

Calcul par homogénéisation des fondations au rocher, évaluation de la qualité du rocher à partir des carottes et/ou par imagerie en sondage avec diagraphie sonique

Rock foundation calculation by homogenization, Assessment of rock quality using core sampling and/or bore wall imaging by optic and sonic logging

Vincent SAVATIER¹, Olivier BORGET¹
1 EGIS, Toulouse, France

**Vincent.savatier@egis-group.com*

RESUME : Pour classer les roches et évaluer la portance sous des fondations par les méthodes d'homogénéisation, les normes et codes actuels et singulièrement la NF EN ISO 14689 et le document SETRA « Fondation au rocher conception et dimensionnement des fondations » font référence à l'indice de carottage RQD mesuré directement sur carottes de sondages. On pourrait penser que les techniques d'imagerie par sondages optique ou acoustique pourraient être utilisées à cet effet mais en l'absence fréquente de corrélation simple entre les RQD et les imageries, la contestation des résultats est inévitable en cas de conflit. Dans cet article nous allons documenter l'absence de corrélation simple entre le RQD et les résultats des imageries. Puis à partir d'exemple nous allons examiner l'origine des différences constatées et donner un avis sur la possibilité d'inclure les imageries optiques et soniques en complément du RQD dans l'évaluation de la portance des fondations au rocher.

ABSTRACT : To classify rocks and assess bearing capacity under foundations using homogenization methods, current standards and codes, particularly NF EN ISO 14689 and the SETRA Hand-book "Fondation au rocher conception et dimensionnement des fondations," refer to the RQD core sample index measured directly on core samples. One might think that borehole imaging techniques, optical or acoustic, could be used for this purpose, but according to the frequent absence of a simple correlation between RQD and imaging, the results will inevitably be disputed in the event of a conflict. In this article, we will document the lack of a simple correlation between RQD and imaging results. Then, using examples, we will examine the origin of the differences observed and give an opinion on the possibility of including imaging as a complement to RQD and micro seismic measurements in the evaluation of the bearing capacity of rock foundations.

Mots-clés : fondation ; rocher ; RQD ; imagerie en sondage, calcul par homogénéisation.

1 INTRODUCTION

Dans les massifs rocheux pouvant être considérés comme homogène, il est admis par les divers règlements et notamment par le guide « Fondation au rocher TER-23407 » (SETRA, 2009) de calculer les fondations par une méthode d'homogénéisation. Pour la rupture sous la base d'une fondation profonde ou semi-profonde, on se réfère généralement à la formule de Soriano (2003). Cette formule s'écrit dans le cas d'une fondation semi-profonde :

$$qu = \alpha \cdot \sqrt{\sigma_{ci}} \left(1 + \min \left(1, \frac{0,4 D_e}{B} \right) \right) \quad (1)$$

Où qu : résistance ultime sous la pointe, σ_{ci} : résistance en compression simple de la matrice du rocher, D_e : profondeur d'encastrement dans le rocher, B : diamètre du pieu, α : coefficient dépendant de l'indice de qualité du rocher en carottage RQD. α varie

de 2 pour RQD=100 à 0,12 pour RQD inférieur à 10. Il est donc nécessaire pour calculer la résistance sous la pointe des pieux de disposer d'une évaluation du RQD.

L'indice de qualité du rocher en carottage est d'après la NF EN ISO 14689, le rapport entre la somme des longueurs de tous les morceaux de carotte solides récupérés dans la passe carottée ayant plus de 10cm et la longueur de la passe. Il s'agit des morceaux découpés naturellement par la fracturation du rocher et les fractures dues au carottage doivent être écartées.

La mesure du RQD impose règlementairement la réalisation de carottés, Cependant le rocher pouvant être variable et la réalisation de carottés et la mesure rigoureuse du RQD nécessitant du temps, il peut être intéressant de compléter les carottages par des RQD estimés sur des imageries en sondage fait dans les carottés et dans des sondages destructifs voisins.

