

Ville du Locle

STEP LE LOCLE

RAPPORT GÉOTECHNIQUE

BG Ingénieurs Conseils SA

Rue de Monruz 2 - CH-2000 Neuchâtel

T +41 58 424 24 00 – F +41 58 424 24 99 – neuchatel@bg-21.com – www.bg-21.com

CHE-116.329.587 TVA

STEP LE LOCLE

RAPPORT GÉOTECHNIQUE

VERSION	-	a	b
DOCUMENT	72127.01-RN004		
DATE	3 octobre 2016		
	Roland Paupe		
ELABORATION	Pascale Preisig-Ducommun		
VISA	Roland Paupe		
COLLABORATION	Caroline Serex Mohammad Monfared		
DISTRIBUTION	BG (1 ex.)		

TABLE DES MATIÈRES		Page
1.	Introduction	1
2.	Documents de références	1
3.	Contexte du projet	2
3.1	Contexte général du site	2
3.2	Situation générale du site	2
3.3	Description du projet	3
3.4	Contexte géologique	3
3.5	Contexte hydrogéologique général	5
4.	Campagne de reconnaissance	6
4.1	Implantation des sondages et des essais CPTU	6
4.2	Sondages carottés	6
4.2.1	Stratigraphie	7
4.2.2	Essais SPT, pénétromètre et scissomètre de poche	7
4.2.3	RQD	8
4.2.4	Essais CPTU	9
4.2.5	Résultats des essais en laboratoire	9
4.2.6	Équipement en piézomètre	10
4.2.7	Mesure piézométrique	11
4.3	Synthèse géotechnique	12
4.4	Synthèse hydrogéologique	13
5.	Recommandations constructives	13
5.1	Terrassement et remblayage	13
5.2	Soutènement et talus	13
5.3	Fondations	13
5.4	Gestion des eaux	14

ANNEXES

1. Coupes géologiques
2. Logs des sondages
3. Résultats des essais en laboratoire et CPTU

1. Introduction

Dans le cadre de l'étude d'avant-projet de la nouvelle STEP au Locle, le bureau BG Ingénieurs Conseils SA a été mandaté par la Commune du Locle (M. Perez, le 27.01.2016) pour effectuer une étude géotechnique.

Le présent rapport décrit le cadre géologique, synthétise les travaux de reconnaissance et les essais de laboratoire effectués, propose des caractéristiques géotechniques du sous-sol et présente les recommandations constructives pour le projet.

2. Documents de références

Sondages privés n°12517_LL_CdRoches_21-22-23, (sources SENE); sondages de 1965 (archives Ville du Locle);

Aspects géologiques de la région du Col-des-Roches et du Saut-du-Doubs, R. Stettler, P.-O. Aragno, 12th International Congress of speleology, UIS, La Chaux-de-Fonds, 1997;

<http://www.strati.ch/fr>

Géoportail du canton de Neuchâtel SITN

3. Contexte du projet

3.1 Contexte général du site

3.2 Situation générale du site

Le site étudié constitue le bien-fonds n° 9061. Il se situe dans le canton de Neuchâtel sur la commune du Locle au Col des Roches à l'extrémité ouest de la commune en direction de la frontière française (Figure 1). Le site est situé non loin des Moulins souterrains du Col des Roches, espace culturel et touristique restauré dans les années 1980 par un groupe d'amateurs d'histoire et de spéléologie. L'accès au bien-fonds se fait par la route du Col des Roches.



Figure 1 : localisation du projet (source : Géoportail SITN)

Le site actuel se trouve à une altitude moyenne de 910 m.

Le site est inscrit au cadastre des sites pollués du canton de Neuchâtel comme: "site pollué nécessitant une investigation afin de déterminer s'il requiert une surveillance ou un assainissement" sous le numéro CANEPO 6436-D-0009 selon l'art. 5, al. 4 OSites. Cette problématique fait l'objet d'une étude BG complémentaire suivant la procédure OSites pour laquelle la première phase de l'investigation préalable a déjà été rendue et approuvée par l'autorité compétente (rapport BG 72127.03-RN001_20160425). La deuxième phase de l'investigation préalable qui constitue l'investigation technique est en cours et fait l'objet d'un mandat BG.

