

Le forage sonique : sa compréhension, ses applications et les retours d'expériences

Sonic drilling : its understanding, its applications and the returns of experience

Basile LECONTE^{1*}, Aurélien PRUGNAUD²

1 Soletanche Bachy France, Rueil Malmaison, France

2 Soletanche Bachy International, Rueil Malmaison, France

**basile.leconte@soletanche-bachy.com*

RESUME : Si les premiers développements du forage sonique datent du début du 20^{ème} siècle, il s'est surtout démocratisé et développé en France ces 20 dernières années. Dès 2005, Soletanche Bachy s'intéresse à la technique, promue sous le nom de « Hi'Drill® », et investit dans sa compréhension et la diversification de ses applications. Après 20 années de développement, Soletanche Bachy lève le voile sur une technique encore mal connue. Cet article partage l'état des connaissances acquises et les retours d'expériences de Soletanche Bachy sur la méthode Hi'Drill®.

ABSTRACT : While the first developments in sonic drilling date back to the early 20th century, it has become particularly widespread and developed in France over the last 20 years. From 2005, Soletanche Bachy has been interested in the technique, promoted under the name "Hi'Drill®", and has invested in understanding it and diversifying its applications. After 20 years of development, Soletanche Bachy is now shedding light on this still relatively unknown technique. This article shares the current state of knowledge and feedback from Soletanche Bachy with the Hi'Drill® method.

Mots-clés : Sonique ; Hi'Drill® ; forage ; vibration ; fréquence

1 INTRODUCTION

Soletanche Bachy a toujours été une société tournée vers l'innovation technologique. Le développement des systèmes mécaniques soumis à des vibrations courant du 20^{ème} siècle a permis d'aboutir à des têtes de forage sonique robustes et efficaces. Ces têtes de rotation d'un nouveau genre, alliant la vibration à la rotation, ont rapidement attiré l'attention de Soletanche Bachy. En effet, la technologie, principalement utilisée en reconnaissance de sol, laissait entrevoir beaucoup de possibilités. Les premières collaborations et les premiers essais menés par Soletanche Bachy ont débuté en 2005 et l'entreprise a fait l'acquisition d'une première tête en 2008. Depuis, l'entreprise n'a cessé d'investir dans cette technique afin de mieux comprendre son fonctionnement mais aussi de la faire évoluer afin d'élargir son champ d'application. Le procédé a été promu sous le nom de forage « Hi'Drill® ». Le groupe dispose aujourd'hui de plusieurs dizaines de têtes Hi'Drill®.

2 UN PEU D'HISTOIRE

L'histoire remonte au début du 20^{ème} siècle et commence avec un ingénieur roumain, George Constantinesco, qui émigre à Londres en 1910. Il y publie en 1913 une « Théorie du Sonique », dans laquelle il traite de la transmission de forces sinusoïdales dans les solides, les liquides et les gaz. La même année, il présente au public un prototype de machine sonique fonctionnant avec un système à percussion. Au contraire des machines pneumatiques conventionnelles, son prototype pouvait forer dans du granite dur avec beaucoup moins de bruit. Vingt ans plus tard en 1930, le Docteur Ion Basgan, un autre ingénieur roumain, essaye de faire vibrer les trains de tiges de foreuses conventionnelles. Les résultats sont très positifs puisque la vitesse de pénétration mais aussi la profondeur atteignable sont plus grandes. De plus, le forage montre moins de déviations. Ceci mène la Drilling Research Inc. des Etats-Unis à conduire davantage de recherches sur le développement du forage sonique pour en faire bénéficier l'industrie pétrolière nord-américaine qui cherche à accroître ses vitesses de forage. Ces efforts se poursuivent jusqu'en 1958, date à laquelle le financement de la Drilling

Research prend fin. L'Américain Albert Bodine continue alors à travailler sur des machines vibratoires de grande puissance dont le forage constitue l'un des multiples usages. Financé par la Shell, il se concentre essentiellement sur la conception de vibrofonçeurs, mais son équipe réalise une tête vibratoire plus petite destinée au forage des trous accueillant les tirs sismiques. Le financement de la Shell s'arrête à la fin des années 1960 et, au début des années 1970, Albert Bodine vend tous ses équipements de forage au constructeur aéronautique britannique Hawker Siddeley dont les bureaux sont au Canada.