Ce paramètre que nous noterons RQD*, est d'ailleurs donné en routine par les fournisseurs d'imagerie en sondage. En outre, les références disponibles et notamment la comparaison faite par (Gasc-Barbier et al. 2010) montre qu'il existe des relations entre ces paramètres. Ainsi pour les marbres de St Béat, ces auteurs montrent des corrélations étroites pour 2 carottages totalisant 66 m de forage. Tout en déconseillant l'emploi des diagraphies seules (Gasc et al. 2010) indiquent par ailleurs que pour les passages très fracturés, les imageries en sondages donnent un résultat meilleur. Il existe donc un intérêt important à l'emploi des mesures de RQD* en association avec les RQD carottages. Il faut cependant être conscient du caractère lacunaire de la documentation sur les correspondances entre RQD et RQD* . Il y a pour cette raison, le risque de voir

contester les résultats des RQD* fait dans des destructifs en cas de conflit. Nous tentons ici d'apporter des éléments de comparaison entre ces paramètres.

2 CORRELATION RQD RQD*

2.1 Echantillon utilisé

L'échantillon utilisé comprend 21 sondages totalisant 258m de carottage dans un contexte de roche granitique et volcanique. Les faciès rencontrés sont décrits dans le tableau 1. Il s'agit de roches cristallines et volcaniques typiques d'une marge continentale passive de la partie nord du continent sud-américain.

Tableau 1. Description des roches de l'échantillon

Faciès	Type	Description
Amphibolite	Cristalline	Roche grenue à structure fluidale résultant d'un métamorphisme très poussé avec fonte quasi-totale. La cristallisation est généralement centimétrique. La roche contient des amas d'amphiboles résultant de la structure préalable au métamorphisme.
Granite	Cristalline	Roche grenue pauvre en amphibole montrant une structure entièrement recristallisée avec des inclusions sombres en forme de chips (restites)
Pegmatite	Cristalline	Roche granitique à gros cristaux généralement de couleur rose contenant de gros grains de quartz. Cette roche est très abrasive. Elle est intrusive et est présente sous la forme de filons décimétriques à plurimétriques. Localement elle présente une porosité entre les cristaux de quartz liée à une altération partielle des feldspaths et des minéraux sombres
Quartzite	Cristalline	Massif de cristaux de quartz décimétrique quasi pur
Dolérite et/ou micro-Gabbro	Volcanique recristallisée	Roche microcristalline résultant de la recristallisation d'une roche volcanique avec des petits cristaux. En fonction de la teneur en plagioclase, il peut s'agir d'un micro-gabbro. Cette roche est intrusive dans le massif sous forme de filons décimétriques à métrique elle présente un litage très prononcé.

2.2 Corrélations brutes

La figure 1 présente une tentative de corrélation entre les valeurs de RQD et celles de RQD* obtenues à partir des diagraphies.

Pour l'établissement de cette figure, nous avons recalculé le RQD* pour chaque diagraphie en retenant, autant que possible, les mêmes cotes de début et de fin que les passes de carottage et non les RQD* métriques donnés sur la diagraphie. Cette estimation des cotes n'a pas été sans difficulté car la comparaison de la cote du toit du rocher entre les logs et les diagraphies a montré très fréquemment des différences allant de 10cm à plus d'un mètre. Un recalage a donc été nécessaire avec une incertitude de +/-10cm environ.

Les mesures montrent, un rocher peu fracturé avec un RQD inférieur ou égal à 50% pour 10 valeurs seulement sur un échantillon de 218 valeurs. Pour les diagraphies, le nombre de RQD* inférieurs ou égaux à 50% est de 2. Sur la figure 1, la corrélation semble lâche et l'on pourrait même penser à une indépendance de RQD et RQD*. Dans la mesure où il s'agit de mesures faites dans la même roche l'une sur une carotte l'autre sur les parois du même sondage, il convient de l'expliquer. L'analyse des données montre les phénomènes suivants :

