

UTILISATION DES PARAMETRES COMBINES DE FORAGES DANS LES ETUDES DE RECHERCHE DE CARRIERES SOUTERRAINES

DEVELOPMENT OF COMPOUND DRILLING PARAMETER FOR UNDERGROUND QUARRY RESEARCH STUDY

Alexandre PHILIPPE¹, Ludovic DORE¹, Pierre AZEMARD², Fabrice GAUMET³, Didier VIRELY⁴

¹ Cerema Direction Territoriale Normandie-Centre, Blois, France

² Cerema Direction Territoriale Méditerranée, Aix-en-Provence, France

³ Cerema Direction Territoriale Ile-de-France, Trappes, France

⁴ Cerema Direction Territoriale Occitanie, Toulouse, France

RÉSUMÉ – Dans le cadre des études de recherche de carrières souterraines, les sondages destructifs sont généralement employés. Leur interprétation peut se révéler complexe étant donné les facteurs qui influent sur l'exécution des sondages. La mise en place d'un paramètre combiné permet de faciliter l'interprétation des anomalies et de mieux comprendre la structure du massif de terrain encaissant des carrières.

ABSTRACT – Destructive drillings are widely used for finding underground quarries. However, their interpretation may be a complex task, because numerous external factors might affect their execution. Developing a compound drilling parameter helps interpreting anomalies and allows a better understanding of the geological context around quarries.

1. Introduction

Lors d'études de recherches de carrières souterraines abandonnées, les sondages destructifs avec enregistrement des paramètres de forage constituent une solution généralement adoptée pour repérer des vides inconnus, après la réalisation ou non d'une campagne de reconnaissance géophysique (Bénot et al., 2021). Outre la possibilité de reconnaître directement des vides en les traversant, les sondages destructifs permettent d'obtenir une quantité significative d'informations sur le massif encaissant des carrières souterraines. Ces informations sont un préalable pour comprendre les mécanismes de dégradation des vides découverts et ainsi qualifier l'aléa mouvement de terrain qu'ils sont susceptibles de générer. Dans ce cadre, l'utilisation des paramètres combinés de forage peut permettre de faire ressortir les transitions de lithologie du massif dans lequel les vides ont été creusés et de qualifier la compacité des terrains. Leur utilisation se révèle néanmoins complexe lorsque plusieurs ateliers de sondages ont été utilisés pour la même campagne de reconnaissance.

À la suite de la redécouverte de la plus vaste carrière souterraine du territoire orléanais, une étude de recherche de vides et d'analyse des risques a été lancée par la ville d'Orléans. Elle porte sur une zone d'étude de 3,5 ha en partie nord du centre-ville, au Faubourg Saint-Vincent. Une campagne de reconnaissance géotechnique a été exécutée par le Cerema. Entre autres, 61 sondages destructifs ont été réalisés après une phase de reconnaissance par des mesures microgravimétriques (Philippe et al., 2022). 1 km de diagraphies de forages a ainsi été collecté. Un traitement spécifique a été appliqué aux paramètres de forage pour mieux caractériser le massif de terrain encaissant les vides découverts.

Au cours de cette étude, plusieurs combinaisons de paramètres ont été testées et une combinaison spécifique a été établie. Elle a été étalonnée sur la base d'observations effectuées dans les vides accessibles et des résultats d'investigations géotechniques et géophysiques associées.

2. Contexte général et investigations réalisées

2.1. Généralités sur les données d'investigations disponibles

Les objectifs de l'étude confiée par la ville d'Orléans sont de caractériser l'extension maximale de la carrière souterraine découverte, de qualifier l'existence de vides aveugles et de caractériser le risque de mouvement de terrain généré par les vides connus. Outre une campagne de sondages destructifs, des investigations géophysiques et géotechniques ont ainsi été mises en œuvre (Figure 1). Elles sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : détails des investigations entreprises dans le cadre de l'étude