L'équipe de Hawker Siddeley se concentre essentiellement sur le perfectionnement du vibrofonçage, mais essaye également d'adapter la tête sonique utilisée pour les tirs sismiques aux forages tout-terrain de faible profondeur. Entre 1974 et 1983, 12 foreuses dotées de têtes soniques sont construites, mais les machines résistent mal aux vibrations et essuient de nombreuses pannes. Finalement, avec la récession des années 1980, Hawker Siddeley décide d'abandonner les efforts de R&D sur le sujet. Ray Roussy, l'un des concepteurs, démissionne alors pour continuer à travailler sur la tête sonique. Il y apporte de nombreuses améliorations pour prouver l'intérêt de sa nouvelle technologie à l'industrie de l'exploration souterraine. Il construit sa propre tête sonique ainsi que sa propre foreuse et crée sa propre société : Sonic Drilling Ltd, qui deviendra Sonic Drill Corporation en 1985.

3 PRINCIPE DU FORAGE SONIQUE

Le forage sonique s'appuie sur l'utilisation d'une tête spécifique. Par rapport aux têtes de rotation ou de roto-percussion classiques, elle se distingue par sa décomposition en trois parties principales. Une partie rotation (Figure 1 (3)), qu'on retrouve sur les autres types de têtes. Une partie vibration (Figure 1 (1)), composée de deux balourds qui tournent de façon contrarotative, de manière à engendrer une vibration dans l'axe des tiges. Et enfin un amortisseur (Figure 1 (2)) entre ces deux parties, qui permet de transmettre uniquement les vibrations au système de forage et pas à l'ensemble de la machine.

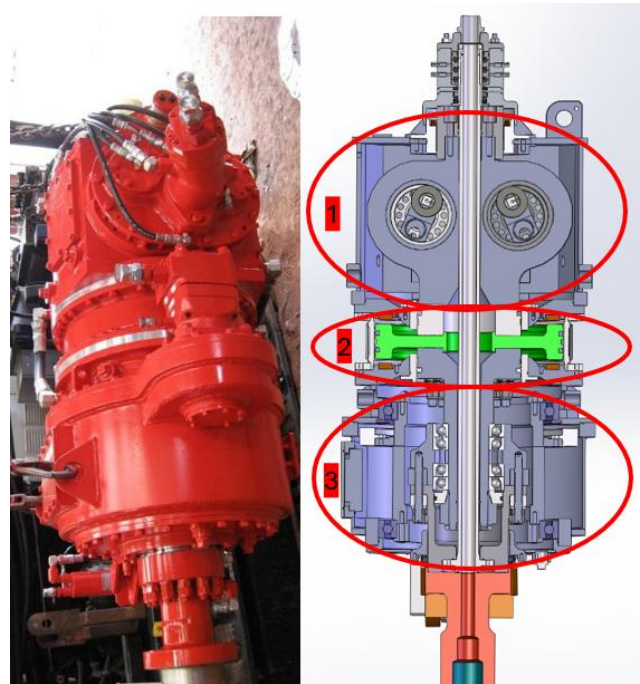


Figure 1. Vue et coupe d'une tête Hi'Drill®

Les vibrations permettent d'induire au sein du train de tige un phénomène de résonance, de façon à créer une onde stationnaire qui va générer une force destructive au niveau de l'outil et donc au niveau du terrain, rendant la perforation plus efficace.