- 1) Le RQD et le RQD* vont, étant donné leur définition, classer différemment les éléments de carotte ou de paroi inférieurs et supérieurs à 10 cm. Ainsi des passes de 1m comportant un ou deux fragments de longueur située sur la

limite de 10 cm vont donner des RQD de respectivement 90 et 80% si on les considère inférieur à 10 cm au lieu de 100% si l'on les considère supérieurs. Il en résulte une possibilité de divergence du RQD et du RQD* du simple fait de l'incertitude sur la mesure de la longueur des fragments. Remarquons que l'on peut anticiper que l'imagerie en sondage donne une précision de la mesure de la longueur supérieure au relevé des carottes sur site. En effet elle permet un calcul purement géométrique à partir d'image d'une précision inframillimétrique des fragments l'imagerie en sondage.

2) L'examen détaillé des carottes montre que les mesures de RQD ont pris en compte les plans de litage comme des joints du rocher alors que lors des diagraphies par imagerie, ils ont été traités à part et ignorés pour le calcul du RQD*.

De façon à permettre une comparaison sur les mêmes bases, et à disposer à partir des diagraphies d'une évaluation utilisable pour le calcul des fondations, il est nécessaire de corriger ce biais.

Dans la suite de l'article nous allons donc comparer les mesures de RQD d'après échantillon à une mesure à partir des diagraphies tenant compte des plans de litage. Nous noterons RQD** ce paramètre.



Figure 1. Relation RQD (échantillon) et RQD*(diagraphie) sur les mesures brutes

2.3 Corrélations corrigées RQD RQD**

2.3.1 Principe d'établissement

Avant d'étudier cette corrélation, nous allons examiner un certain nombre section de carottage où des divergences entre le RQD et le RQD** sont constatées. Il s'agit de dire si la différence résulte d'une incertitude liée à la mesure des diagraphies (à prendre en compte dans l'analyse statistique) ou si elle

résulte d'une question d'analyse géologique de ce qui est observé nécessitant soit la correction du paramètre RQD ou RQD** soit d'écarter le point expérimental comme non significatif si cette correction n'est pas possible.

2.3.2 Examen de points singuliers

Nous allons comparer ici les carottes avec les imageries sur un certain nombre de forage. Sur les

figures suivantes, les carottes sont placées à gauche, les RQD correspondant sont donnés en blanc en surimpression. Les imageries sont au centre avec à droite les relevés (fracture, litages stratification) fait à partir de ces images. Sur ces relevés ont été ajoutés en rouge les RQD* et RQD**. Les flèches rouges joignent les points homologues sur les carottes et les imageries.

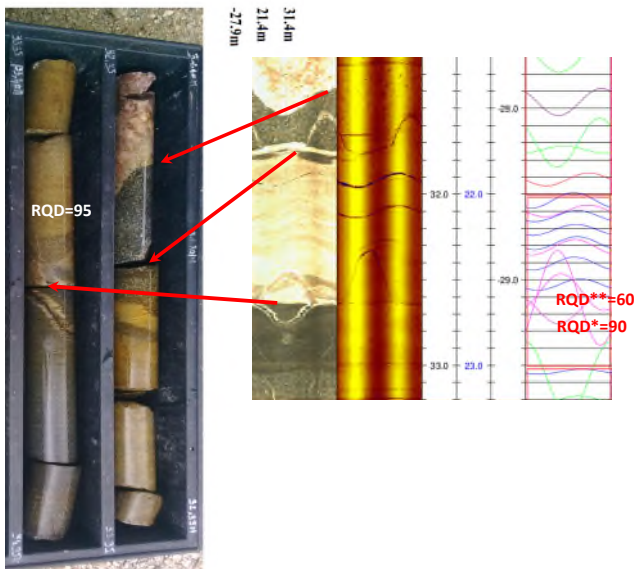


Figure 2: SC110 -28.5 à -29.5 comparaison des carottes et diagraphie examen de la foliation

Le SC110 montre entre les cotes -28.5 à -29.5 un RQD de 95 avec un RQD* de 90 et après prise en compte de la foliation un RQD** de 60 : Malgré une incertitude de nivellement entre le log et les diagraphies, la traversée d'un filon de quartzite permet un repérage parfait en altitude. Cela permet un détailler des correspondances entre les carottes et les diagraphies donnée figure 2.

