

Influence de la technique de forage Hi'Drill® sur la résistance des scellements : retour d'expérience sur des essais d'arrachement

Influence of the Hi'Drill® drilling technique on the bond resistance: feedback from pull-out tests

Jonathan MILLOTTE^{1*}, Nicolas UTTER¹, Ludovic GUILLEMAU¹

1 Soletanche Bachy France, Rueil-Malmaison, France

**jonathan.millotte@soletanche-bachy.com*

RÉSUMÉ :

Depuis près de 20 ans, Soletanche Bachy développe la technologie de forage Hi'Drill® pour la réalisation de forages de petits diamètres destinés à l'exécution de micropieux, de tirants et de clous. Basée sur l'utilisation d'une tête de forage sonore, cette méthode vise à améliorer l'efficacité de la perforation dans une grande variété de terrains.

Soletanche Bachy France possède également une base de données rassemblant plus de 50 années d'essais à la rupture et de contrôle réalisés sur des ancrages exécutés sur ses chantiers. À partir de ces données, une analyse a été conduite afin d'évaluer l'impact de la technique Hi'Drill® sur la qualité mécanique des scellements.

L'objectif de cette étude consiste à déterminer si la méthode Hi'Drill® influence la qualité du scellement, à quantifier cet effet et, le cas échéant, à l'intégrer au dimensionnement des ancrages. La méthodologie repose sur la comparaison entre la résistance de frottement mesurée lors des essais et celle calculée selon les réglementations en vigueur, fondées sur la pression limite des sols. Il ressort de cette étude que les valeurs des frottements ultimes et des résistances critiques de fluage obtenues avec Hi'Drill® ne sont pas inférieures à celles prévues par les méthodes normatives.

De plus, des comparaisons ont également été effectuées entre les forages réalisés avec la technologie Hi'Drill® et ceux effectués avec d'autres techniques, tout en prenant en compte les types de sols.

Enfin, ce travail offre également l'occasion de réinterroger les coefficients de modèle définis par la réglementation, sur la base d'un vaste ensemble d'essais menés dans des conditions réelles sur le territoire français.

ABSTRACT:

For nearly two decades, Soletanche Bachy has been advancing the Hi'Drill® technology for small-diameter drilling applications, notably for micropiles and ground anchors. This method, based on sonic drilling heads, is designed to enhance drilling efficiency across a wide range of soil conditions.

Leveraging a comprehensive database of over 50 years of failure and suitability tests performed on anchors installed on its projects, Soletanche Bachy France conducted an in-depth analysis to evaluate the influence of the Hi'Drill® technique on bond performance.

The study aims to determine whether Hi'Drill® method affects axial friction quality, quantify this impact, and, if relevant, incorporate it into anchor design. The approach compares measured frictional resistance from field tests with values calculated according to current standards, which rely on soil limit pressure. Results indicate that ultimate friction values and critical creep resistance achieved with Hi'Drill® meet or exceed normative expectations.

In addition, comparisons between boreholes drilled with the Hi'Drill® technology and conventional drilling techniques were performed across various soil types.

Beyond these findings, the study also provides an opportunity to reassess regulatory model coefficients, drawing on an extensive dataset of real-world tests conducted throughout France.

Mots-clés : scellement ; essais ; Hi'Drill® ; micropieu ; tirant

1 MÉTHODE D'ANALYSE

Cette étude cherche à déterminer l'impact potentiel de la méthode de forage Hi'Drill® sur la qualité des scellements (résistance de frottement) des ancrages de type tirants et micropieux.

L'analyse est menée sur la base de données d'essais d'arrachement (en traction) effectués sur des tirants et micropieux par Soletanche Bachy en France, en Belgique et à Monaco. Cette base de données compte à ce jour **1788 essais**.

On analysera, dans cet article, uniquement les essais à la rupture (préalables ou de conformité) qui permettent d'avoir la résistance limite de scellement et la résistance critique de fluage. Les essais de contrôle ne permettent pas, généralement, d'avoir la résistance limite de l'ancrage.

2 PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE HI'DRILL®

Le forage sonique consiste à imposer au train de tiges de forage un mouvement d'oscillations verticales de haute fréquence et de faible amplitude afin qu'il pénètre plus facilement dans le sol. Ces vibrations sont engendrées par un système mécanique situé dans la tête de forage, portant par conséquent le nom de tête sonique.

Soletanche Bachy a développé le matériel pour l'utilisation de cette technique de forage pour ces travaux de petites perforations (tirants, clous, ancrages, injections, puits, forage de géothermie) et déposé un brevet sur les têtes de forage utilisées sous la dénomination Hi'Drill®.