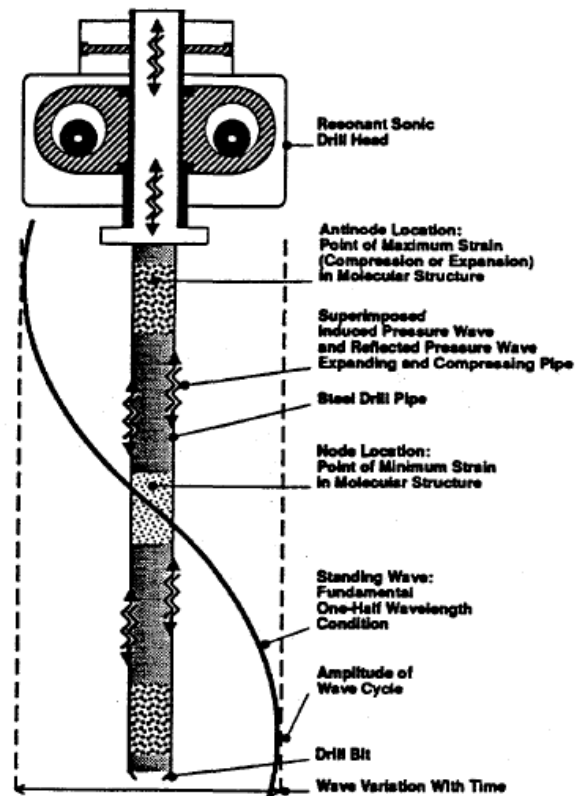


Figure 2. Principe de résonance en forage sonique

Généralement, on distingue les têtes soniques des têtes vibrantes par leur fréquence de vibration, les premières permettant d'atteindre des fréquences supérieures à 100 Hz propices au développement du phénomène de résonance alors que les secondes ont, avec des fréquences plus faibles autour de 70Hz, un mode fonctionnement intermédiaire entre la frappe et la résonance.

4 DÉVELOPPEMENT DU CHAMP D'APPLICATION EN GÉOTECHNIQUE

En 20 ans, Soletanche Bachy a su appréhender le forage sonique afin d'améliorer ses connaissances et son savoir-faire. Cette approche a permis de décliner le procédé Hi'Drill® vers d'autres applications.

4.1 L'utilité initiale du forage sonique

Historiquement, le forage sonique est principalement dédié aux sondages de reconnaissance par carottage. La technique est adaptée à tous les types de terrains même le rocher. Elle ne nécessite pas (ou peu) de fluide de forage permettant ainsi la récupération d'échantillons très représentatifs en termes de chimie (domaine environnemental) et de granulométrie (domaine géotechnique). Aussi, les taux de récupération sont généralement meilleurs ainsi que les rendements.

Quelques utilisations dans le domaine géotechnique commencent à apparaître.

La technique trouve également un intérêt croissant dans la géothermie, notamment au Canada.

En France, le forage sonique est principalement utilisé en reconnaissances de sol et de roches jusqu'au début des années 2000.

4.2 Application dans le domaine des travaux géotechniques

Les premières utilisations de l'Hi'Drill® sont proches du carottage en ce sens ou le forage est réalisé avec des tubages spécifiques (matière et filetages) équipés d'une couronne ouverte en guise d'outil. À l'image du carottage, la couronne génère une dépouille faible de l'ordre de quelques millimètres seulement. Cette approche a essentiellement trouvé son utilité dans la réalisation de forages nécessitant un équipement (tirant, micropieu, injection). En effet, le forage est tubé (sans tiges) et libère ainsi un passage intérieur permettant l'équipement sans risquer d'instabilité de terrain.



Figure 3. Couronne Hi'Drill®

Plusieurs campagnes d'essais ont permis les constats suivants :

- Les déviations en l'Hi'Drill® sont très faibles en comparaison aux méthodes de forage traditionnelles.
- Le fluide de forage (souvent de l'eau) combiné à la vibration déstructure le terrain à l'avancement. Sans fluide de forage, le terrain remonte dans le tubage par carottage.
- À mesure que le diamètre de forage (tubages et couronne) augmente, le phénomène de carottage devient plus important et cela malgré le recours à un fluide de forage. Les vitesses d'avance s'en trouvent considérablement affectées d'autant plus que la pression de fluide augmente (pression mesurée dans la ligne de forage et non dans l'annulaire) s'opposant de fait à la poussée. Les couronnes ouvertes sont alors remplacées par des outils permettant de déstructurer mécaniquement le terrain (outil pleine face par exemple). Ce constat est d'autant plus valable dans les terrains cohésifs (argiles, marnes, rochers ou encore béton). De tels outils ne permettent plus la mise en place d'équipement à moins qu'ils ne soient perdus (largués dans le terrain en fin de forage).



Figure 4. Outil pleine face Hi'Drill®

4.3 Les évolutions au travers des essais réalisés

4.3.1 Les évolutions empiriques

L'Hi'Drill® est une technique propice à l'innovation et à l'exploration. Un grand nombre d'essais ont été réalisés depuis le début de son développement.