Nature des investigations	Objectifs
Scan 3D des carrières souterraines	Topographier précisément le développement souterrain et définir l'altitude des transitions entre les différents faciès de roche constituant le massif
Observations dans les carrières souterraines accessibles	Caractériser les différents niveaux rocheux constituant le massif encaissant – Repérer des signes de dégradation et caractériser le risque de mouvement de terrain
Tomographie de résistivité électrique	Qualification de la forme du contact entre les terrains de couverture et le substratum calcaire dans lequel ont été creusés les vides
Sondages carottés	Vérification de l'altitude du substratum calcaire et détermination de la nature des terrains de couverture
Essais de laboratoire sur des blocs	Essais de résistance sur des éprouvettes cubiques usinées sur des blocs extraits de la carrière souterraine - Caractérisation de la résistance mécanique des niveaux rocheux constituant le massif

L'analyse des résultats des sondages destructifs exécutés dans la phase de recherche de vides s'effectue ainsi à l'aune des résultats des autres investigations réalisées sur le périmètre d'étude.



Figure 1 : vue générale de la carrière souterraine redécouverte et investigations

2.2. Suite lithologique

Le croisement des résultats des différentes phases d'investigations détaillées dans le Tableau 1 met en évidence la suite lithologique suivante (Figure 2) :

- Couche 0 – des remblais d'aménagement ;
- Couche 1 – les marnes de l'orléanais, se divisant au droit du site en une couche de marnes beige crème (faciès 1a) et une couche d'argile verte plus ou moins chargée en rognons de calcaire (faciès 1b) ;
- Couche 2 – les calcaires de l'orléanais, comprenant un calcaire altéré bréchiq ue beige à beige jaune (faciès 2a) et une couche de calcaire tendre et de marne beige crème à silex (faciès 2b) ;
- Couche 3 – le calcaire de Pithiviers, caractérisé par un calcaire compact gris vacuolaire présentant des fossiles de *planorbis declivis*.

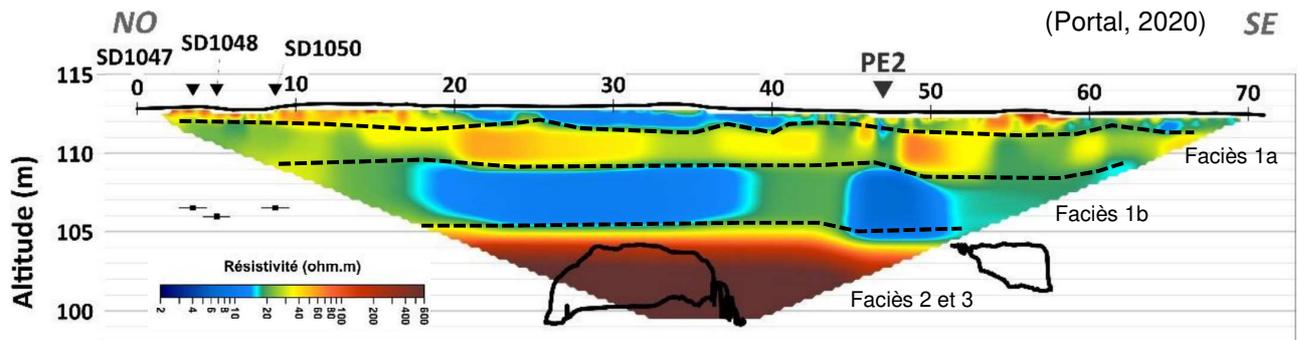


Figure 2 : tomographie de résistivité électrique et faciès de terrain

Le croisement des résultats des différentes phases d'investigations permet de repositionner l'interface entre les marnes de l'orléanais (terrain de couverture) et le substratum calcaire à une altitude approximative de 106 mNGF. Les transitions entre les différents faciès de roche sont également recalées à l'aide des observations en carrière.

2.3. Objectifs de la phase d'exploitation des diagaphies de paramètres de forages

Outre la détection de vides dans le sous-sol, le traitement des diagaphies de paramètres de forages destructifs réalisés dans le cadre de l'étude répond à plusieurs objectifs :

- caractériser précisément les variations lithologiques des différents faciès de terrain à l'échelle de la zone d'étude de 3,5 ha de manière à caractériser le massif encaissant de vides aveugles découverts et non visitables ;
- favoriser l'interprétation d'anomalies de décompression identifiées par les forages ;
- définir une combinaison de paramètres, réutilisable dans des contextes équivalents, permettant de limiter le volume d'investigations en extrayant des diagaphies de paramètres de forage le maximum d'informations utiles à la définition du contexte géotechnique du site.

