analyse des ondes en compression (P) et en cisaillement (S). Jusqu'au début des années quatre-vingt (figure 1.17), l'essai crosshole était réalisé au fur et à mesure de l'avancement du carottage émetteur par une frappe en tête du train de tiges. Cette méthode a évolué grâce au développement d'une sonde d'émission plaquée à la paroi du forage. Ceci a l'avantage majeur de dissocier les opérations de l'atelier de forage et celles de l'atelier géophysique. En revanche, cela ajoute des problèmes de couplage de la source.

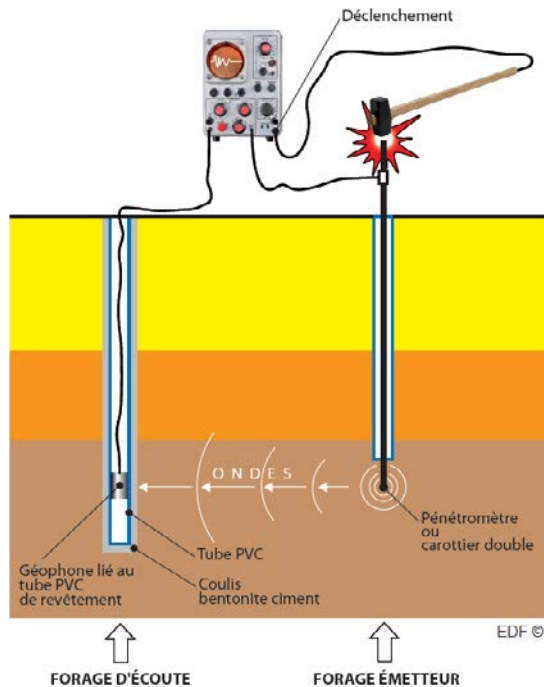


Figure 1.17 Dispositif historique de la mesure crosshole, appliqué en France jusqu'au début des années quatre-vingt.

La méthode crosshole classiquement préconisée (figure 1.18) nécessite trois forages afin de calculer la vitesse entre deux forages récepteurs en s'affranchissant de la connaissance précise du temps (t_0 , temps zéro) de génération de l'onde. Cette approche est aujourd'hui discutable, car d'une part, très souvent, l'atténuation est telle que le signal du deuxième forage est difficilement exploitable, d'autre part, l'enregistrement du tir n'est plus une limitation technique. Néanmoins, *ne travailler qu'avec un forage d'écoute nécessite plus de rigueur, notamment une chaîne de mesure calibrée*. À titre d'exemple, une dérive entre l'impulsion électrique et la génération d'un signal « sparker » (figure 1.19) est possible avec l'usure des électrodes.

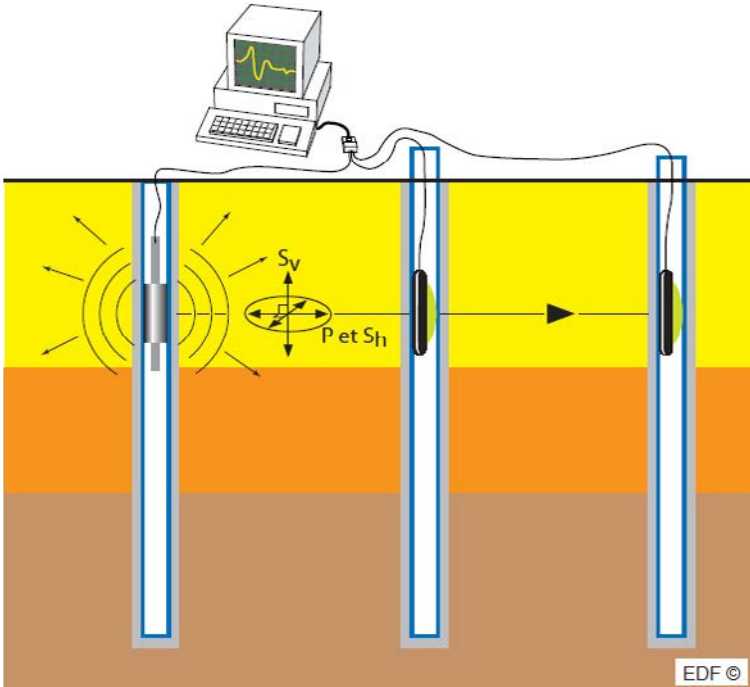


Figure 1.18 Illustration du dispositif crosshole à 3 forages.



Figure 1.19 Illustration d'une source P : sparker (SolGéo).

Par ailleurs, il est vrai qu'avoir un forage récepteur unique peut être pénalisant si l'on veut pointer le temps de première arrivée au maximum de l'amplitude de l'onde (apex) et non à son début. Certes cette technique permet de travailler avec des signaux dont le rapport signal sur bruit est moins bon. D'un autre côté, en raison de l'atténuation du signal, s'il est trop bruité, il peut être difficile d'identifier

le départ de l'onde et ce cas se rencontre plus généralement avec le signal du forage le plus lointain.

Sources

Pour maximiser l'énergie des ondes de cisaillement, une source mécanique (marteau-enclume) ou électromécanique (analogue aux sources de l'outil *PS Suspension Logging*, PSSL) ancrée à la paroi est préconisée (figure 1.20).