Nous avons ainsi pu tester de nouveaux outils tels que les trilâmes, les tricônes, outils étagés de d'alésage ou encore les taillants. L'objectif de ces essais était à la fois d'apprécier la résistance de ces outils face à l'énergie de vibration mais aussi leur efficacité lorsqu'ils sont associés à la méthode Hi'Drill®. Différentes qualités d'outils ont été testées afin d'apprécier également la possibilité d'utiliser des outils perdus peu coûteux et donc de moindre qualité.



Figure 5. Outil étagé alésage Hi'Drill®

D'une manière générale, le fait d'avoir une dépouille plus importante ne pose pas de problème vis-à-vis de la propagation des ondes. Aussi, les outils résistent bien à l'énergie de vibration dès lors qu'ils sont adaptés au terrain foré. Bien entendu, la durée de vie de l'outil est fonction du terrain (nature, dureté, abrasivité, ...), de l'intensité de la vibration mise en œuvre et de la qualité de l'outil. Aussi, dans certains terrains (notamment le rocher ou le béton), on note des rendements bien supérieurs à ceux que l'on peut faire en rotary classique ou avec des techniques de roto-percussion. À titre d'exemple, l'Hi'Drill® avec tricône à l'eau a été utilisé sur le chantier du TELT jusqu'à des profondeurs de 135m dans le rocher (schiste, quartzite et conglomérat). Le forage a donné entière satisfaction autant en termes de rendement que de déviations.

Également, les essais ont permis d'apprécier la possibilité de forer avec des tiges et/ou des tubes non spécifiques à l'Hi'Drill®. Des essais ont été réalisés avec des tiges standards (filetage API ou autre), des tiges de jet-grouting, des tubes micropieux (N80 ou S355), des tubages seuls (S355) ou encore des lignes de forage en tiges/tubes. Les REX sont très satisfaisants. Dès lors que les tiges ou les tubes utilisés pour la foration ont des épaisseurs suffisantes, alors ils sont capables d'encaisser les vibrations sans endommagement. Malgré tout, ces aciers « standards » transmettent moins bien les vibrations.



Figure 6. Micropieux autoforé en Hi'Drill® avec tricône perdu.

Des essais ont également été menés avec des tiges en aluminium (amagnétique) afin de permettre la réalisation de mesures de déviation avec des dispositifs magnétiques.

Aussi, nous avons cherché à appréhender l'apport de l'Hi'Drill® dans la foration de structures entropiques telles que les bétons très armés ou encore le bois. Un grand nombre d'essais ont été réalisés dans des bétons peu à très armés. La technique a montré des capacités impressionnantes dans les terrains très durs que ce soit en couronnes ouverte (petit diamètre) ou au tricône (tous diamètres jusqu'à 250mm). Avec la couronne, il est possible de couper les aciers sans grande difficulté même si cela engendre beaucoup d'usure. Dans le bois, les vibrations sont en tout ou

partie absorbées. L'apport de la technique est donc très variable.



Figure 7. Couronne HS ayant coupé plusieurs aciers

4.3.2 Compréhension du principe vibratoire

En parallèle du déploiement progressif du Hi'Drill® sur chantier, plusieurs études internes ou avec des universités comme celle d'Evry ou des instituts comme le CETIM (Centre Technique des Industries Mécaniques) ont permis de mieux comprendre les phénomènes vibratoires observés et d'optimiser la réalisation du forage.

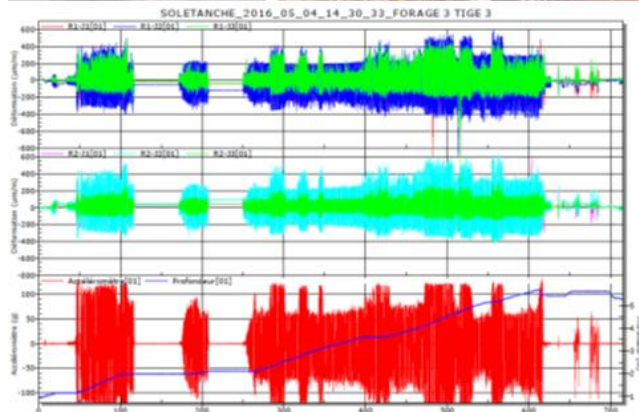


Figure 8. Essai instrumenté de vibration avec le CETIM

Par exemple, un des premiers phénomènes observés a été celui de l'auto-régulation de la fréquence, qui se traduit généralement par une évolution de la fréquence en escalier à chaque ajout de tige de forage.