Dans le cadre des travaux de terrassement qui seront entrepris pour la réalisation du projet, la problématique de la gestion des déchets et des matériaux d'excavations est traitée dans un autre mandat BG, il s'agit d'une investigation OLED.

Outre la problématique OSites, selon le guichet cartographique cantonal, les points suivants sont à noter pour le site :

- § Selon la carte des dangers, la bordure ouest du site se situe en secteur de "danger faible" pour les chutes de pierres;
- § Le site est soumis à l'OPAM en raison de la présence de chlorure ferrique destiné au traitement des boues de la STEP.

3.3 Description du projet

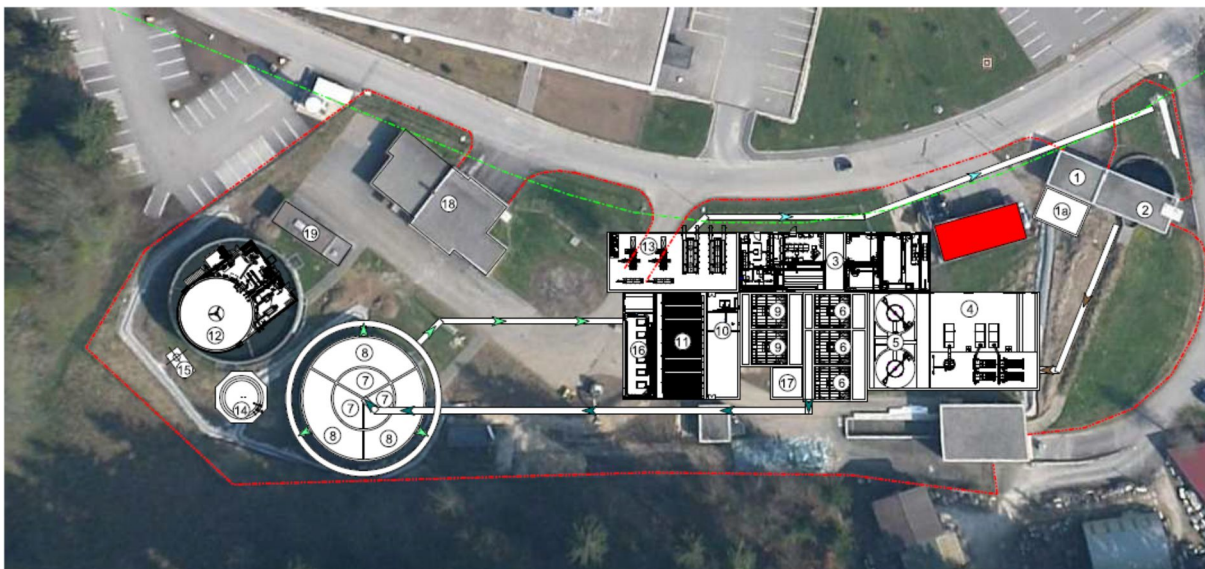


Figure 2 : Esquisse du projet

3.4 Contexte géologique

Le contexte géologique a été appréhendé à partir de la carte géologique spéciale le Locle-le Russey n°1143 au 1/25000 (Figure 3) (www.map.geo.admin.ch, swisstopo), des études existantes dans le secteur et des forages et fouilles réalisées dans la décharge entre 2005 et 2016.

Le Locle est situé dans une vallée synclinale longue d'environ 15 km bordée au sud par l'anticlinal de Sommartel-Mt-Cornu et au nord par l'anticlinal de Larmont-Pouillerel (Figure 5). Sa largeur ne dépasse pas 600 m entre la Chaux-de-Fond et le Crêt-du-Locle, elle s'évase pour atteindre 2,3 km de largeur au Locle puis se resserre pour s'éteindre au Prevoux (Burger et Schaer, 1996). La succession stratigraphique s'étend du Jurassique moyen (Dogger) au Quaternaire (Stettler et Aragno, 1997).

La succession stratigraphique de la vallée du Locle se compose de calcaires et calcaires marneux jurassiques et crétacés, puis de dépôts d'âge tertiaire constitués par une faible épaisseur de molasse et de marnes rouges et dépôts relativement importants de craies lacustres (Oeningien). Finalement, on note la présence de dépôts quaternaires (glaciaires, alluviaux et lacustres).