Figure 1.20 Illustration d'une source S mécanique (marteau-enclume Ballard) et électrodynamique (SolGéo, masse déplacée vers le haut ou le bas par un électroaimant).

Récepteurs

Pour l'onde P, l'énergie est répartie sur les composantes horizontales, ce qui peut générer des difficultés pour pointer les premières arrivées et nécessite une opération mathématique de polarisation, afin de projeter l'énergie dans la direction source-récepteur. Certains récepteurs peuvent s'orienter dans une direction donnée. Toutefois, le plus simple et robuste est d'utiliser des hydrophones pour mesurer l'arrivée P. Il est à noter que certains hydrophones sont directement équipés d'un système d'amplification pour optimiser la dynamique d'enregistrement.

Pour l'analyse des ondes S, seul un récepteur avec une composante est nécessaire. Toutefois, avoir un récepteur 3 composantes associé à la source mécanique permet, si besoin, de pouvoir vérifier la mesure P par le couple sparker-hydrophone (figure 1.21).



Figure 1.21 Hydrophone avec système d'amplification et géophone 3C avec système d'ancrage (Solgé).

L'échantillonnage

L'acquisition des données crosshole nécessite des pas d'échantillonnage en temps petits.

Un échantillonnage en temps de 50 μ s est acceptable pour les enregistrements des ondes S, en revanche les ondes P qui sont de plus haute fréquence nécessitent un pas d'échantillonnage plus petit pouvant être pris à 2,5 μ s (figure 1.22).

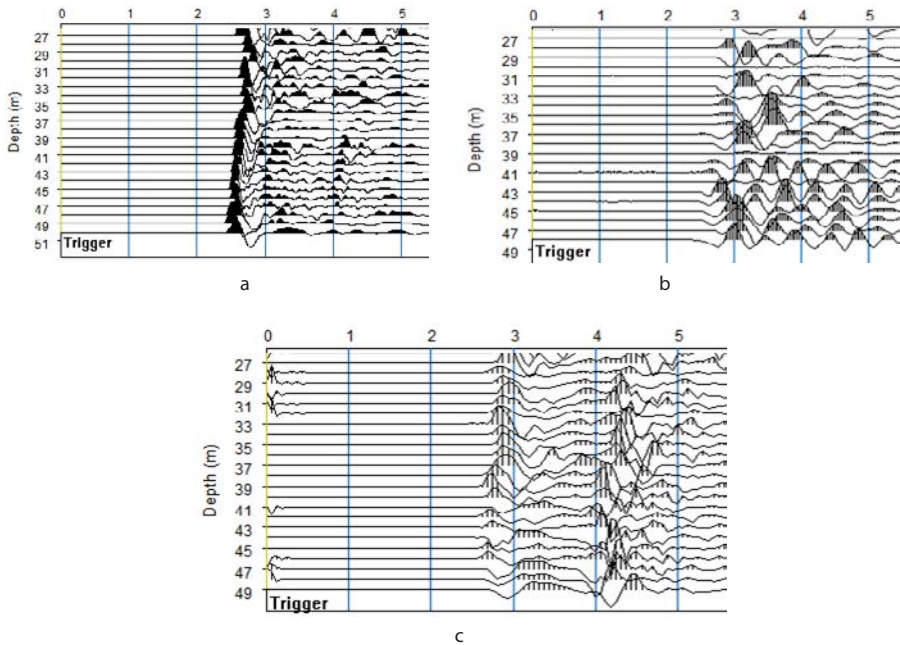


Figure 1.22 Enregistrement P dans un même forage respectivement avec un pas d'échantillonnage de 2,5 μ s (a), 32,25 μ s (b) et 62,5 μ s (c).

1.2.3.3 Analyse d'un crosshole

A priori l'analyse d'un crosshole est simple et robuste, il suffit de pointer la première arrivée de l'onde sélectionnée (P ou S) et de diviser ce temps de trajet par la distance source récepteur pour aboutir à la vitesse du milieu. Toutefois plusieurs points de vigilance sont décrits ci-après.

Comme nous l'avons vu au paragraphe sur les récepteurs, l'interprétation P avec des géophones nécessite la polarisation des traces horizontales, afin de maximiser l'amplitude du signal. Toutefois, il arrive que le résultat de cette opération soit moins lisible qu'une des deux composantes seule ou que l'opération soit complexe, comme lorsque le récepteur a six composantes horizontales.

Par ailleurs, dans des alluvions et notamment hors nappe, il arrive que l'atténuation des ondes P soit telle qu'elles ne se distinguent plus du bruit. Deux causes peuvent expliquer ce problème :

- En premier, le forage et la cimentation sont délicats dans ce type de terrain et, en fonction de la technique de forage utilisée, le résultat de la cimentation peut être très variable. Pour ce type de terrain, le risque est d'avoir un annulaire de ciment épais et non adhérent à la formation, ce qui peut créer un guide d'onde filtrant plus les ondes P que les ondes S, car elles sont de plus haute fréquence (souvent 1 000 Hz contre 200 Hz). Pour limiter cet effet, un carottier sonique peut être préconisé, afin de ne pas trop déstructurer les terrains.
- En second, la source mécanique génère une énergie en ondes P insuffisante pour ce type de terrain très atténuant, il faut donc préférer une source plus puissante pour les ondes P, comme un sparker.