3. Campagnes de sondages destructifs et tests de combinaisons de paramètres

3.1. Sondages destructifs et paramètres enregistrés

3.1.1. Sondages destructifs réalisés

Dans le cadre de l'étude sur le site du faubourg Saint-Vincent, 63 sondages destructifs ont été réalisés au cours des années 2020-2021. 3 ateliers hydrauliques ont été employés. Dans le détail : 27 sondages ont été réalisés avec un atelier type COMACCHIO GEO601, 26 avec un atelier type SEDIDRILL 500 et 10 avec un atelier type SOMAC SD210-50.

Les sondages réalisés avec les 2 premiers ateliers cités ont été exécutés à l'aide d'un tricône à boutons \varnothing 114 mm équipant un train de tiges \varnothing 76 mm. Ils ont été descendus à des profondeurs variant entre 15 et 18 m, profondeur définie en fonction de celle connue dans les carrières souterraines environnantes. Les sondages ont été exécutés verticalement depuis la surface, en rotation pure à l'aide d'un fluide de forage (eau claire + GSP). Ils sont numérotés SD1001 à SD1053. Les sondages réalisés à l'atelier de type SOMAC SD210-50 ont été exécutés selon une technique différente au regard des capacités plus limitées de l'atelier (tarière et marteau fond de trou). Ils ont été exclus du processus.

3.1.2. Paramètres enregistrés

Les ateliers de sondages COMACCHIO GEO 601 et SEDIDRILL 500 sont équipés d'enregistreurs LUTZ type LUBAP.

Les paramètres suivants sont notamment enregistrés

- la vitesse instantanée d'avancement (VIA) en m/h ;
- la pression de poussée sur l'outil (PO) en bar ;
- la pression de retenue (PR) en bar ;
- le couple de rotation (CR) en bar ;
- la pression d'injection du fluide de forage (PI) en bar.

Pour obtenir la pression sur l'outil ou la pression de retenue corrigée, il conviendrait d'effectuer une mise à l'échelle avec la valeur de poussée maximale ou de pression de retenue maximale évaluée lors de l'étalonnage et en prenant en compte le poids des tiges. Par souci de simplification, cette mise à l'échelle n'a pas été réalisée. Dans la suite de l'article, la pression de poussée PO et la pression de retenue PR correspondent aux pressions brutes non corrigées.

3.1.3. Protocole ECL

Dans le cadre de la campagne de recherche de cavités souterraines, les diagraphies de paramètres de forage ont été comparées systématiquement à celles obtenues dans un vide franc (Essai de Chute Libre ou ECL) afin d'identifier les vides potentiels et/ou terrains décomprimés. Les sondages ont ainsi été réalisés avec la procédure ECL spécifique au fournisseur d'enregistreur de paramètres de sondages (Figure 3). La procédure consiste, après chaque passe de forage, à remonter l'ensemble du train de tiges et à le laisser retomber en chute libre dans le forage. Ceci permet de mesurer la vitesse de chute dans un vide simulé à différentes profondeurs et de la comparer à la vitesse enregistrée au moment de l'exécution du sondage. L'application du protocole, sur l'ensemble de la hauteur des sondages, permet de déceler aisément les zones de vides francs.