Il apparait que les foliations repérées en bleu entre les cotes -28,5 et -29,5 sont des alternances de minéraux blancs et noirs ne donnant pas de faiblesses structurales. Ils n'ont donc pas été relevés dans le RQD. Pour l'évaluation du RQD** il convient donc de les écarter.

Le SC115 montre des valeurs de RQD et RQD** basses entre les cotes -34.5 et -37.5 mais avec une différence notable entre les deux évaluations de -35.5 à -36.5. L'examen des carottes et des diagraphies présentées figure 3, confirme (Gasc-Barbier et al 2010) avec une sous-estimation du RQD pour les fracturations denses en raison de la création de fractures artificielles. Nous écarterons cette valeur dans notre analyse statistique.

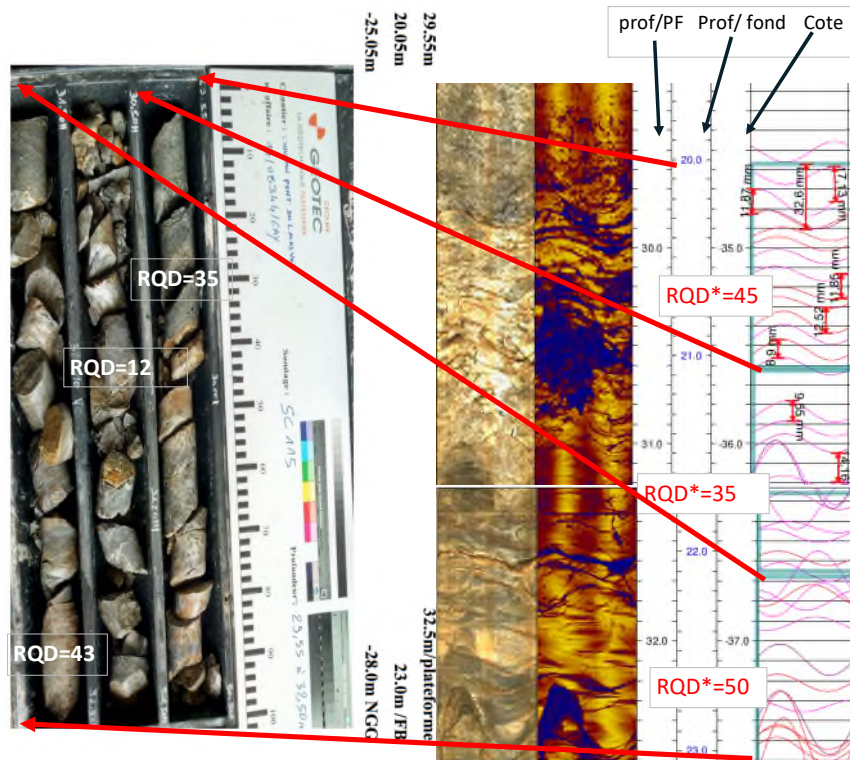


Figure 3: SC115 -28.5 à -29.5 Comparaison des carottes et diagraphies examen de la foliation

Les SC116 et SC117 et SC120 montrent des pegmatites grossières avec des cristaux de quartz pluricentimétriques et à la jonction entre eux, des minéraux noirs plus tendres et plus altérables. Au carottage, il y a eu rupture des carottes au niveau des minéraux

sombres du fait des efforts parasites. Un exemple de ce qui est observé est donné figure 4. Les RQD obtenus sont douteux et nous les écarterons dans l'analyse statistique.