La figure 1.23 illustre les propos précédents. Les deux crossholes ont été réalisés dans des sites distincts, mais tous deux avec une couverture d'alluvions gravelo-sableuses respectivement jusqu'à 22 m et 21,6 m, recouvrant un substratum argileux ou marneux.

Dans les deux cas, on constate un changement du contenu fréquentiel entre les alluvions (signal de basse fréquence) et le substratum (signal de haute fréquence). Toutefois, dans le deuxième cas, les premières arrivées identifiables sur les 19 premiers mètres ne sont pas des ondes P, car les temps correspondent avec ceux des ondes S pointés sans doute sur les composantes horizontales. En revanche, dans le premier cas, il est possible d'identifier des arrivées P sur toute la hauteur.

L'atténuation affecte surtout les récepteurs lointains dans les crossholes avec plusieurs forages récepteurs. Ceci justifie de réaliser une acquisition avec une source spécifique P plus puissante qu'une source mécanique, qui est faite pour maximiser l'énergie des ondes S. De plus, limiter le crosshole à deux forages est tout à fait possible, mais uniquement à condition de s'assurer de la cohérence des résultats avec ceux d'un downhole et/ou uphole faits dans un des deux forages.

La méthode crosshole peut être également affectée par des ondes réfractées (notamment quand l'offset est supérieur à 6 m). L'exemple présenté figure 1.24 illustre qu'il est possible de détecter des ondes réfractées et de confirmer leur existence

uniquement à partir de l'analyse visuelle des signaux, croisée avec l'information des carottes.

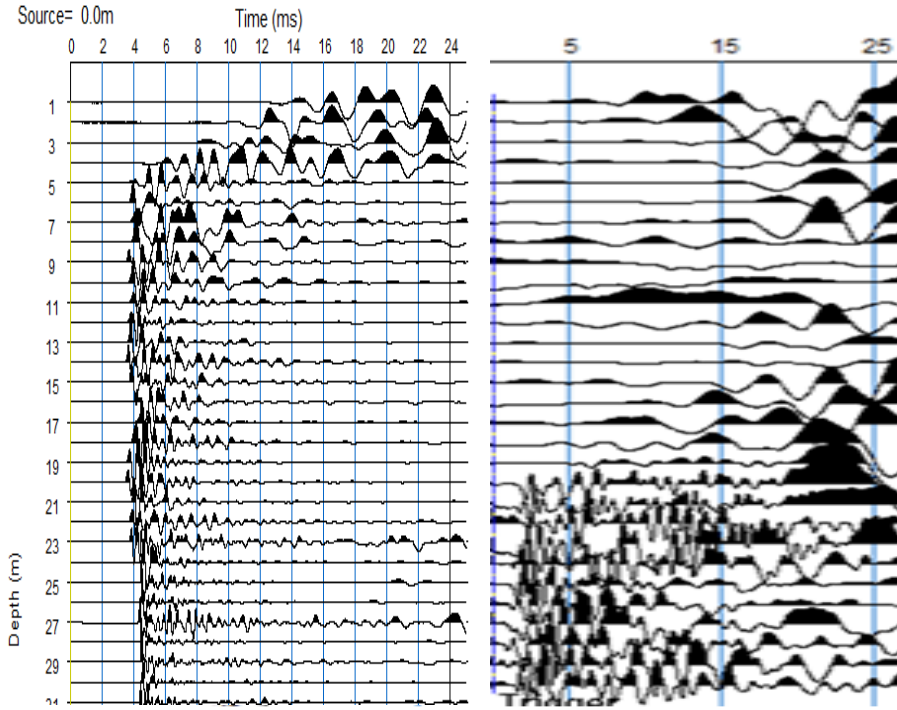
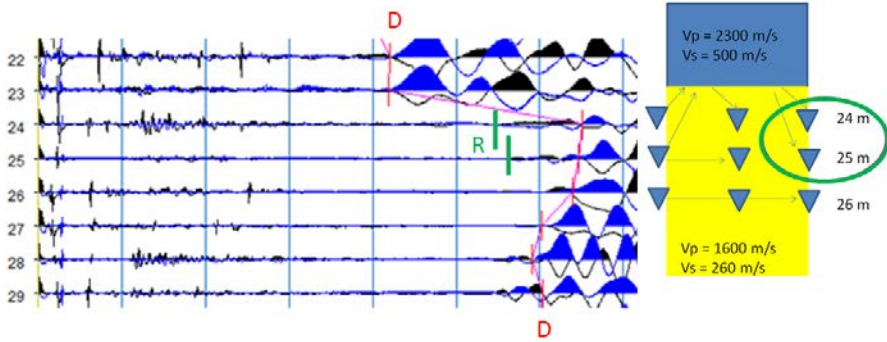