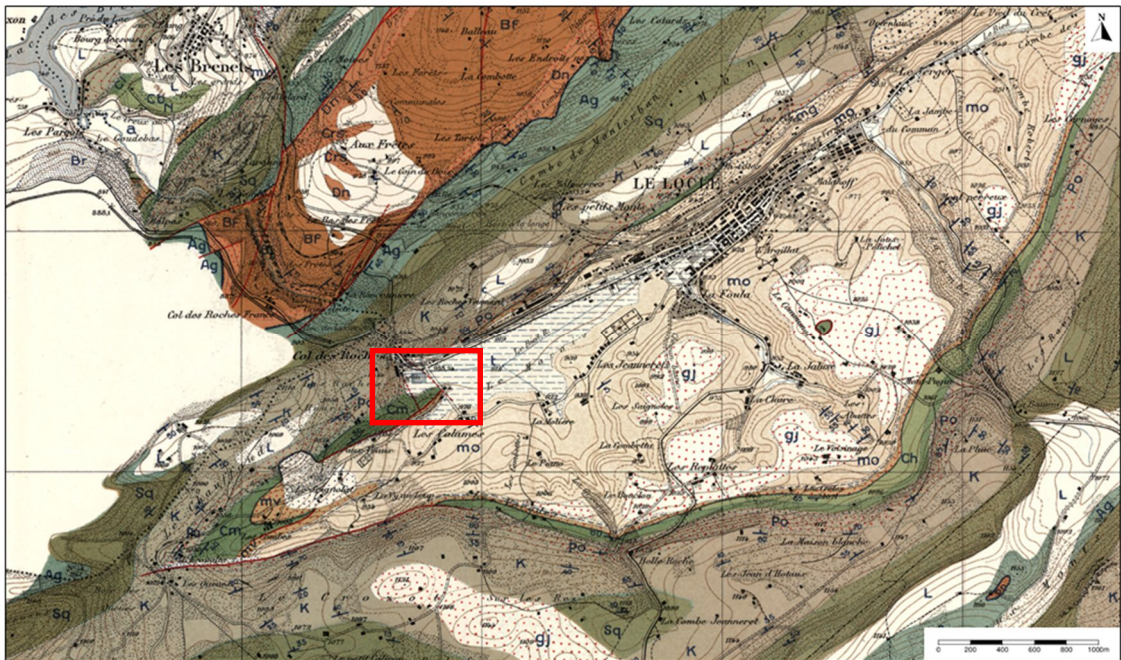


Figure 3 : Contexte géologique la zone d'étude est indiquée en rouge (source SITN).

Une ancienne dépression dans les niveaux de dépôts lacustres quaternaires a été comblée par des déchets reposant sur un substratum rocheux essentiellement Oeningien (Figure 4). L'Oeningien du Locle est essentiellement constitué des craies essentiellement blanches, riches en carbonate, plus ou moins argileuses, très poreuses et assez mal stratifiées (craie lacustre=Pierre morte) mais il renferme aussi des dépôts tourbeux et argileux plus ou moins discontinus.

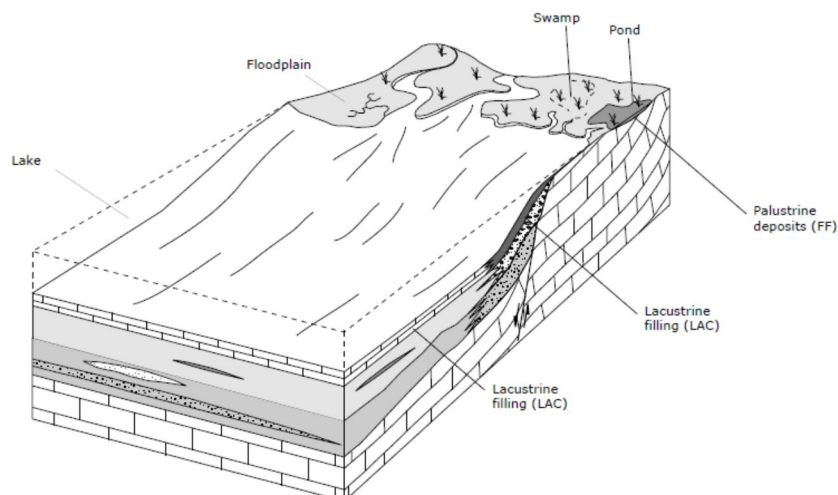


Figure 4 : Paléoenvironnement du lac oeningien au Locle.