3 HYPOTHÈSES ET MÉTHODES DE CALCUL

Pour l'analyse des essais à la rupture, certaines données sont indispensables. Ainsi, les essais pour lesquels la longueur scellée, la catégorie de sol, la pression limite, la tension limite, l'outil de forage, le diamètre de perforation ou le type d'ancrage ne sont pas connus précisément ne sont pas intégrés dans l'analyse conduite ici. En revanche les essais sont exploités qu'ils aient atteint la rupture ou non. Cela signifie que pour les essais concernés, la résistance ultime est sous-estimée.

Ce tri conduit à exploiter 359 essais à la rupture en traction présents dans la base de données. Les méthodes de forage sont regroupées en deux catégories : les essais effectués avec des méthodes dites

« traditionnelles » d'un côté (247 essais), et les essais Hi'Drill® de l'autre (112 essais).

Au sein de ces catégories, on distingue les micropieux et les tirants car les résistances de frottement calculées sur la base des données de sol sont différentes pour ces deux types d'ancrage.

L'analyse est menée pour les cinq types de sols normalisés présents dans la base de données correspondant aux classes définies dans la norme NF P 94-262 et les règles TA2020 : argile et limon, craie, marne, roches altérées, sable et graves.

Les résultats des essais permettent d'obtenir la résistance de frottement mesurée $R_{s,mes}$ et, en utilisant les méthodes basées sur les règlements en vigueur, de calculer la résistance de frottement attendue en fonction du type de sol et de la pression limite $R_{s,cal}$. Ces deux valeurs de résistance de frottement sont alors comparées.

En revanche, aucune différence n'est faite en fonction de la méthode de scellement (gravitaire, injection unitaire ou sélective), celle-ci étant intégrée au calcul du frottement axial.

Obtention de la résistance de frottement mesurée

$R_{s,mes} = T_u \times g$ avec T_u tension limite en tonnes et $g = 9,81$ N/kg

Obtention de la résistance de frottement calculée $R_{s,cal}$

- Pour les micropieux, la méthode de l'annexe F de la norme NF P 94-262 est utilisée.

$$R_{s,cal} = \pi D L_s \alpha_{pieu-sol} f_{sol}(p_l) \quad (1)$$

avec L_s la longueur de scellement, D le diamètre de perforation, $\alpha_{pieu-sol}$ et f_{sol} déterminés conformément à l'annexe F de la norme.

- Pour les tirants, la méthode décrite dans l'annexe H du TA2020 est utilisée.

$$R_{s,cal} = \pi D L_s \alpha_s q_s \quad (2)$$

avec L_s la longueur de scellement, D le diamètre de perforation, α_s et q_s sont issus de TA2020.

Résistance critique de fluage

Les règlements définissent un rapport entre la résistance de fluage $R_{s;cr}$ (ou $R_{t;cr}$) à l'état limite de service et la résistance limite R_s . Ce rapport est fixé à 0,7 pour les fondations (NF P 94-262 §14) et à 1/1,35 = 0,74 pour les tirants (TA2020 annexe H).

4 RÉSULTATS DES ESSAIS À LA RUPTURE POUR LES MICROPIEUX

4.1 Essais exploités

Le nombre d'essais ayant été exploités par type de sol est présenté dans le Tableau 1.

Tableau 1. Essais à la rupture exploités pour les micropieux par classe de sol

	Traditionnel	Hi'Drill	Total
Argile et limon	45	9	54
Craie	2	5	7
Marne	26	29	55
Roche altérée	23	15	38
Sable et grave	23	17	40
Total	119	75	194

4.2 Résultats globaux

La répartition du rapport $R_{s,cal}/R_{s,mes}$ obtenu pour les micropieux est présenté dans la Figure 1.

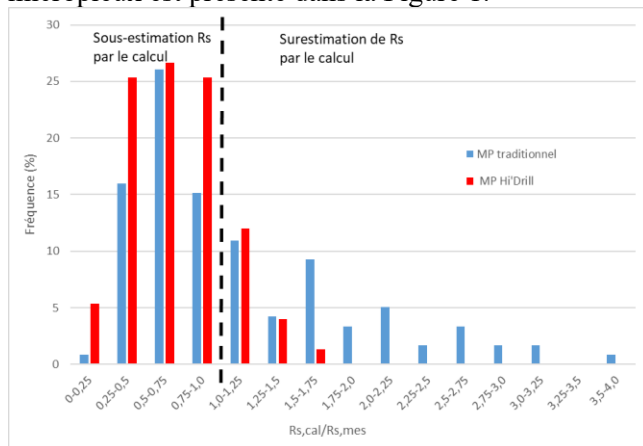


Figure 1. Répartition des rapports $R_{s,cal}/R_{s,mes}$ en fréquence - micropieux

Pour les micropieux forés avec des méthodes traditionnelles et Hi'Drill®, une majorité des rapports $R_{s,cal}/R_{s,mes}$ sont inférieurs à 1 (la résistance de frottement calculée est supérieure à celle mesurée avec la norme sans application de coefficient de modèle).