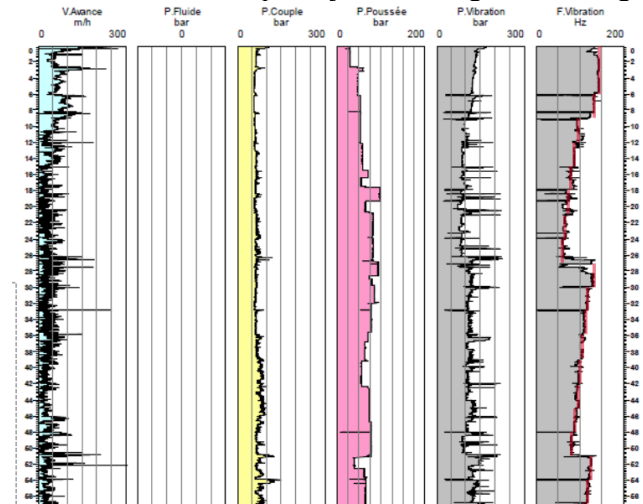


Figure 9. Exemple d'évolution de la fréquence (courbe de droite) en fonction de la profondeur

On a pu modéliser la propagation des ondes dans le train de tige par l'équation suivante :

$$\frac{d^2u}{dx^2} - h \frac{du}{dt} - \frac{1}{c^2} \frac{d^2u}{dt^2} = 0$$

Avec en mode permanent, des solutions superpositions d'ondes harmoniques de la forme :

$$u(x, t) = \underline{f}(x)e^{j\omega t}$$

En tête, la condition aux limites se déduit de la 3ème loi de Newton selon le principe des actions réciproques

$$\vec{F}_{\text{excentriques} \rightarrow \text{train de tige}} = -\vec{F}_{\text{train de tige} \rightarrow \text{excentriques}}$$

$$2m\omega^2 e^{j\omega t} = -ES \frac{du(0, t)}{dx}$$

En pied, on peut faire l'hypothèse d'un encastrement en pied représentatif d'un terrain infiniment raide, ou au contraire d'un pied libre représentatif d'un terrain infiniment mou, ou encore d'une modélisation intermédiaire plus complexe sous la forme d'un ressort amorti. Dans tous les cas, on peut montrer que plusieurs modes de résonance peuvent exister pour une même longueur de train de tige :

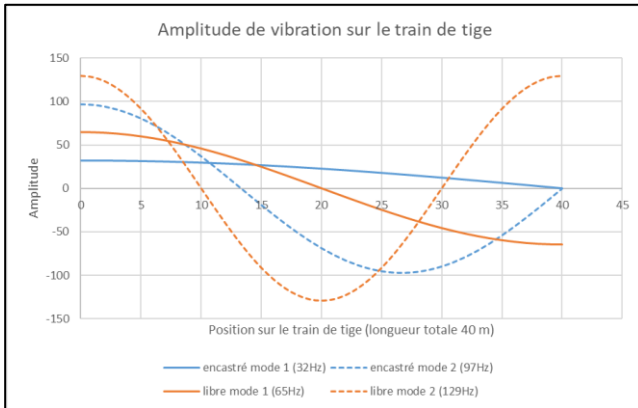


Figure 10. Amplitude de vibration sur le train de tige en fonction du mode de résonance

C'est le mode correspondant à la fréquence la plus élevée pouvant être atteint par la machine qui permet d'obtenir le maximum de puissance et donc d'optimiser de forage :