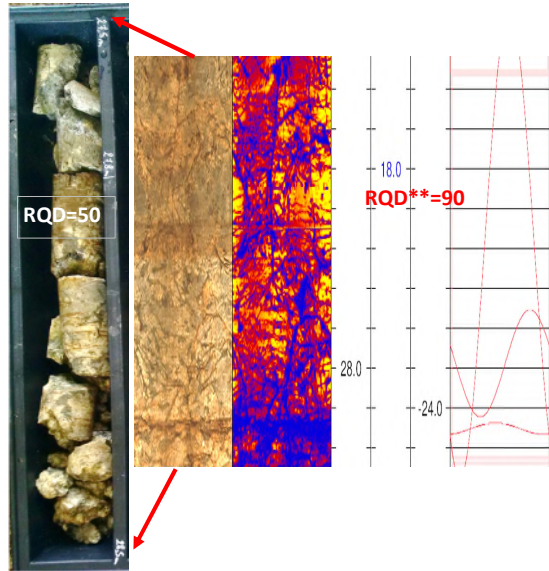


Figure 4: SC116 -23.1 à -24 comparaison des carottes et diagraphie examen de la rupture des carottes

SC-P01-P2 recoupe une alternance de filons de pegmatites grossières et de diorites à structure foliacée. La comparaison figure 5 montre pour la passe supérieure un RQD de 65 pour un RQD** de 85 et pour la passe inférieure un RQD de 67 pour un RQD** de 63. Cela résulte probablement d'une imprécision dans les limites de passes associée à une expression de quelques joints complémentaires lors du carottage par rupture de litage. Nous conserverons ces valeurs qui sont l'expression des imprécisions de la corrélation.

Nous écarterons par ailleurs le point de SC-P11-P2 mesuré des cotes -32.5 à -33.65 dans un granite légèrement altéré à intrusion de diorite où le carottage a amplifié la fracturation (voir figure 6).

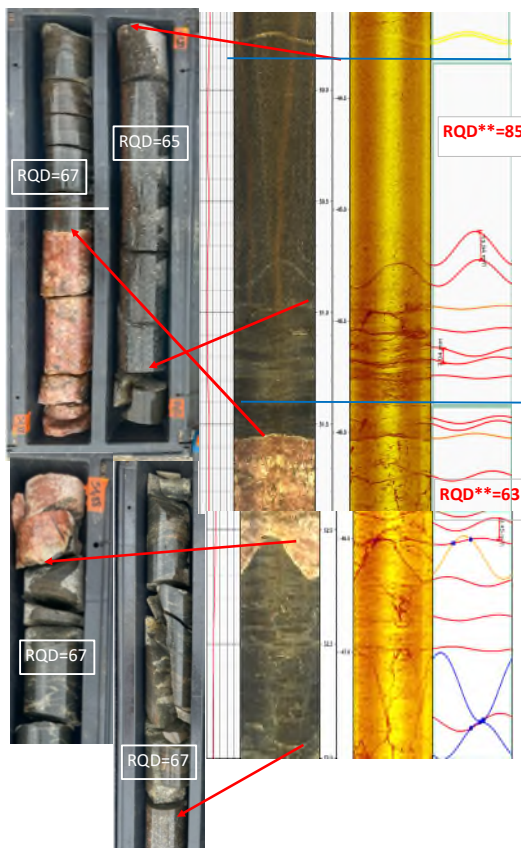


Figure 5: SC-P01-P2 de -44.3 à -47.9 comparaison des carottes et diagraphies examen de la rupture des carottes au niveau des foliations