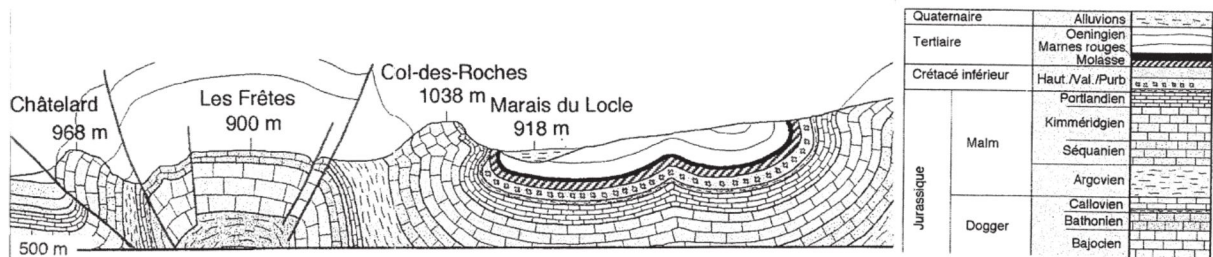


Figure 5 : Coupe géologique schématique partielle du col des roches orientation nord-ouest sud-est, (modifiée d'après Stettler et Aragno, 1997).

Pendant le Quaternaire, on distingue une période de glaciation (Würm) associée à des dépôts composés de matériaux meubles avec galets souvent anguleux, ainsi que d'une formation argileuse à blocs calcaires qui assure l'étanchéité du fond de la vallée dans la région du Col des Roches, puis de dépôts lacustres constitués de limons, de tourbes, de vases lacustres et d'alluvions fines (Figure 6).

Sur le site d'étude, les terrains superficiels sont constitués d'une ancienne décharge communale reposant sur des dépôts lacustres et palustres de l'ancien marais (Quaternaire).

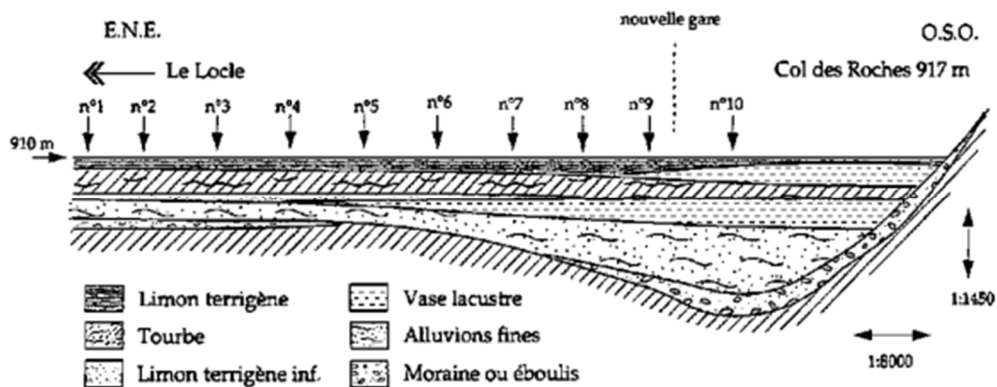


Figure 6 : Coupe longitudinale du Marais du Col-des-Roches reconstituée à partir de forages existants (Favre 1911)

3.5 Contexte hydrogéologique général

La vallée du Locle représente le bassin versant occidental du synclinal, elle est drainée par le Bied qui s'écoule en direction du Col-des-Roches vers le Doubs soit par la surface, à ciel ouvert, par la gorge de la Rançonnière, soit par des écoulements souterrains dont une partie emprunte les calcaires du Dogger et l'autre les calcaires du Malm au niveau de la perte du Col-des-Roches. La perte du Col-des-Roches a été utilisée au 17^{ème} siècle pour y construire les Moulins souterrains du col-des-Roches. Les nombreux emposieus de la vallée du Locle sont tous connectés et nourrissent des sources qui émergent le long de la rive droite du Doubs. La vallée du Locle renferme plusieurs aquifères:

- § aquifère quaternaire: consiste en une alternance de sédiments peu perméables siège d'une nappe phréatique alimentée essentiellement par l'artésianisme de l'aquifère de l'Oeningien sous-jacent (Burger, 1988);

- § aquifère oeningien (tertiaire): consiste en une alternance de couches de craies lacustres plus ou moins argileuses;
- § aquifères profonds du Crétacé, du Malm et du Dogger: constitués de calcaires fissurés qui sont séparés les uns des autres par des niveaux aquicludes de marnes mais interdépendants dus aux accidents tectoniques locaux.

Les deux nappes s'écoulent suivant l'axe (SE-NW).

4. Campagne de reconnaissance

4.1 Implantation des sondages et des essais CPTU

Au total 7 sondages carottés ont été réalisés entre le 18 avril 2016 et le 18 mai 2016. L'implantation a été réalisée au préalable en compagnie de BG et d'un représentant du MO. Les 3 essais CPTU ont été réalisés les 25 et 26 mai 2016. Les sondages situés au droit de zone à risque d'un point de vue du réseau de conduites souterrain ont fait l'objet de pré-trous à la main jusqu'à 1.50m de profondeur. Le plan de situation des forages et essais est présenté à la figure 7.

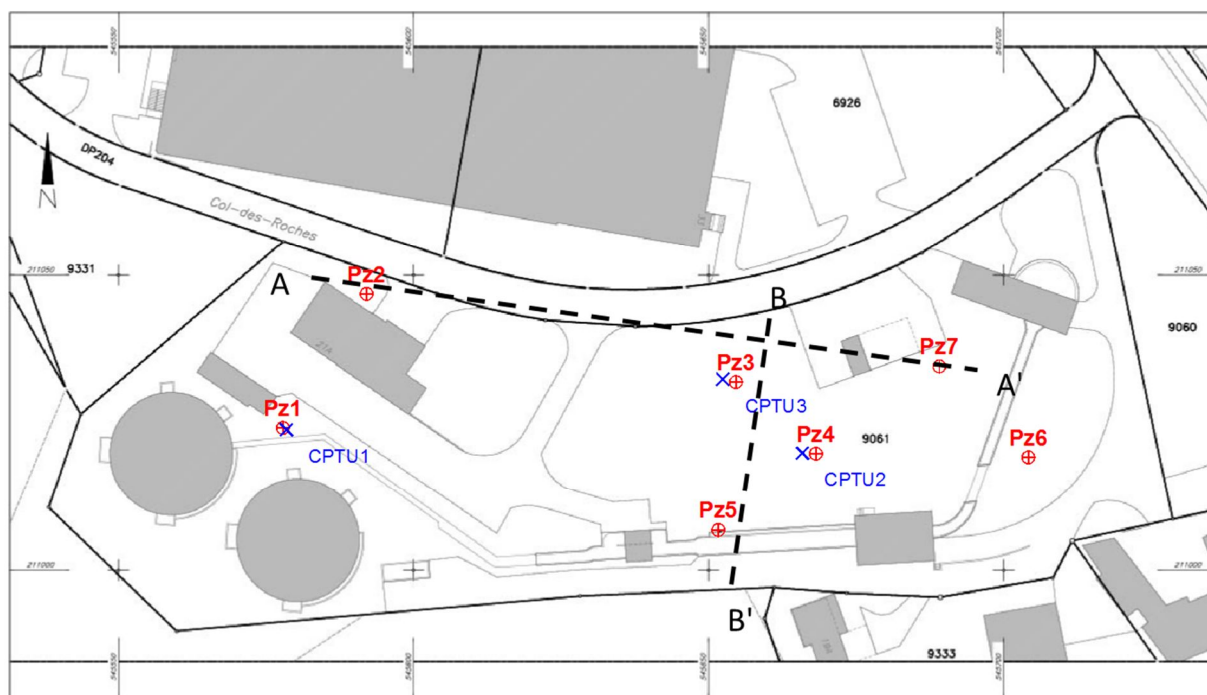


Figure 7 : Implantation des sondages sur la parcelle (en rouge les forages carottés, en bleu les essais CPTU et en traitillé noir les tracés des coupes A-A' et B-B')