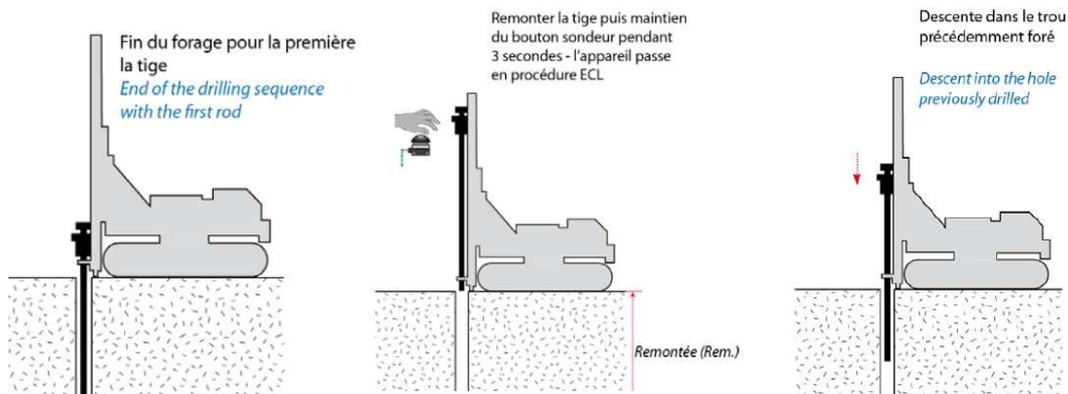


Figure 3 : illustration de la procédure ECL

3.2. Combinaisons de paramètres testées dans le cadre de l'étude

L'étude des diagraphies instantanées obtenues à l'issue de la campagne d'investigations montre :

- qu'il est parfois difficile de différencier des niveaux très décomprimés de vides francs ou de différencier des remblais de carrières souterraines d'anomalies lithologiques dans le massif rocheux ;
- que dans un contexte de roches tendres, il est parfois compliqué d'apprécier précisément les différentes limites des horizons de terrain constituant le sous-sol sur la seule base des diagraphies de paramètres de forage.

L'objectif étant de pouvoir obtenir une coupe géologique précise du sous-sol, ceci malgré un nombre restreint de sondages carottés, il a été décidé de s'orienter vers l'utilisation de combinaisons de paramètres. Pour peu qu'une seule technique de foration soit considérée, l'avantage de ces combinaisons de paramètres est qu'elles peuvent être quasiment indépendantes des conditions de réalisation (Reiffsteck, 2010).

Ceci est intéressant dans ce cas d'étude, où plusieurs ateliers de sondages ont été employés et où plusieurs sondeurs se sont succédés sur un même atelier. Plusieurs combinaisons de paramètres ont été testées dans le cadre de l'étude et sont présentées dans le Tableau 2. La formule d'indice de vides équivalent ou de l'énergie de rotation n'ont pas été testées car réputées trop dépendre des conditions de foration pour l'une ou ne permettant pas de classer des horizons de roche tendre les uns par rapport aux autres.

Tableau 2 : combinaisons de paramètres testées dans le cadre de l'étude (Reiffsteck, 2010)

Nom	Relation	Paramètres
Indice d'altération de Pfister (Pfister, 1980)	$I_A = 1 + k_0 \cdot \left(\frac{P}{P_{\max}} - k_1 \cdot \frac{V_A}{V_{\max}} \right)$	I_A l'indice d'altération (-) ; k_0 constante généralement égale à 1 ; k_1 constante généralement égale à 1 ; P la pression sur l'outil nette (bar) ; P_{\max} la pression maximale sur l'outil nette (bar) ; V_A la vitesse d'avancement de l'outil (m/h) ; V_{\max} la vitesse d'avancement maximale de l'outil (m/h) ;
Indice de résistance à la pénétration	$R_p = (t)_{dz=0,2m}$	R_p le Soil Rock Sounding (s) t le temps de traversée d'un horizon de terrain
Indice de Somerton modifié (Somerton, 1959)	$S_d \approx \frac{P_E}{\sqrt{V_A}}$	S_d l'indice de Somerton modifié (-) ; P_E la pression effective sur l'outil (bar) (PO-PR) ; V_A la vitesse d'avancement (m/h)

3.3. Comparaison des différentes combinaisons de paramètres testées

Les diverses formulations ont été comparées (Figure 4).