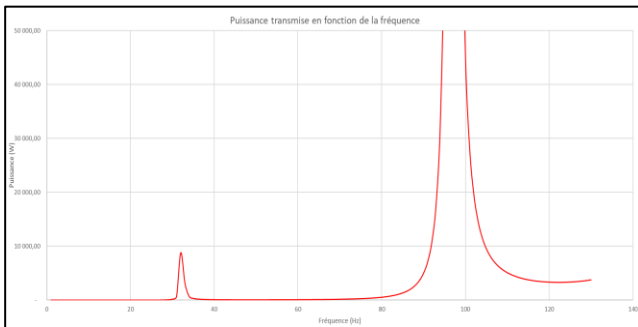


Figure 11. Puissance transmise en fonction de la fréquence

4.4 Analyse vibratoire, effet sur les ouvrages sensibles (ponts, ...)

Le forage sonore a pu parfois soulever des questions légitimes concernant l'impact des vibrations sur les ouvrages sensibles. Bien que les vibrations liées à cette technique, impliquant des fréquences élevées et des amplitudes faibles, soient très localisées et se dissipent rapidement, selon les environnements, des études vibratoires ou des mesures de vibration peuvent être nécessaires. Il convient alors de confirmer que les vibrations restent admissibles et/ou équivalentes à d'autres techniques pour l'environnement donné. Pour les dommages aux avoisinants, ce sont les vitesses particulières qui sont prises en compte. La circulaire du 23 juillet 1986 impose des seuils de vitesse en fonction des fréquences de vibration.

La SNCF dispose de ses propres critères relatifs aux seuils pour vibrations entretenues sur les ouvrages et installations avoisinants conformément à la directive IN 1226.

C'est le plus souvent dans ce cadre que des mesures vibratoires spécifiques ont été mises en œuvre sur

chantier et ont permis de confirmer l'adéquation de la méthode avec la sensibilité des ouvrages à proximité.

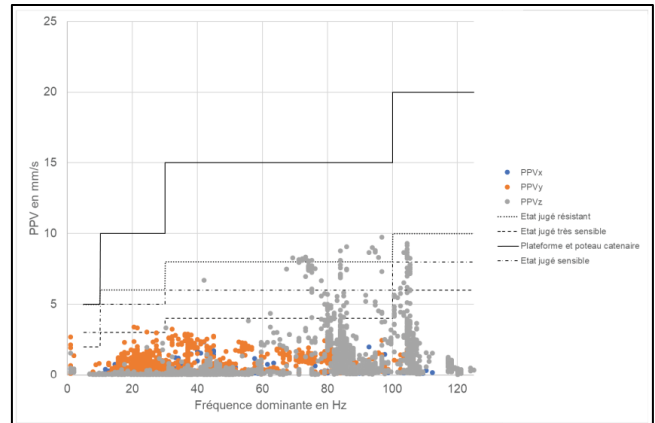


Figure 12. Exemple de distribution des vitesses particulières par rapport aux recommandations de l'IN 1226

4.5 Limitation des nuisances sonores

La dénomination « sonore » pourrait faire craindre un risque de nuisances sonores liée à la technique. C'est pourquoi des études spécifiques ont été menées sur le Hi'Drill® avec la participation d'organismes extérieurs comme le bureau d'études acoustiques et vibratoires SIMEngineering, le CETIM ou encore le bureau Veritas. Elles ont notamment montré que la principale source de bruit était le porteur, et non la tête, permettant par-là de confirmer que le Hi'Drill® était sur ce point comparable aux autres techniques conventionnelles telle que la rotation simple, et permettait de réduire les nuisances par rapport aux techniques percussives.



Figure 13. Exemple de mesure acoustique sur un chantier Hi'Drill®

Pour les environnements les plus exigeants, des systèmes spécifiques de réduction de bruits ont été développés.



Figure 14. Exemple de foreuse Hi'Drill® équipée d'un système de réduction de bruit au niveau de la tête et du porteur

4.6 Forage sous nappe / SAS

Le Hi'Drill® a été adapté pour le forage sous nappe nécessitant le recours à un SAS et plus spécifiquement pour les forages nécessitant la mise en place d'un équipement (tube à manchettes par exemple) à l'abri d'un tubage (forages le plus souvent horizontaux dans des terrains granulaires) sous de fortes charges d'eau (jusqu'à plus de 25m).