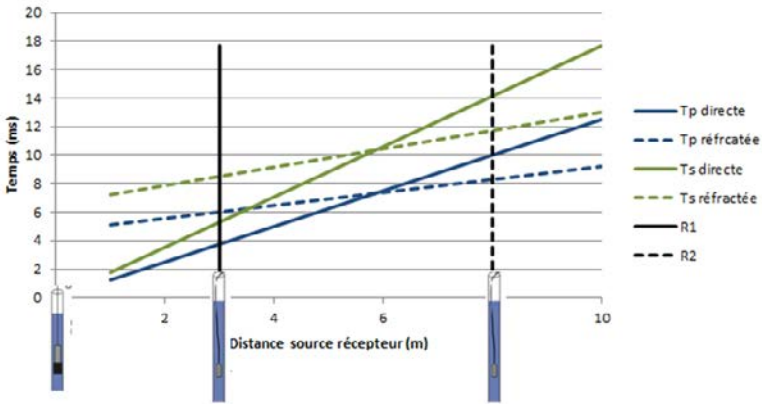
Figure 1.23 Exemples d'enregistrements crosshole. À gauche : crosshole P (Inter Pacific, nappe à 3 m). À droite : site EDF (nappe à 6 m).

Sur l'enregistrement du crosshole en ondes S, en partie gauche de la figure 1.24a, on constate une première arrivée S rapide à 22 et 23 m de profondeur (pointée en rouge). Plus en profondeur, cette arrivée S est plus tardive. Il y a donc deux milieux dont les vitesses S peuvent être calculées respectivement à 500 et 260 m/s (voir modèle de vitesse à droite). Directement sous la formation rapide, à 24 et 25 m de profondeur, on observe une première arrivée peu énergétique (pointée en vert). Il s'agit d'une arrivée réfractée, l'arrivée transmise (pointée en rouge) gardant la même phase. Le phénomène peut s'expliquer en calculant les dromochroniques par exemple à 2 m de l'interface entre les 2 milieux (soit 25 m de profondeur, voir figure 1.24b). Sur la figure 1.24b, On constate qu'à la distance du premier forage ($X = 3$ m) l'onde directe (P : trait bleu plein ; S : vert plein) arrive en premier alors que dans le deuxième forage ($X = 6$ m) elle arrive après l'onde réfractée (tirets bleus pour l'onde P et vert pour l'onde S). En réalisant cette analyse à 24 et 26 m de profondeur, on peut alors dessiner les trajets les plus rapides illustrés par les flèches vertes à gauche de la figure 1.24a.



a

Hodochrones d'un cross-hole



b

Figure 1.24 Exemples de « crosshole ». a : à gauche, enregistrements S entre 22 et 29 m de profondeur et à droite modèle géologique associé. b : dromochrones P et S en considérant un niveau de mesure à 2 m de l'interface avec une strate plus rapide (basé sur le modèle en bas à droite).

L'approche ci-dessus nécessite du temps et de l'expérience. Elle est donc difficilement généralisable à toutes les prestations de ce type. La norme ASTM préconise plutôt la mise en œuvre d'une analyse informatique pour prendre en compte les différents trajets possibles (inversion). Dans les faits, ceci n'était pas appliqué en France, mais commence à l'être depuis 2015.

La figure 1.25 présente un exemple de résultats de tomographie obtenus avec logiciel d'inversion.

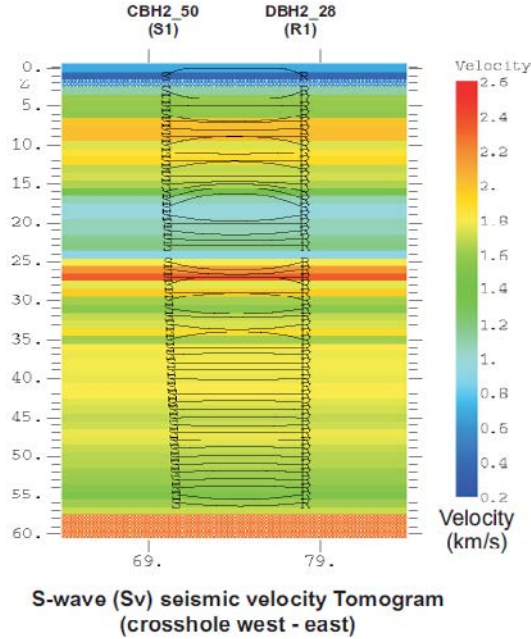


Figure 1.25 Résultat crosshole après inversion avec le logiciel GEOTOMGC (Terradata pour EDF).

1.3 La mesure V_s par diagraphies

1.3.1 *Diagraphies acoustiques de haute résolution verticale*

En géotechnique, les outils de diagraphie utilisables sont en général d'un petit diamètre (< 50 mm) et non empilables, comme cela est pratiqué dans le domaine de l'exploration pétrolière. Les sondes acoustiques classiquement utilisées sont donc des sondes courtes (3,5 m), composées d'un émetteur piézo-électrique à haute fréquence (10 à 40 kHz), de type monopôle (voir chapitre 3). Il est rappelé que cela veut dire que la source est omnidirectionnelle et qu'elle génère des ondes P dans le fluide. Ces ondes sont réfractées (P, S) au niveau de la paroi du forage et des modes guidés y apparaissent également. Il s'agit en particulier de l'onde de Rayleigh pour une interface solide-air et de l'onde de Scholte-Stoneley pour l'interface solide-fluide. Dès lors, l'existence d'ondes de cisaillement réfractées implique que la vitesse P du fluide soit inférieure à la vitesse S de la formation pour un forage en trou nu. La mesure V_s en diagraphie acoustique est donc préconisée pour une formation rapide.