La méthode Hi'Drill® apparaît donc fiable pour obtenir les valeurs de frottement théoriques vis-à-vis des règles de calcul en vigueur.

La norme définit un coefficient de modèle γ_{rd1} , permettant de garantir un taux de mise en défaut de l'ordre de 17% (Baguelin et al. 2012). En traction, ce coefficient de modèle vaut :

- Pour l'argile, la craie et les marnes : $\gamma_{rd1} = 2$
- Pour les sables et graves, les sols intermédiaires et la roche altérée : $\gamma_{rd1} = 1.7$

Les figures 2 et 3 permettent de déduire les coefficients pour les essais issus de la base de données de Soletanche Bachy France spécifiquement pour les micropieux forés avec la méthode Hi'Drill®.

Tableau 2. Coefficient de modèle à 17% de mise en défaut issu de la base essais sur micropieux

Méthodes Hi'Drill®	
Argile, craie, marne	$\gamma_{17\%} = 0.9$
Sable et grave, roche altérée	$\gamma_{17\%} = 0.8$

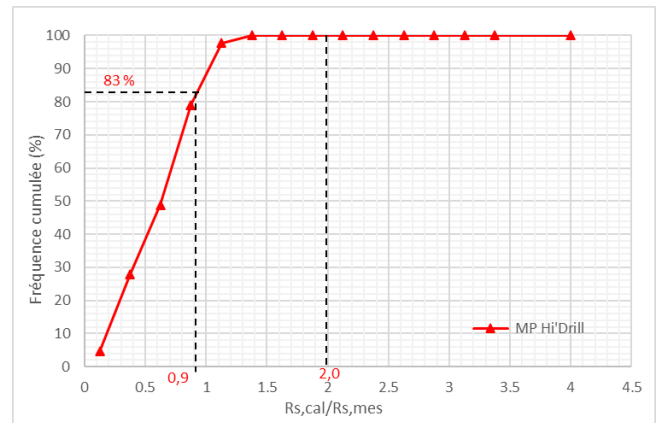


Figure 2. Fréquence cumulée dans les argiles, craie et marnes - micropieux

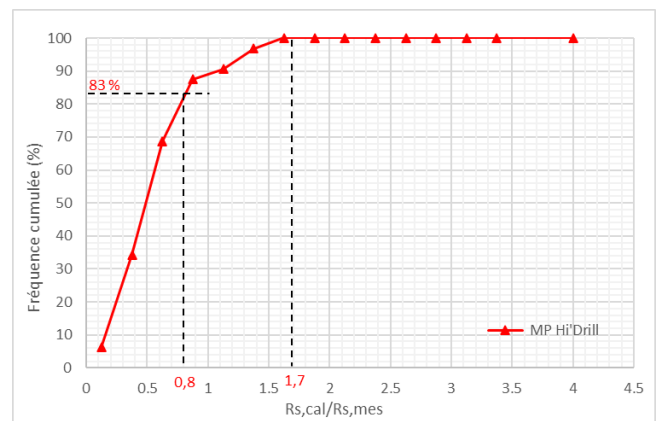


Figure 3. Fréquence cumulée dans les sables, graves et roches - micropieux

On observe que pour un taux de mise en défaut de 17%, les coefficients obtenus sont de 0,8 et 0,9, suivant les catégories de sol. Cela indique une probabilité de mise en défaut de la valeur de $R_{s,cal}$ inférieure à celle de la norme. Aussi, le coefficient de modèle pour obtenir une mise en défaut ne dépassant pas 17%,

pourrait même être diminué quel que soit le type de sol d'ancrage.

4.3 Résultats par type de sol

Une analyse par classe de sol au sens de la norme NF P 94-262 a également été réalisée pour identifier un éventuel effet différencié suivant les sols.