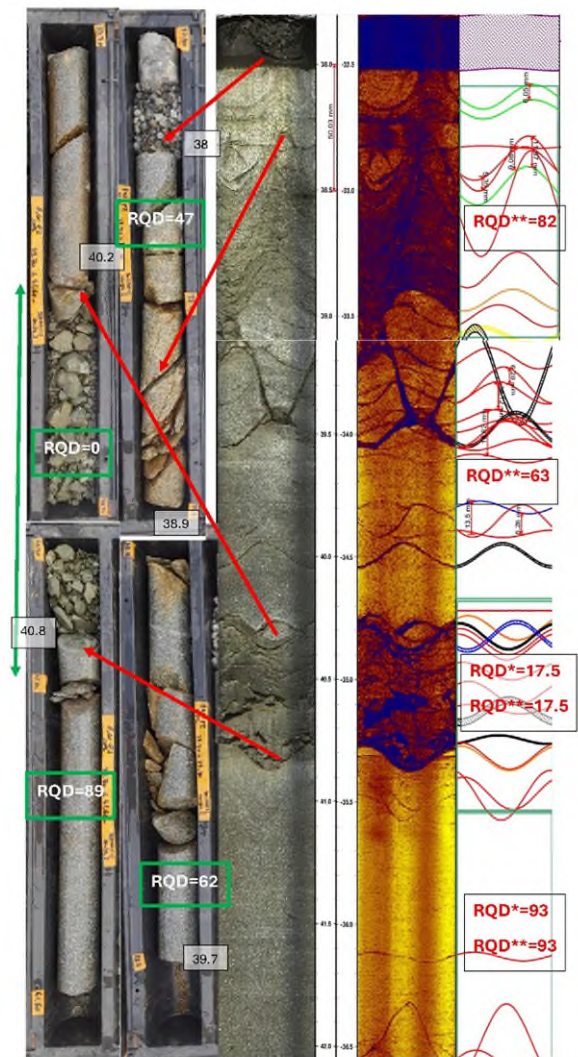


FIGURE 6: SC P11-P2 : comparaison des carottes et diagraphies : Sous-estimation du RQD dans les terrains fracturés

Sur le même forage, nous écarterons le point mesuré de -34.7 à -35.2 où le carottage a complètement détruit (RQD=0) une passée de diorite fortement litée avec un RQD** de 17.5. Cet exemple illustre la sous-estimation du RQD dans les sols densément fracturés.

2.3.3 Présentation de la corrélation corrigée

Le graphique de corrélation corrigé obtenu après les corrections précédentes se trouve figure 8. Il montre une relative bonne corrélation entre RQD et RQD** permettant une analyse statistique de la correspondance entre les deux valeurs.

2.4 Analyse statistique

Nous étudierons la variable :

$$u = |RQD - RQD^{**}| \quad (2)$$

Cette variable correspond à l'écart entre RQD et RQD** connaissant RQD et aussi à l'écart entre RQD** et RQD connaissant RQD**.

Ses caractéristiques sont :

- Taille de l'échantillon 196 mesures
- Moyenne $m(u)=5.07$
- Ecart type $s(u)=6.5$

Le diagramme de répartition est présenté figure 7:

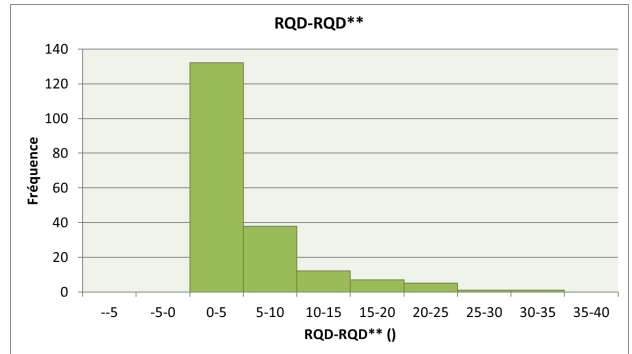


Figure 7: répartition de la variable $u=RQD-RQD^{**}$

A partir de ces éléments, on peut déduire l'intervalle de confiance de cette variable. Il permet de définir une marge d'erreur acceptable entre les résultats des mesures et l'ensemble de la formation.