Lorsque la formation est lente (V_s formation $<$ V_p fluide), les ondes de Scholte-Stoneley peuvent permettre d'estimer les vitesses S avec un outil acoustique. Il est tout de même nécessaire d'avoir ponctuellement le moyen de caler la conversion entre les vitesses de Scholte-Stoneley et celles de cisaillement (par exemple log downhole avec un espacement plurimétrique entre points de mesure).

La figure 1.26 est un exemple de diagraphie sonore de type Full Wave (*Full Wave Sonic*, FWS) obtenue avec un outil monopôle. La figure montre à droite la section acoustique obtenue avec un déport source récepteur de 4 ft et à gauche les logs de vitesse des différents trains d'onde (réfractée P, réfractée S et Stoneley).

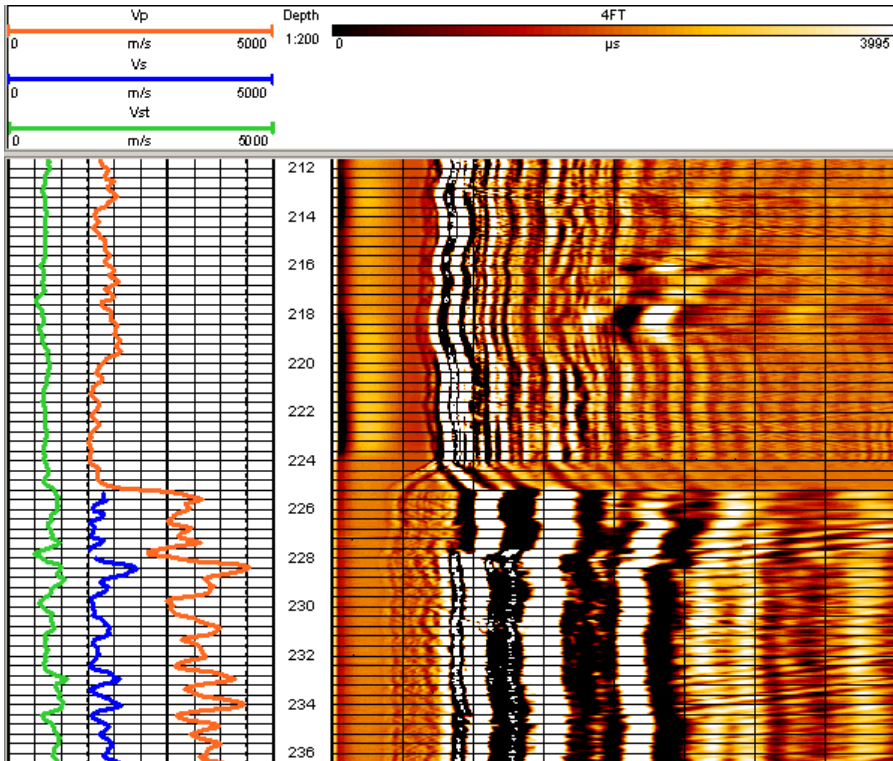


Figure 1.26 Exemple d'enregistrement FW sonic (monopôle), montrant une première arrivée P peu énergétique dont le temps d'arrivée diminue nettement après 225 m (entrée dans le rocher), l'arrivée S n'est visible qu'en dessous de 225 m où le milieu a une vitesse considérée comme rapide par rapport à la boue (rocher) (SEMM logging pour EDF).

En formation lente, la mesure des vitesses S ne peut pas être obtenue en utilisant des outils de type monopôle. Les pétroliers ont développé des outils de type dipôle comprenant des émetteurs et des récepteurs polarisés qui génèrent et enregistrent

des ondes de flexion dont la vitesse de propagation est proche de la vitesse S de la formation (voir chapitre 3). Le problème est que ces outils du domaine pétrolier sont rigides et de grande longueur. En revanche, il existe une adaptation souple pour le domaine de la géotechnique : le PSSL.

1.3.2 PS Suspension Logging (PSSL)

PS Suspension Logging (PSSL) est une sonde de diagraphie souple, dont la mesure est non continue, contenant une source électromécanique de forage et deux récepteurs (voir chapitre 3).

Il est à noter que les fréquences utilisées par le PSSL permettent d'effectuer une mesure dans un forage avec un tubage PVC. Les vitesses des ondes sismiques sont calculées à partir de la différence entre les temps d'arrivée entre les deux récepteurs (Near et Far) espacés de 1 m. De ce fait, l'outil nécessite d'être centré dans le forage, mais étant donné qu'il est souple (figure 1.27) et qu'il peut être difficile d'avoir des centreurs adaptés au forage, cette condition n'est pas toujours réalisée.



a



b

Figure 1.27 Outil PSSL. a : Mise en place d'un outil PSSL avec une sondeuse toujours mobilisée (Fugro pour EDF). b : Centreur type de l'outil PSSL.

Or, dans un forage vertical, tous les outils de diagraphie tournent pendant la remontée et quand la paroi est inclinée, ils se calent dans la partie inférieure de la paroi. De plus, lorsqu'un forage est incliné, classiquement il y a un surcreusement de la formation lié au frottement du train de tiges (*reaming*) et ceci implique une anisotropie de l'épaisseur du coulis de ciment autour du tubage. Dans le cas de la figure 1.28, cette cause peut expliquer les écarts observés entre des mesures PSSL et downhole entre 75 à 120 m de profondeur, notamment au droit de la formation argileuse à 75 m, classiquement favorable au développement de « caves ».