Pour les argiles et limons (Figure 4), bien que peu de valeurs (9) soient disponibles en Hi'Drill®, du fait du faible intérêt de cette méthode dans ce type de sol généralement facile à forer, les données disponibles montrent une bonne qualité de scellement avec des valeurs $R_{s,cal}$ supérieures ou égales à $R_{s,mes}$ estimées avec la norme. Avec les autres méthodes de forage, on observe une grande dispersion de résultats.

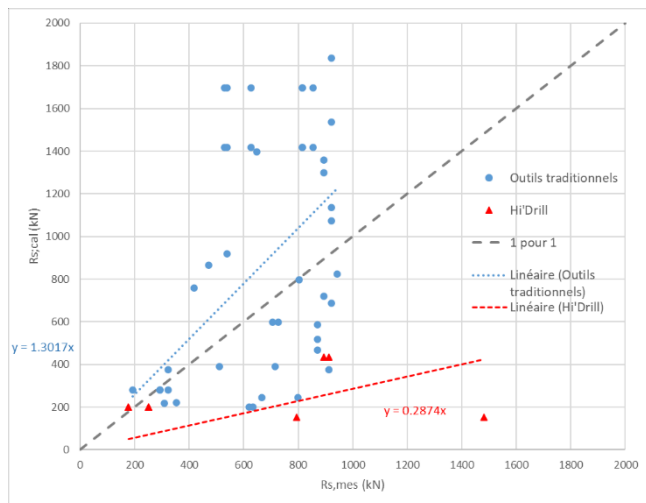


Figure 4. Répartition des valeurs $R_{s,mes}$ et $R_{s,cal}$ pour les micropieux dans les argiles et limons - micropieux

Dans la craie, l'analyse n'est pas menée car le nombre d'essais est trop faible.

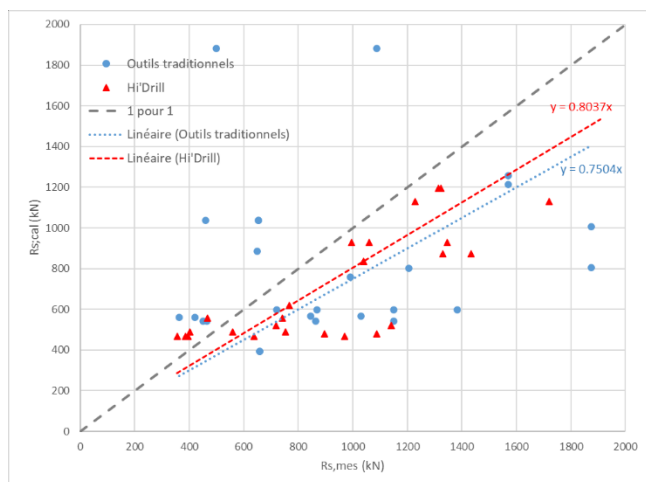


Figure 5. Répartition des valeurs $R_{s,mes}$ et $R_{s,cal}$ pour les micropieux dans les marnes - micropieux

Pour les marnes (Figure 5), les points de la figure liés à la méthode Hi'Drill® sont sous ou très légèrement au-dessus de la droite de pente 1:1, démontrant une bonne qualité de scellement. Comparativement, davantage d'essais réalisés sur des micropieux forés avec des méthodes traditionnelles ont une résistance de frottement mesurée inférieure à celle calculée avec la norme. Toutefois, les rapports moyens $R_{s,cal}/R_{s,mes}$ sont similaires, proches de 0,8.

Pour les roches altérées (Figure 6), à l'image de ce qui est observé pour les marnes, les résultats pour la méthode Hi'Drill® montrent des résultats globalement deux fois meilleurs que ceux estimés au préalable sans qu'il n'y ait de différence notable avec ce qui est obtenu pour les autres méthodes de forage.

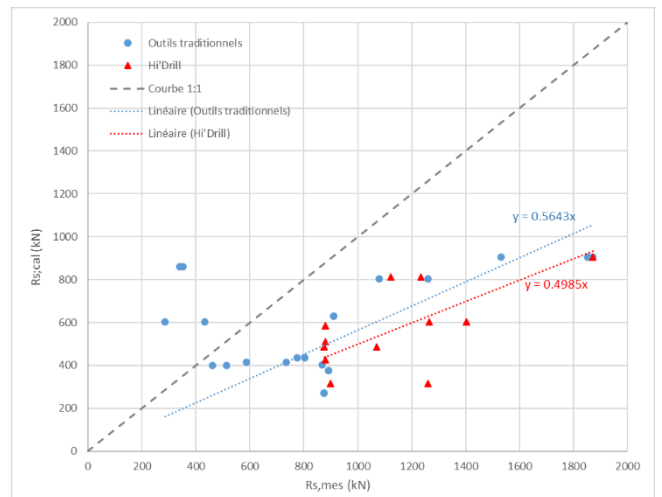


Figure 6. Répartition des valeurs $R_{s,mes}$ et $R_{s,cal}$ pour les micropieux dans les roches altérées - micropieux