L'Hi'Drill®, utilisant des tubages est tout à fait adapté à ce type de forages. Néanmoins, deux défis étaient à relever :

- L'étanchéité (équilibre de la nappe) doit être maintenue tout au long du processus de foration y compris lors de l'extraction du tubage après mise en place de l'équipement. Lors du forage l'étanchéité est obtenue par le presse-étoupe serré sur le tubage de forage lui-même équipé d'un outil avec clapet anti-retour en son pied pour éviter les retours lors des coupures. Cet outil est de fait « perdu » puisqu'il est nécessaire de le chasser pour mettre l'équipement en place

à l'abri du tubage. Dès lors que l'outil est chassé, il y a perte d'étanchéité et l'eau et le terrain peuvent alors remonter dans l'espace annulaire entre tubage et équipement. Le plus souvent, sans étanchéité spécifique, il est constaté soit un blocage de l'équipement dans le tubage du fait de l'entrée de terrain, soit, dans le pire des cas, un débouffrage.

Aussi, avant d'extraire totalement le tubage du presse-étoupe, il est nécessaire d'établir l'étanchéité sur l'équipement. En effet, le fait d'avoir 2 diamètres différents entre tubage de forage et équipement impose d'avoir deux dispositifs d'étanchéité distincts.

Soletanche Bachy a donc développé un dispositif d'étanchéité en pied de tubage Hi'Drill® afin que l'étanchéité soit maintenue dans l'espace annulaire tout au long du processus de forage ainsi qu'un SAS spécifique permettant de gérer l'étanchéité sur le tubage de forage puis sur l'équipement.

- Le second défi a consisté à faire que ces dispositifs d'étanchéité résistent à l'énergie de vibration.

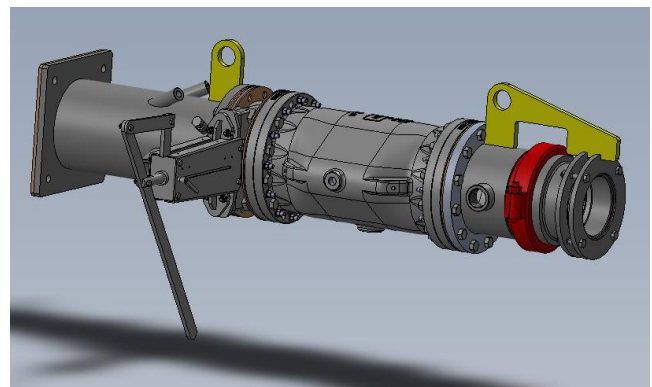


Figure 15. SAS Hi'Drill® équipée d'un double dispositif d'étanchéité

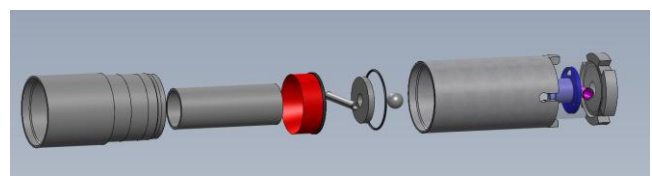


Figure 16. Pied de tubage Hi'Drill® équipé d'un outil perdu et d'un dispositif d'étanchéité.

Ce dispositif a été éprouvé et amélioré sur bon nombre de chantiers.

4.7 Forage contrôlé

A l'occasion du chantier de congélation réalisé sur la station du Vert de Maisons de la future Ligne 15, des

forages horizontaux devaient être réalisés à l'interface entre les Sables de Beauchamp et les Marnes et Caillasses sur une longueur de près de 80m. Ces forages ont bien entendu été réalisés sous SAS avec une charge d'eau d'environ 25m.

L'objectif de déviation était de 40cm à 80m soit 0,5%. Le forage Hi'Drill®, même s'il dévie peu, ne peut pas garantir de telles déviation surtout à l'interface entre 2 couches de terrains de nature totalement différentes (sableuse et rocheuse).

Le forage dirigé a donc été envisagé en remplacement de L'Hi'Drill®. Cependant, les techniques de forage dirigé classiques adaptées aux sables sont différentes de celles adaptée aux roches même de faible résistance comme les Marnes et Caillasses.

La solution du forage dirigé en Hi'Drill®, appelée « forage contrôlé », a donc été développée. En effet, l'Hi'Drill® est adapté à tous les types de terrains, aussi bien le rocher que le sable. Il nous a donc semblé évident que l'Hi'Drill® pouvait permettre d'étendre les techniques de forage dirigé au rocher peu résistant grâce à l'apport de la vibration.