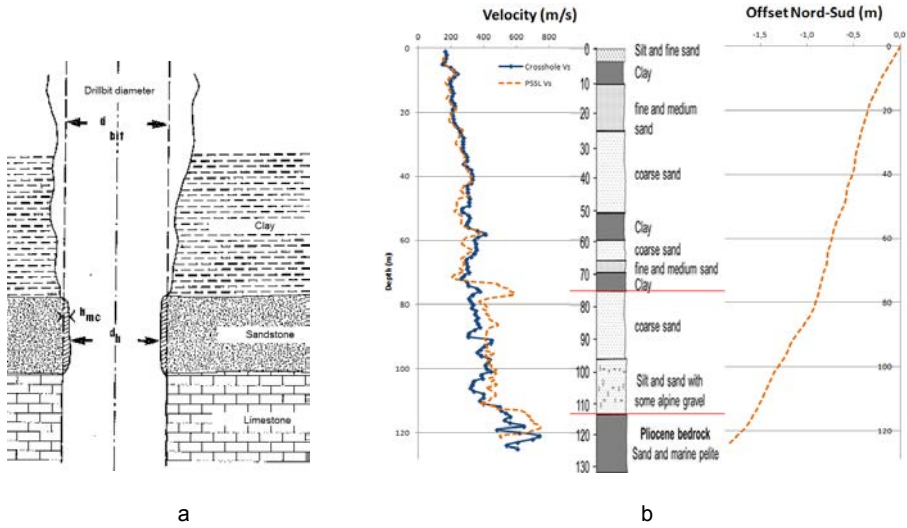


Figure 1.28 Outil PSSL et downhole DH. a : Caliper evolution in function of ground drilling (O. Serra, 1979). b : Mirandola, zoom on DH S results vs PSSL, geology and deviation.

Ceci montre que l'analyse d'un PSSL nécessite également de pouvoir contrôler le diamètre (caliper) et la déviation du forage (trajectométrie), car lorsque son inclinaison dépasse 30° la mesure PSSL semble faussée. Enfin, en raison de la longueur d'un PSSL (5 à 7 m) et de la difficulté à réaliser un scellement qui n'envahisse pas trop la formation notamment hors nappe, en trou tubé, il est fréquemment observé un écart entre la mesure crosshole ou downhole et PSSL dans les 10 premiers mètres. La figure 1.29 illustre parfaitement cela.

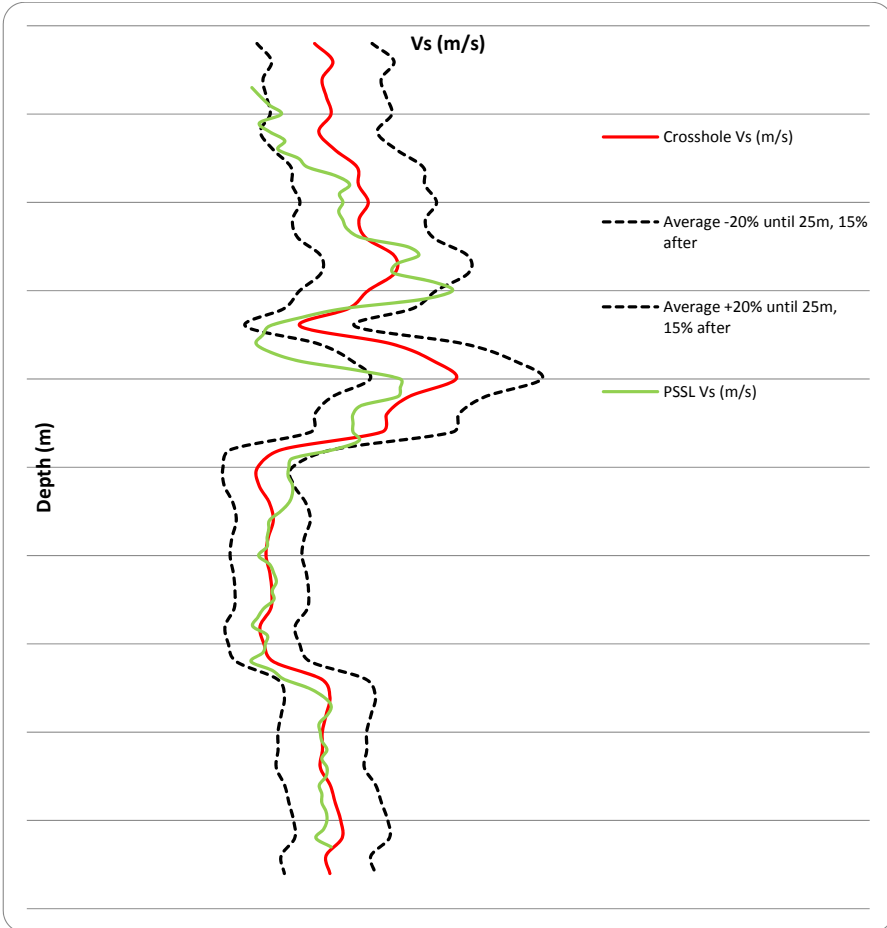


Figure 1.29 Log crosshole versus PSSL dans un forage tube (Inter Pacific, Grenoble).