Pour les sables et graves (Figure 7), les micropieux forés avec des méthodes Hi'Drill® ont globalement une résistance de frottement supérieure à celle des micropieux forés avec des méthodes traditionnelles, le rapport moyen $R_{s,cal}/R_{s,mes}$ étant de 0,8 pour les méthodes Hi'Drill® et de 0,9 pour les méthodes traditionnelles.

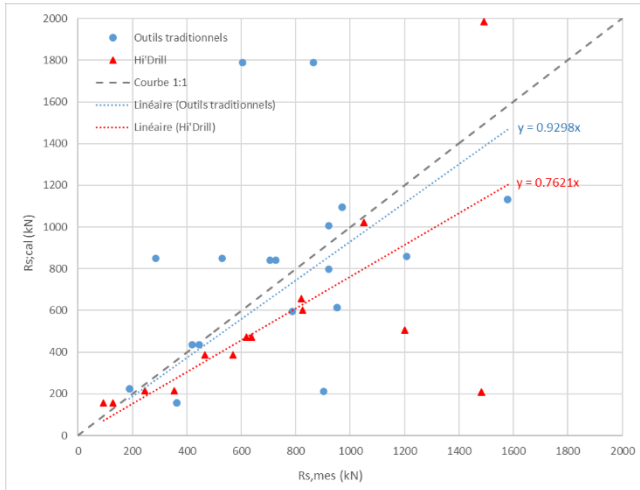


Figure 7. Répartition des valeurs $R_{s,mes}$ et $R_{s,cal}$ pour les micropieux dans les sables et graves - micropieux

5 RÉSULTATS DES ESSAIS À LA RUPTURE POUR LES TIRANTS

5.1 Essais exploités

Le nombre d'essais ayant été exploités par type de sol est présenté dans le Tableau 3. Le nombre d'essais sur des tirants réalisés avec des méthodes Hi'Drill® est moins important que pour les micropieux, surtout par rapport au nombre d'essais réalisés avec des méthodes traditionnelles, ce qui en limite l'exploitation.

Tableau 3. Essais à la rupture exploités pour les tirants par classe de sol

	Traditionnel	Hi'Drill	Total
Argile et limon	30	4	34
Craie	6	4	10
Marne	36	16	52
Roche altérée	27	6	33
Sable et grave	29	7	36
Total	128	37	165

5.2 Résultats globaux

La répartition du rapport $R_{s,cal}/R_{s,mes}$ obtenu pour les micropieux est présenté dans la Figure 8.

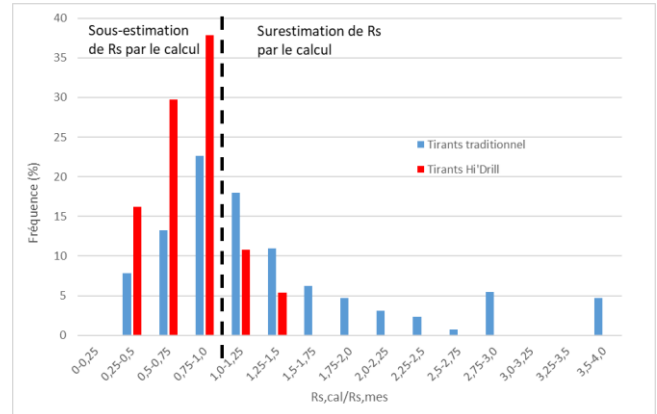


Figure 8. Répartition des rapports $R_{s,cal}/R_{s,mes}$ en fréquence - tirants

Comme pour les micropieux, une majorité des rapports $R_{s,cal}/R_{s,mes}$ sont inférieurs à 1 pour les tirants forcés avec des méthodes traditionnelles ou Hi'Drill® (la résistance de frottement calculée avec la norme est inférieure à celle qui est effectivement mesurée).