Moyennant quelques adaptations (outils plus robustes, correction non pas par jetting mais par vibration), nous avons finalement réussi à réaliser les forages dans les tolérances visées. Ceci a été rendu possible grâce à la réalisation d'un plot d'essais en amont du chantier et à beaucoup d'adaptation durant les travaux.

Aussi, il a fallu définir une méthode de mesure des déviations adaptée à l'Hi'Drill®. En effet, l'énergie de vibration, trop grande, ne permettait pas d'embarquer une sonde en permanence. Lors des essais, plusieurs sondes avaient été « disloquées » par les vibrations.

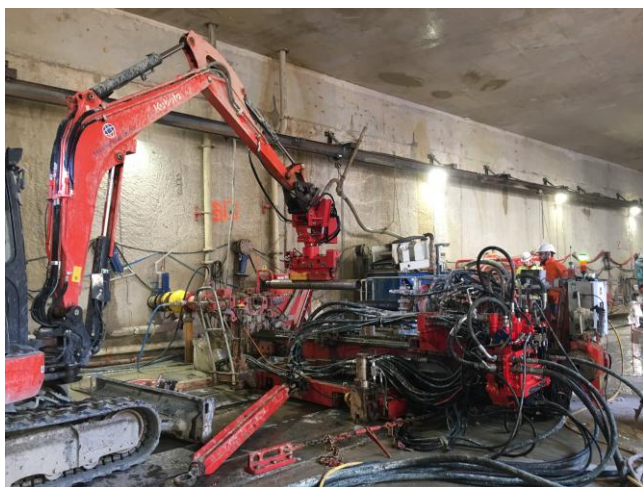


Figure 17. Foreuse Hi'Drill® spécifiquement développée pour le forage contrôlé.

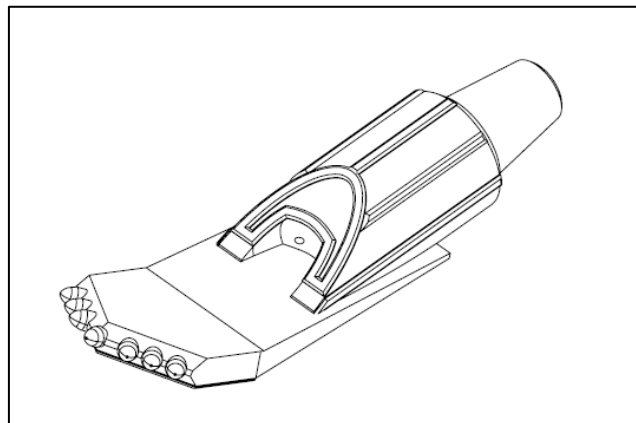


Figure 18. Outil type utilisé pour le forage contrôlé

5 CONCLUSION

Depuis 2005, Soletanche Bachy n'a cessé de chercher à mieux comprendre le forage sonique au travers de l'Hi'Drill® pour mieux le développer, le diversifier et en exploiter les pleines capacités. Il est difficile de retracer 20 ans de travail en 8 pages. Nous avons tenté de partager les grandes lignes afin de « démystifier » cette technique.

L'Hi'Drill® n'est pas non plus la solution à tous les problèmes. Notre expérience nous amène à considérer d'autres méthodes, plus « conventionnelles » que l'Hi'Drill®, dans beaucoup de cas. Le choix n'est néanmoins pas évident puisqu'il est toujours nécessaire de composer avec les aspects techniques et économiques.

Beaucoup de questions sont encore sans réponse mais nous progressons.

Depuis quelques temps, l'Hi'Drill® questionne sur l'effet que pourraient avoir les vibrations sur les terrains à proximité du forage, plus particulièrement dans la cadre de la réalisation de tirants et micropieux. En effet, les vibrations pourraient exercer une influence sur la qualité des scellements, notamment dans les terrains fins comme les Marnes et les Argile. A l'occasion de ces JNGG 2026 et pour répondre à cette interrogation, Soletanche Bachy présente un second article relatif à « l'influence de la technique de forage Hi'Drill® sur la résistance des scellements : retour d'expérience sur des essais d'arrachement ».