Enfin, il est à noter que manifestement la puissance entre les différentes sondes du marché n'est pas la même. En effet, les deux acquisitions illustrées en figure 1.30 ont été faites sur un même site offshore, dans des forages en trous ouverts différents mais toutefois très comparables. Avec la première sonde, les oppositions de phase sont nettes pour les ondes S en dessous de 10 m de profondeur, alors que le film de la seconde sonde est inexploitable. Les performances de toutes les sondes PSSL ne sont donc pas comparables et une étude comparative reste à mener.

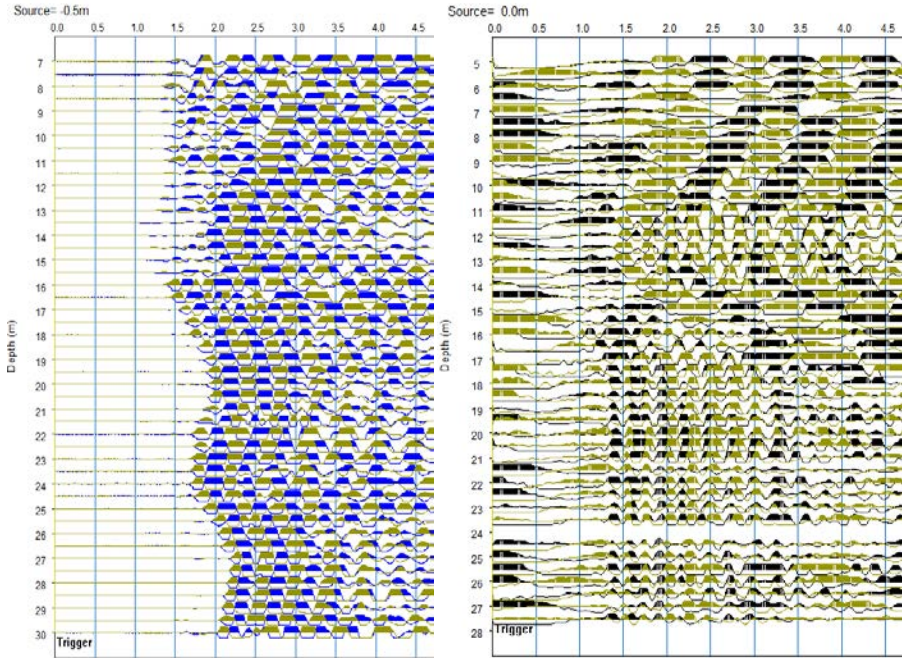


Figure 1.30 PSSL en collection traces des composantes H sur 4,5 ms, dans deux forages distincts mais d'un même site homogène en mer, avec la sonde A et la sonde B (EDF-EN).

1.4 Cas d'étude d'une acquisition downhole, PSSL et de diagraphie acoustique, dans un même forage

Le forage étudié est complexe dans la mesure où il est relativement profond (280 m), traverse des terrains hors nappe et sous nappe (nappe à 3 ou 4 m), des formations instables nécessitant de tuber le forage (alluvions) et des terrains stables lorsque le trou de forage est maintenu par une boue à base de bentonite, puis enfin du rocher après 225 m de profondeur. Cette forte variabilité des conditions géologiques et des conditions de forage a nécessité d'anticiper la mise en œuvre de différentes techniques de mesure de la vitesse des ondes sismiques en forage. Au final, le résultat validé illustre parfaitement le domaine préférentiel de chaque méthode. À savoir :

- le log downhole est adapté pour un forage traversant des formations instables et équipé d'un tubage PVC ;

- le log PSSL est adapté pour un forage à travers une formation « lente », dont le trou est maintenu nu grâce à un fluide à base de bentonite ;
- la diagraphie acoustique est adaptée pour des formations « rapides », du rocher.

La continuité entre les mesures en trou tubé et trou nu a été réalisée par une portion de downhole en trou ouvert (voir les pointillés orange sur le « log downhole » de la figure 1.31) ; il aurait également été possible de réaliser un PSSL en trou tubé.