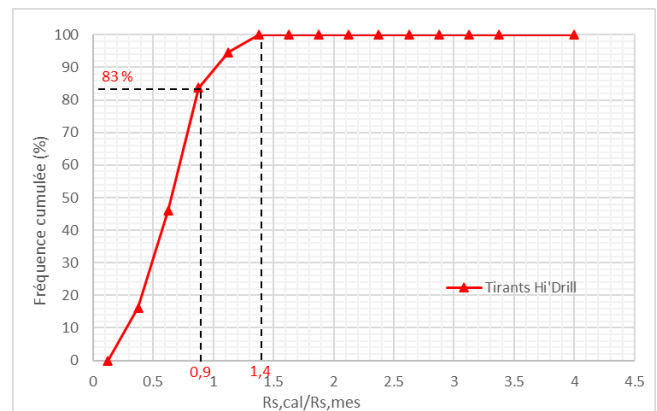


Figure 9. Fréquence cumulée - tirants

Le TA2020 définit un coefficient de modèle $\gamma_{rd} = 1,4$. La Figure 9 montre pour les tirants forcés avec la méthode Hi'Drill® que pour un taux de mise en défaut de 17% (par analogie aux micropieux), un coefficient de 0,9 inférieur à celui spécifié par le règlement. Avec un coefficient de 1,4, aucune mise en défaut n'est mise en évidence dans la base de données de Soletanche Bachy France.

5.3 Résultats par type de sol

Comme pour les micropieux, une analyse par classe de sol a également été réalisée pour identifier un éventuel effet différencié suivant les sols.

Pour les argiles et limons (Figure 10) et les roches altérées (Figure 11), peu de valeurs (respectivement 4 et 6) sont disponibles en Hi'Drill®. Les données

disponibles montrent toutefois une tendance à obtenir de meilleures valeurs $R_{s,mes}$ par rapport à ce qu'il peut être estimé avec la norme. Avec les autres méthodes, on observe une grande dispersion de résultats.

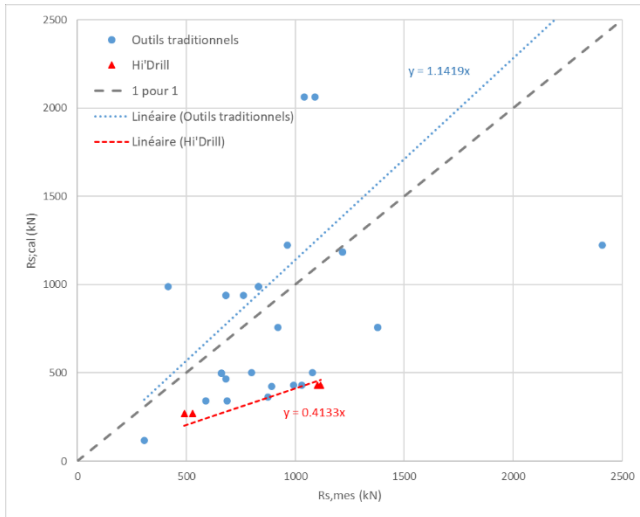


Figure 10. Répartition des valeurs $R_{s,mes}$ et $R_{s,cal}$ pour les micropieux dans les argiles – tirants

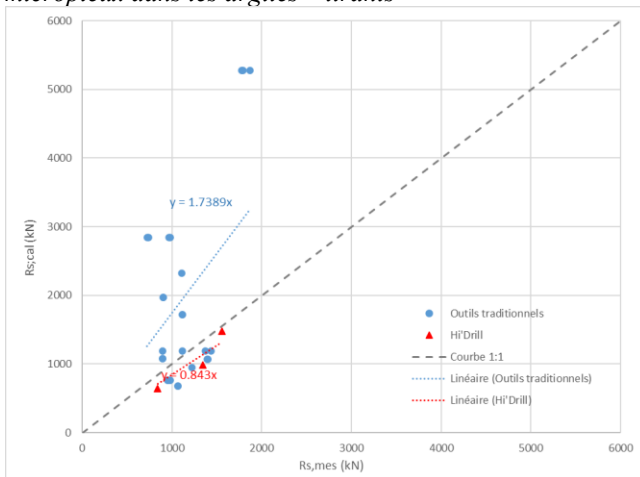


Figure 11. Répartition des valeurs $R_{s,mes}$ et $R_{s,cal}$ pour les micropieux dans les roches altérées - tirants

Dans la craie (Figure 12), malgré le peu de valeurs dans les 2 familles de méthodes étudiées, la méthode Hi'Drill® apparaît fiable, sans différence flagrante avec les autres méthodes.