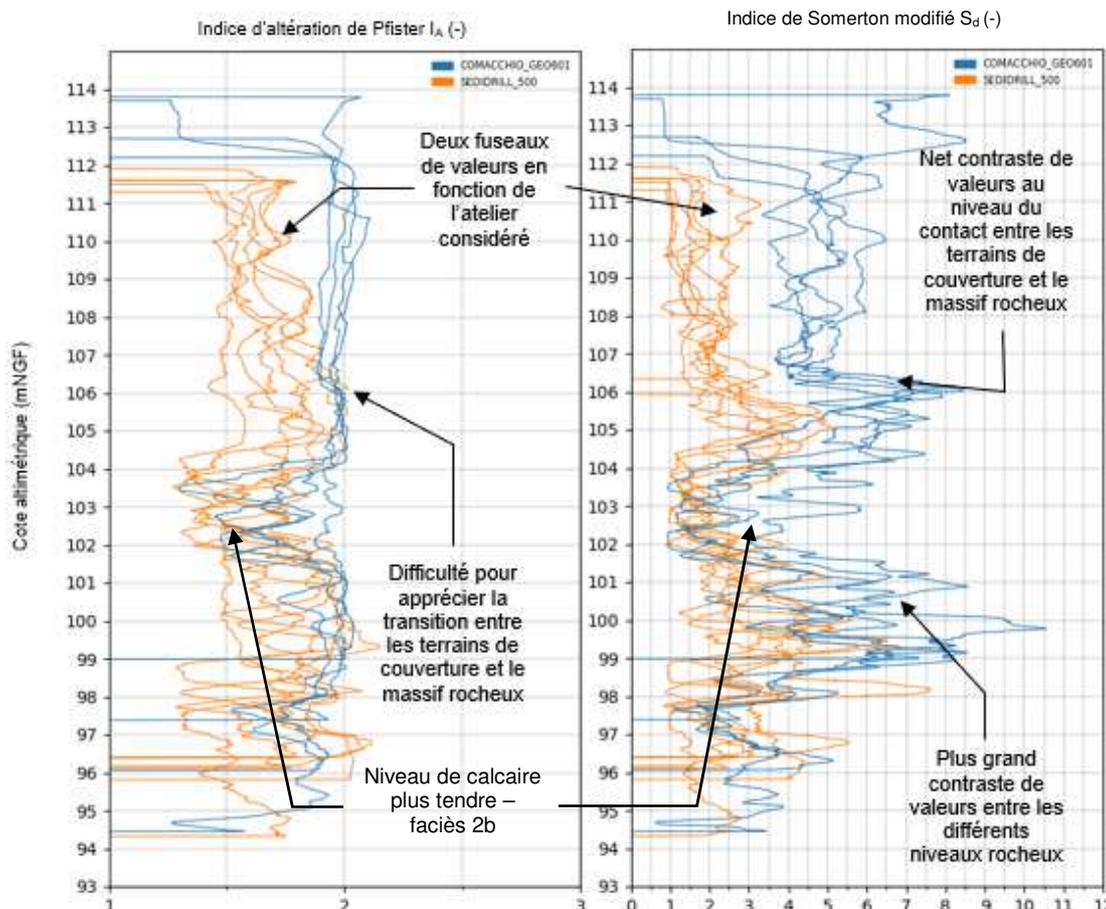


Figure 4 : test de l'indice d'altération de Pfister et de l'indice de Somerton modifié pour des sondages ne traversant pas des carrières souterraines ou leurs phénomènes de dégradation

Le test des différentes combinaisons de paramètres tend à montrer que :

- l'indice d'altération de Pfister (avec $k_0 = k_1 = 1$) permet d'apprécier les zones de roche plus tendres dans le massif de terrain. Il permet difficilement d'apprécier le contact entre les terrains de recouvrement et le massif rocheux.

En ce qui concerne la caractérisation des anomalies, si les vides se caractérisent par une valeur proche de 1, les remblais de carrière/éboulis décomprimés peuvent présenter une valeur s'approchant de celle des terrains en place les rendant difficilement distinguables ;

- l'indice de Somerton permet de faire ressortir nettement les contrastes entre les différents horizons de terrain. Les zones de carrières souterraines plus ou moins remblayées présentent des valeurs faibles à très faibles (de l'ordre de 0 à 2) les rendant très nettement observables ;
- l'indice de résistance à la pénétration ne permet pas de faire ressortir les contacts entre les différents horizons de terrain aussi bien que l'indice de Somerton.

Au regard de la comparaison des courbes de valeurs des différentes combinaisons de paramètres l'indice de Somerton a été privilégié.