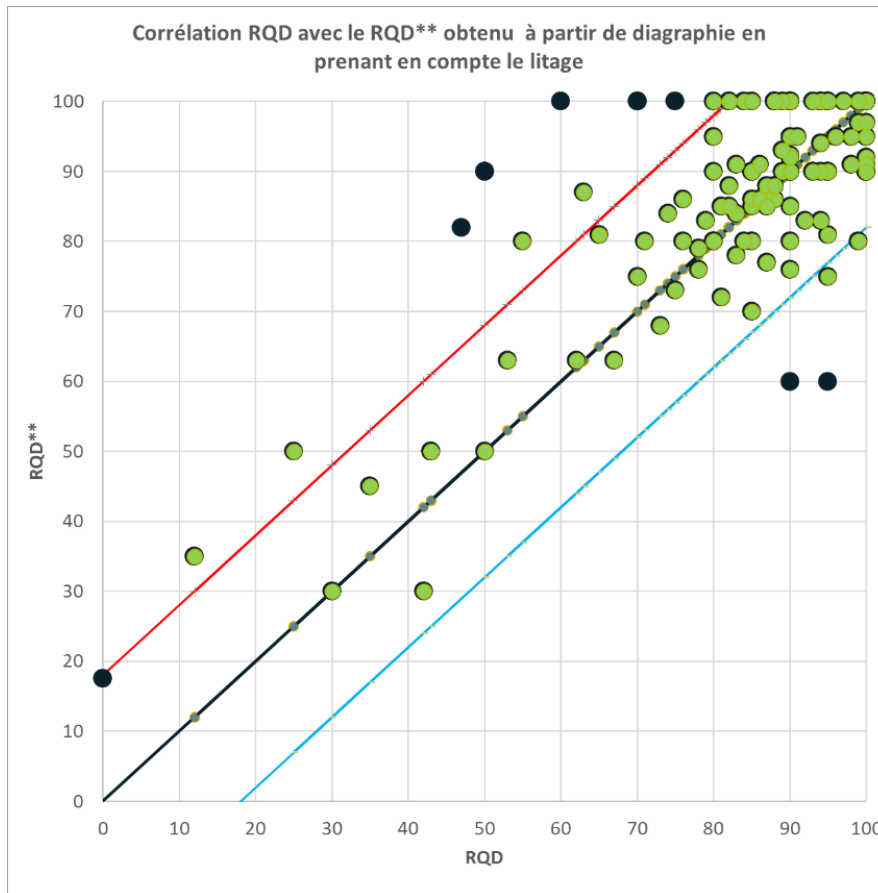


Figure 8: Relation RQD RQD** sur les mesures corrigées

Par exemple, un résultat donné avec un intervalle de confiance de 95 % fréquemment utilisé en géotechnique signifie qu'il y a 95 % de chances que la valeur donnée soit à l'intérieur de l'intervalle défini.

Les intervalles de confiance sont fonction de la taille n de l'échantillon. Lorsque le nombre de valeurs est suffisant et que la population s'ajuste à une loi normale (moyenne m et écart type σ), les bornes de l'intervalle de confiance à 95 % de la moyenne d'un échantillon de taille n prélevé dans une population de répartition normale sont définies par la relation ci-après :

$$X_{95\%} = m \pm 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

U mesurant la valeur absolue de la différence entre RQD et RQD** seule la borne supérieure peut être observée. On déduit donc de (3) dans l'hypothèse d'une répartition normale avec $n=1$ pour un tirage unique :

$$|RQD - RQD^{**}|_{95\%} = m + 1,96 \cdot \sigma = 18 \quad (5)$$

La figure 8 représente le graphique les valeurs de RQD et RQD** après application du traitement décrit au paragraphe 2.3.2. Les points noirs sont les points expérimentaux qui ont été écartés de l'analyse statistique, la droite rouge est la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95% de l'estimation de RQD à partir de RQD**. La droite bleue est la borne inférieure de l'intervalle de confiance à 95% de l'estimation de RQD à partir de RQD**.

La corrélation est nette avec une certaine dispersion qui résulte probablement :

- Des problèmes locaux d'éclairage de fissures fines et de turbidité des eaux. Ils semblent très peu nombreux.
- De l'absence de prise en compte lors de l'analyse des diagraphies de ruptures ne correspondant pas à des plans.
- De la sous-estimation du RQD à partir des carottes dans les sols densément fracturés.
- Les incertitudes de détermination du RQD et du RQD** dans le cas de passes comportant plusieurs éléments d'une dimension proche de 10 cm.