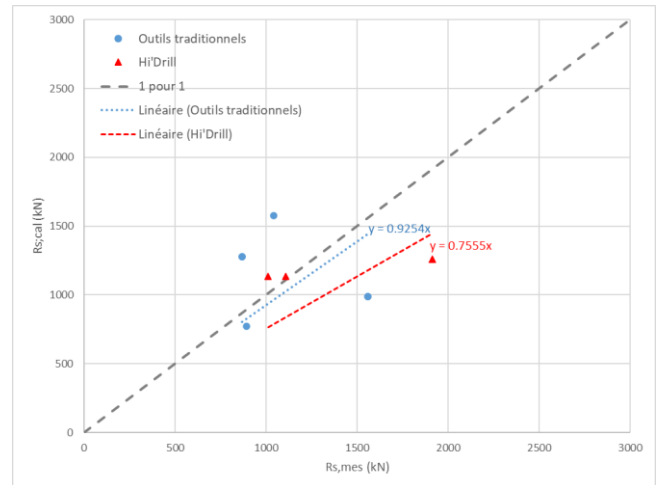


Figure 12. Répartition des valeurs $R_{s,mes}$ et $R_{s,cal}$ pour les micropieux dans la craie - tirants

Pour les marnes (Figure 13), la rapport moyen $R_{s,cal}/R_{s,mes}$ est de 0,6 pour les méthodes Hi'Drill® et de 1,6 pour les méthodes traditionnelles. Les forages avec des méthodes Hi'Drill® apparaissent efficaces pour obtenir une bonne résistance de frottement des tirants dans ce type de sol.

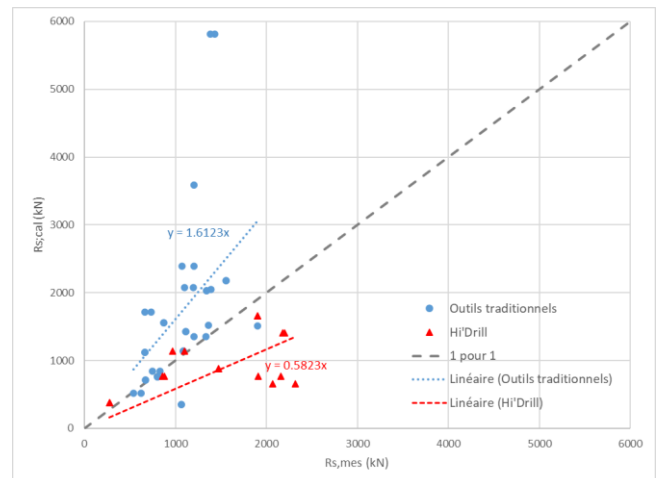


Figure 13. Répartition des valeurs $R_{s,mes}$ et $R_{s,cal}$ pour les micropieux dans les marnes - tirants

Pour les sables et graves (Figure 14), les tirants forés avec des méthodes Hi'Drill® (seulement 7 essais) ont une résistance de frottement similaire à celle des micropieux forés avec des méthodes traditionnelles.

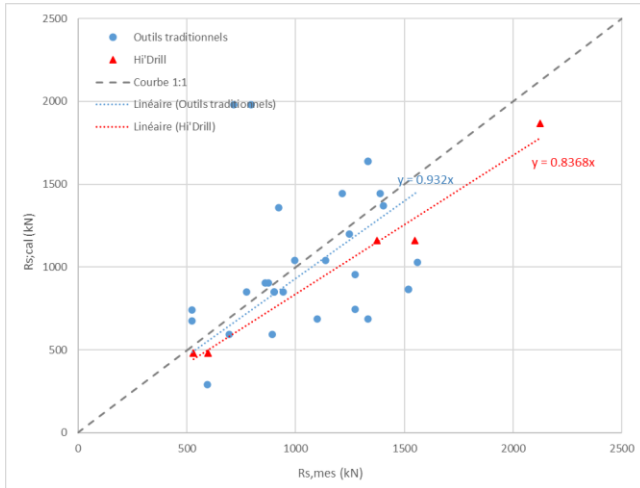


Figure 14. Répartition des valeurs $R_{s,mes}$ et $R_{s,cal}$ pour les micropieux dans les sables et graves - tirants

6 ANALYSE DE LA RÉSISTANCE CRITIQUE DE FLUAGE

Parmi l'ensemble des essais à la rupture, ceux qui ont atteint la rupture permettent d'obtenir 2 données : la résistance limite à la rupture $R_{s,mes}$ et la résistance critique de fluage $R_{s,cr,mes}$.

La base de données comporte respectivement 80 et 69 essais sur des micropieux et tirants réalisés avec des techniques de forage traditionnelle et respectivement 29 et 14 essais réalisés avec la technique Hi'Drill® ayant permis de déterminer ces deux résultats.