4. Constitution d'un paramètre combiné spécifique

L'analyse des courbes de valeurs de l'indice de Somerton modifié montre qu'il semble exister un « effet machine ». Les courbes de valeurs obtenues avec un même atelier de sondage se positionnent dans un même fuseau (Figure 4). Deux fuseaux bien distincts sont ainsi obtenus, l'un pour l'atelier de sondage type SEDIDRILL 500, l'autre pour l'atelier de sondage type COMACCHIO GEO601.

Il a donc été décidé de définir un coefficient machine pour pouvoir comparer l'ensemble des valeurs entre elles. Cette approche a déjà été développée par le passé (Frossard et Reboul, 2018). Pour définir ce coefficient machine, les sondages SD1027 et SD1028 ont été considérés. Ils ont été réalisés à l'aide des deux ateliers, à proximité l'un de l'autre. Le coefficient machine C_m est pris égal à la valeur médiane de l'indice de Somerton modifié sur l'épaisseur de la couche d'argile verte non remaniée (faciès 1b des Marnes de l'Orléanais). Le paramètre K est introduit. Il peut être calculé selon la relation (1).

$$K = \frac{S_d}{C_m} \quad (1)$$

Avec K l'indice de Somerton modifié et corrigé ;

S_d l'indice de Somerton modifié ;

C_m le coefficient machine avec $C_{m_{SED500}} = 2,5$ et $C_{m_{GEO601}} = 4,1$.

L'analyse des graphiques de valeur du paramètre K montre que même pour les zones de vides, la valeur de K n'est pas nulle et est égale à la valeur de K à l'ECL. Ceci est induit par la pression de retenue régnant dans le circuit de retour dans la machine (freinage dû au frein de sécurité). Pour exacerber les contrastes entre les terrains fortement décomprimés issus de remaniements anthropiques et les terrains naturellement peu compacts, le paramètre K est calculé à l'aide des paramètres ECL. La valeur est retranchée au paramètre K (élimination de l'effet induit par le circuit de retour) en suivant la relation (2).

$$I = \frac{(K - K_{ECL})}{(K_{calc} - K_{ECL})} \times 10 \quad (2)$$

Avec I l'indice de compacité local spécifique au périmètre d'étude (-) ;

K l'indice de Somerton modifié corrigé par le coefficient machine (-) ;

K_{ECL} la valeur du paramètre K prise à l'ECL (valeur quasi-constante pour l'ensemble des sondages, quelle que soit la profondeur et quel que soit l'atelier de sondage considéré et pris égal à 0,2) ;

K_{calc} la valeur du paramètre K pris dans la couche de calcaire compact (-).

Par ailleurs, de manière à permettre une caractérisation locale de la compacité, le paramètre K est calibré de 0 à 10, la valeur de 10 étant obtenue lors de la traversée de l'horizon de calcaire le plus compact connu sur le secteur. Il s'agit, dans ce cas d'étude, du calcaire vacuolaire gris de la couche 3. Le croisement des différentes investigations réalisées à l'échelle de la zone d'étude permet d'établir une échelle de valeur de l'indice I de compacité locale (Tableau 3).

Tableau 3 : échelle de valeur et de compacité de l'indice I

Valeur d'indice I	Qualification de la compacité des terrains
0-1	Terrain très décomprimé à vide
1-4	Terrain lâche à décomprimé
4-6	Terrain moyennement compact
6-8	Terrain compact
8-10	Terrain très compact

Le traitement appliqué (Figure 5) et cette combinaison de paramètres sont un atout pour la définition précise du modèle géologique et géotechnique.