3 APPLICATION

Considérons le cas d'un ouvrage d'art fondé sur le rocher étudié ici où les valeurs de la résistance de la matrice de la roche σ_{ci} sont telle que la résistance de calcul sous la pointe du pieu est supérieure à la résistance du béton pour un RQD > 30. Il y a donc deux

types de rocher, un rocher suffisamment sain (RQD > 30) et un rocher trop altéré (RQD < 30).

Dans les zones où l'on ne dispose que de diagraphie la relation (5) permet d'affirmer avec une probabilité de 95% que la résistance de calcul du rocher sera supérieure à celle du béton dès que l'on aura :

$$RQD^{**} > 30 + |RQD - RQD^{**}|_{95\%} = 48 \quad (6)$$

Il est donc possible d'envisager pour la détermination de la portance d'une fondation au rocher, de se baser sur des imageries réalisées dans des sondages destructif au rocher.

Pour cela on s'appuie sur une campagne comportant des carottages avec diagraphie. Elle sera utilisée pour améliorer l'établissement des RQD à partir des imageries.

Elle permettra ensuite d'établir un guide d'interprétation des images à l'usage du géologue interprétant les diagraphies et enfin d'établir, comme présenté au paragraphe 2.4, une correspondance statistique entre les RQD et les RQD*.

On pourra alors utiliser cette relation statistique et le guide d'interprétation procéder à la détermination d'un RQD statistiquement représentatif sur la base d'imageries réalisées dans des destructifs et compléter ainsi les données pour le dimensionnement des fondations.

4 CONCLUSIONS

L'analyse de la correspondance entre les RQD sur carotte et le RQD* sur imagerie des parois montre une dispersion importante due en partie à des imprécisions dans la détermination du RQD telle que la prise en compte de fractures résultant de l'extraction de la carotte et de l'imprécision sur la longueur des éléments de carotte proche de 10cm. La non-détection par les diagraphies de joints de faible épaisseur peut jouer un rôle mais moins important.

Une analyse de la correspondance entre les RQD et le RQD** sur imagerie de paroi en prenant en compte la foliation lorsqu'elle donnait des joints a été conduite. Elle montre qu'une fois les corrections du RQD prises en compte, une corrélation nette apparaît entre le RQD et le RQD**. Elle permet d'établir pour le type de rocher étudié une loi statistique permettant de passer du RQD* ou du RQD** sur imagerie, au RQD utilisable pour le calcul de la portance. Les éventuelles contestations liées à l'utilisation des imageries pour le calcul des fondations au rocher par la méthode de Soriano pourront donc être écartées. Les analyses comparatives détaillées confirment que la

mesure sur carotte sous-estime le RQD dans les rochers fortement fracturés (voir SC P11-P2 par exemple).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Darras V., Durville J-L., Gaudin B., Haiun G., Jezequel J-F., Lefaucheur D., Maurel C., Rat M., Renault J., Restituto J., Rochet L. Virely D., (2009). *Fondation au rocher Reconnaissance des massifs rocheux conception et dimensionnement des fondations-TER-23407*, 1^{er} éd. Edition du SETRA, ISBN :978-2-11-095822-7
- AFNOR (2004) Norme NF EISO14689-1 Reconnaissance et essais géotechniques Dénomination, description et classification des roches partie 1 Indice de classement P94-401-1
- Gasc-Barbier M. et Fouché O. (2010), Etude comparée de la fracturation observable sur les carottes de forage et obtenues par diagraphie. Application au marbre de Saint Beat (Haute Garonne), Revue Française de Géotechnique (Octobre 2010), DOI : 10.1051/ geotech /2010133037.
- Soriano A. (2003). *Point resistance of piles in rock-* XIII Congress ECSMGE Prague, Vol 3