L'analyse des données présentée sous forme graphique (Figure 15 et Figure 16) ne fait pas apparaître de différence significative entre les 2 techniques sur le rapport $R_s/R_{s,cr}$. Ce coefficient est en moyenne, pour les micropieux de l'ordre de 0,75 à 0,78 et pour les tirants de l'ordre de 0,72.

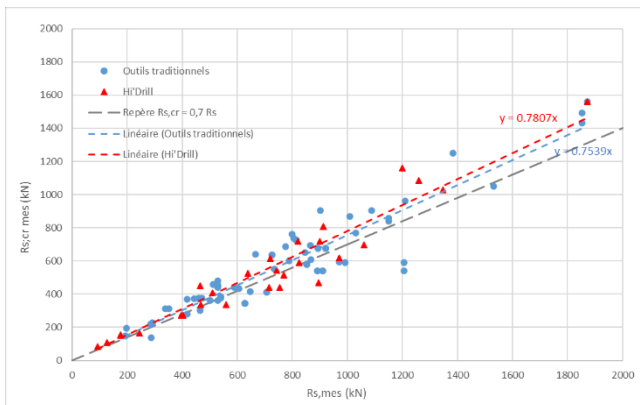


Figure 15. Valeur de la résistance critique de fluage par rapport à la résistance limite - micropieux

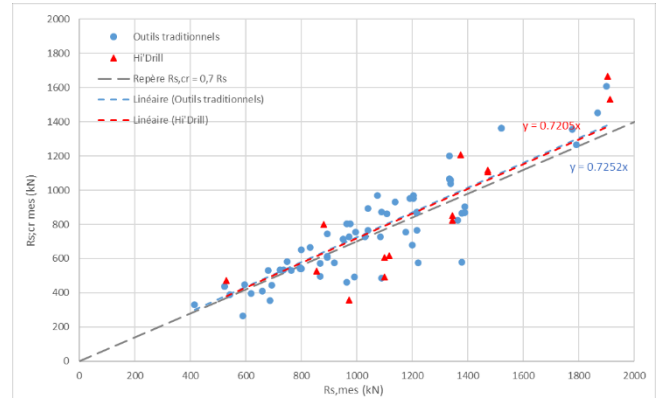


Figure 16. Valeur de la résistance critique de fluage par rapport à la résistance limite - micropieux

Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles proposées par les règlements (0,70 pour les micropieux et $1/1,35 = 0,74$ pour les tirants).

7 CONCLUSIONS

On retiendra de cette analyse les principaux enseignements suivants :

- Les résultats d'ensemble des essais à la rupture réalisés sur des ancrages exécutés avec la méthode Hi'Drill® montrent des résultats fiables. Le taux de mise en défaut à 17% est $\gamma_{17\%} \leq 0,9$. La valeur R_s calculée avec les abaques des règlements en vigueur est presque toujours obtenue ou améliorée.
- La fiabilité des scellements des ancrages exécutés avec la technologie Hi'Drill® apparaît bonne quelle que soit la catégorie de terrain concernée. Aucune catégorie de sol n'apparaît affectée négativement par l'emploi de cette technique de forage.
- La technique Hi'Drill® n'a pas d'incidence sur la valeur de la résistance critique de fluage vis-à-vis de la résistance limite. Le rapport entre la résistance limite et la résistance critique étant conforme à celui préconisé par les règlements et sans différence significative entre la technique Hi'Drill® et les autres techniques de forage.

Les centaines d'essais à la rupture menés ces dernières années dans différents terrains montrent que l'utilisation du procédé Hi'Drill® ne modifie pas significativement la résistance de frottement latéral par rapport aux autres procédés de forage, et qu'on peut même noter que la méthode Hi'Drill® apparaît plus fiable pour obtenir les valeurs de frottement théoriques vis-à-vis des règles de calcul en vigueur.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Baguelin F., Burlon S., Bustamante M., Frank R., Gianceselli L., Habert J., Legrand S. (2012). *Justification de la portance des pieux avec la norme "Fondations Profondes" NF P 94-262 et le pressiomètre*, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Bordeaux, pp 577-584
- Bergeret G. (2007), *Le Forage Sonique* Mines Paris PSL.
- Habert J., Toubassy L., Cuiru F., Darras V. (2018), *Constitution et analyse d'une base d'essais de chargement statique en traction de micropieux et d'ancrages*, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Champs-sur-Marne NF P94-262, Justification des fondations profondes, 2012, AFNOR
- Tirant d'ancrage TA2020, Règles professionnelles relatives à la conception, au calcul, à l'exécution, au contrôle et à la surveillance, 2020, CFMS