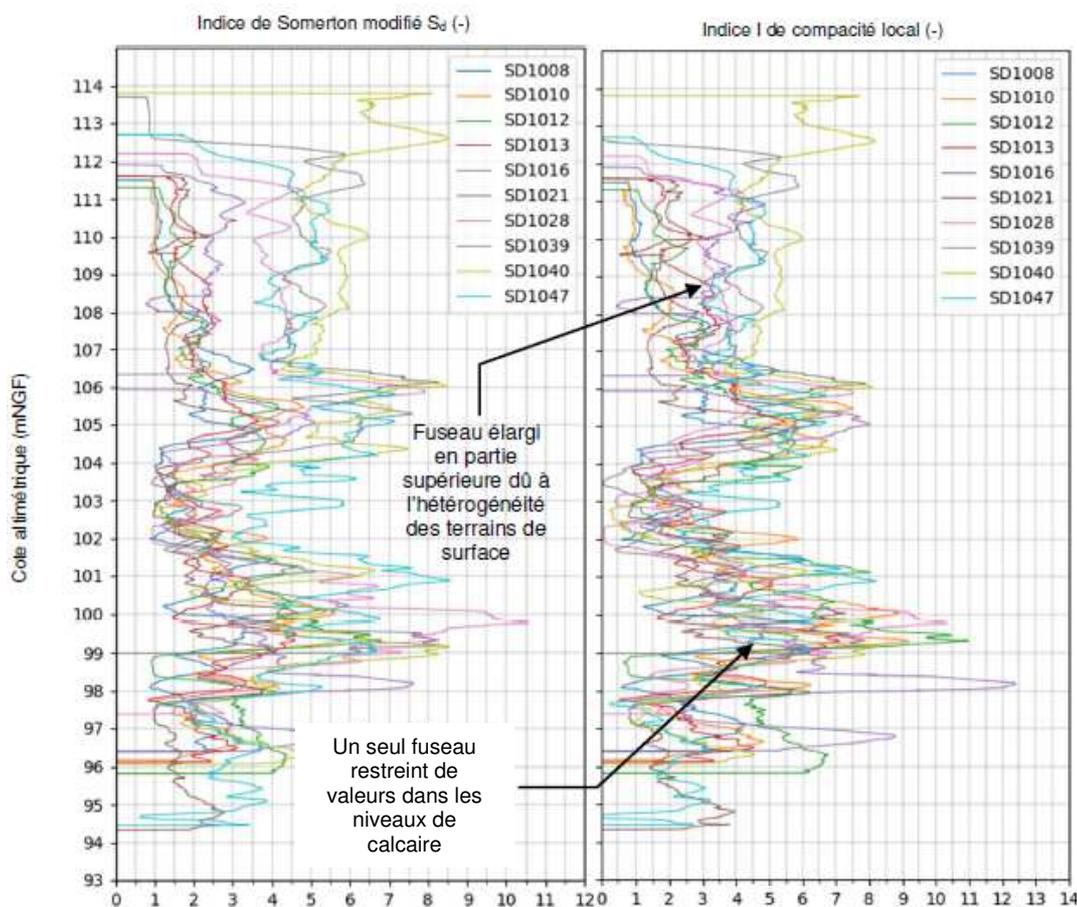


Figure 5 : traitement appliqué à l'indice de Somerton modifié sur des sondages non remaniés par la présence de carrières souterraines ou par leurs phénomènes de dégradation

5. Exploitation de la combinaison de paramètres

L'exploitation des diagraphies de l'indice I pour chacun des sondages avec la diagraphie « signature » du massif encaissant des carrières souterraines permet de réaliser une interprétation fine des anomalies découvertes. L'analyse des diagraphies d'indice I permettent de mettre en évidence précisément les interfaces entre les différents faciès de terrain. Les données issues de l'analyse des diagraphies d'indice I sont en adéquation avec

les observations effectuées en carrière souterraine. La Figure 6 donne un exemple d'exploitation des résultats.