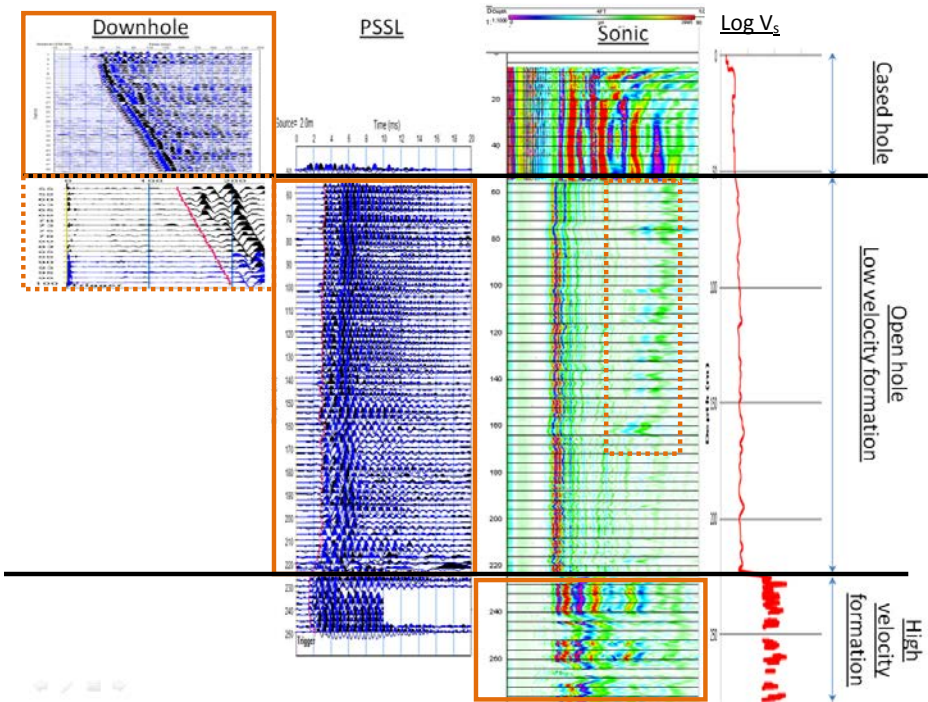


Figure 1.31 Log V_s (rouge) obtenu à partir d'un downhole, PSSL et d'un « sonic FWF ».

La continuité entre les mesures en formation lente et rapide a été réalisée avec l'enregistrement des ondes de Stoneley qui sont très nettes entre 55 et 160 m (voir les pointillés orange sur le « log sonic » de la figure 1.31).

Le log final combine la mesure downhole entre 0 et 50 m, la mesure PSSL entre 55 et 225 m puis la mesure acoustique entre 225 et 280 m voir les rectangles orange de la figure 1.31).

Tableau 1.5 *Mesure de vitesses (V_p , V_s) et outils (DH, sonic, PSSL).*

Profondeur (m)	Particularité	V_p			V_s			$V_{stonley} \Rightarrow V_s$
		DH	Sonic	PSSL	DH	Sonic	PSSL	Sonic
0-50	tubage							
55-100	formation lente, trou nu							
100-225	formation lente, trou nu							
225-280	rocher, trou nu							

Le tableau 1.5 résume les mesures validées avec en vert foncé celles retenues pour établir le log V_s et en vert clair celles qui permettent de vérifier la continuité entre les différentes techniques appliquées. La figure composite 1.31 illustre toutes ces conclusions pour la mesure S.

1.5 Conclusion

Ce document a permis de détailler la méthodologie d'acquisition et d'analyse des mesures invasives en forage de type downhole, uphole, crosshole et des diagraphies. Un regard nouveau est apporté par rapport aux normes ASTM notamment sur :

- la possibilité de contrôler la cimentation ;
- la nécessité de mettre en place des procédures de calibration pour la chaîne de mesure géophysique et les outils de trajectométrie ou inclinométrie ;
- l'impact des ondes de tube en downhole ;
- la possibilité de travailler avec deux forages en crosshole, sous réserve d'un certain nombre de précautions ;
- la nécessité de dissocier l'acquisition P et S, que ce soit en downhole ou en crosshole ;
- la nécessité de réaliser une analyse en deux phases afin d'éviter des artefacts liés aux trajets réels ou aux ondes réfractées.

Pour une reconnaissance profonde où il est possible de conserver un trou nu, incontestablement le PSSL est à préconiser. La mesure peut être complétée par un log Sonic FWF en ondes de Stoneley afin d'améliorer la résolution verticale. Toutefois, il reste préférable d'avoir une redondance de donnée dans les premiers mètres, avec un downhole ou crosshole, car généralement cette portion est tubée, hors nappe, et un envahissement de la formation par le coulis faussant la mesure PSSL ne peut pas être exclu. Sur la hauteur du forage, il est également préconisé de réaliser un « caliper » ainsi qu'une mesure de déviation (trajectométrie).

Enfin, le choix de la sonde PSSL est important, car les performances de toutes les sondes PSSL ne semblent pas comparables. Une étude détaillée des performances de ces sondes reste à mener.

Références

- ASTM D4428/D4428M-14, 2014, Standard test methods for Cross-Hole seismic testing. West Conshohocken (PA): ASTM International, www.astm.org.
- ASTM D7400-14, 2014, Standard test methods for Down-Hole seismic testing. West Conshohocken (PA): ASTM International, www.astm.org.
- Bourbié Th., Coussy O., Zinszner B., 1986, *Acoustique des milieux poreux*. Éditions Technip, Paris.
- Eurocode 8, Calcul des structures pour leur résistance aux séismes, 2005.
- Garofalo F., Foti S., Hollender F., Bard P.Y., Cornou C., Cox B.R., Dechamp A., Ohrnberger M., Perron V., Sicilia D., Teague D., Vergniault C., 2016, InterPacific project: Comparison of invasive and non-invasive methods for seismic site characterization. Part II: Inter-comparison between surface-wave and borehole methods, Soil Dynamics and earthquake Engineering.
- SeisImager downhole manual, 2013, *Windows Software for Analysis of Downhole Seismic, Pickwin v. 5.1.0.5, PSLog v. 2.0.0.3, Manual v. 1.2.*