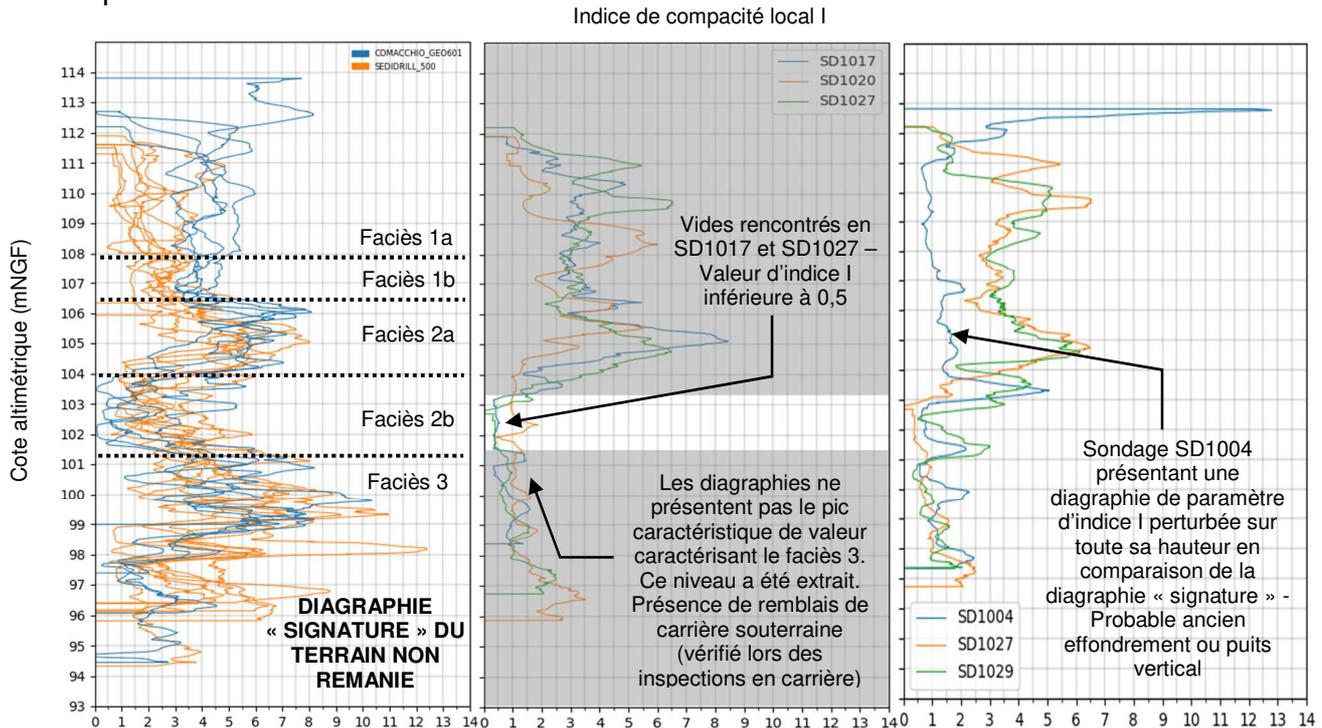


Figure 6 : exemple d'exploitation des courbes d'indice I

6. Conclusions

Dans un contexte de roches tendres remaniées par des carrières souterraines anthropiques, les diagraphies de paramètres de forages destructifs ne sont pas toujours suffisantes pour caractériser les massifs rocheux encaissant des vides creusés ou pour interpréter les anomalies découvertes. L'utilisation de combinaisons de paramètres est un atout précieux pour interpréter les anomalies en se basant sur une diagraphie « signature » du massif de terrain non remanié. Le processus présenté dans le cas d'étude est répétable sur des études au contexte similaire.

7. Bibliographie

- Bénot R., Azémard P., Cote P. (2021). Méthodes de reconnaissance des cavités. Synthèse des connaissances actuelles. Cerema. ISBN : 978-2-37180-486-9. 72 pages.
- Frossard M. et Reboul M. (2016). Mise en place d'un paramètre composé facilitant l'interprétation des paramètres de forage. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur. Nancy 2016. 8 pages ;
- Jacob T., Beaubois F., Maurice B., Yart S., Masson F., Dore L., Philippe A. (2020). Recherche de vide par microgravimétrie dans le quartier Saint-Vincent à Orléans (45). Rapport intermédiaire. BRGM/RP-69769-FR. Mars 2020. 52 pages. 14 ill. 1 tab. 2 ann ;
- Philippe A., Dore L., Jacob T., Yart S. (2022). A paraître. Redécouverte de la plus vaste carrière souterraine anthropique d'Orléans. 11^{ème} Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur. Lyon 2022. 8 pages.
- Portal A. (2020). Reconnaissance des formations géologiques superficielles par tomographie de résistivité électrique 2-D au droit des carrières du faubourg Saint-Vincent. Orléans (45). Rapport final. BRGM/RP-70418-FR. 22 pages.
- Reiffsteck P. (2010). Paramètres de forage en géotechnique. Méthode d'essai des Ipc n°79. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées. Laboratoire central des ponts et chaussées. 58 pages.