4.2 Sondages carottés

Les sondages carottés ont été réalisés par des méthodes de forages traditionnelles par l'entreprise SIF Groutbor. Le forage a été effectué par rotopercussion au moyen d'un carottier simple de diamètre intérieur 146 mm dans les premiers mètres, puis d'un carottier double de diamètre intérieur 101 mm. Les forages ont été réalisés à sec dans les sédiments meubles et tendres puis à l'eau une fois les roches dures atteintes (calcaires). Les logs de forages sont présentés à l'**annexe 2**.

4.2.1 Stratigraphie

Les 7 sondages carottés et les sondages existants recueillis dans les études précédentes ont permis de mettre en évidence 4 couches différentes :

- Des remblais pollués composés majoritairement de matériaux limono-argileux graveleux très peu compacts, et très riches en matières, on peut trouver du bois noyés dans les limons argileux et des niveaux de tourbes;
- Des dépôts glacio-lacustres et palustres composés de tourbes et d'argiles limoneuses ou sableuses très peu compacts;
- Des moraines composées de graviers sablo-limoneux ou d'argiles graveleuses peu compactes au sommet et plus compact à l'approche du soubassement calcaire. Ces moraines sont de plus faible épaisseur sur la bordure E et reposent sur des matériaux du Tertiaire composé de matériaux argileux parfois crayeux (calcaire crayeux oeningiens et de d'argiles crayeuses altérées oeningiennes et d'argiles limoneuses marbrées (Marnes vertes et rouges). Ces formations tertiaires sont de très faible épaisseur;
- Le soubassement calcaire (Calcaires du Crétacé et du Jurassique) très fracturé sur les 3 à 5 premiers mètres sondés au droit des failles.

Des coupes géologiques sont présentées en **annexe 1**.

4.2.2 Essais SPT, pénétromètre et scissomètre de poche

Les essais de pénétration standard SPT ont été réalisés à partir de 1 m de profondeur selon la norme SN 670 318-3. En parallèle, des essais au scissomètre et pénétromètre de poche (p.p.) sont réalisés; Les résultats de ces essais figurent dans le tableau suivant :

Sondage n°	Profondeur (m)	Formation	SPT nbre de coups / 15 cm	Valeur SPT	p.p. / s.p. kN/m2	Consistance / compacité
PZ1	1,50	Remblai	2/2/3	4	40/-	molle
	3,50	Remblai	2/3/3	6	30/-	moyenne
	5,10	Remblai	3/3/4	6	40/400	moyenne
	8,00	Remblai	2/5/3	8	100/200	moyenne
	10,40	Dépôt lac.	7/9/11	18	100/500	ferme
	13,40	Dépôt lac.	12/14/16	28	400/-	dure
	15,40	Moraine	14/39/46	78	500/-	dure
	19,70	Calcaire	>50	>100	300/-	très dure
PZ2	3,00	Remblai	1/1/1	2	60/30	molle
	9,80	Remblai	2/5/8	10	150/350	moyenne
	12,00	Remblai	3/8/10	16	100/350	ferme
	14,20	Dépôt lac	9/12/18	24	140/340	dure
	16,70	Dépôt lac.	8/8/18	16	150/300	ferme
	19,30	Moraine	13/13/13	26	100/-	dure
	20,90	Moraine	5/10/11	20	>600/-	ferme
	23,10	Moraine	17/23/26	46	-/-	dure
	26,00	Moraine	28/50 _{12cm}	>100	-/-	très dure
PZ3	1,20	Remblai	2/2/2	4	-/-	molle
	4,20	Remblai	1/2/2	4	-/-	molle
	10,40	Remblai	1/1/1	2	50/300	molle

	12,30	Remblai	1/1/1	2	50/200	molle
	14,40	Dépôt lac.	4/4/5	8	50/100	moyenne
	16,25	Dépôt lac	3/4/4	8	50/75	moyenne
	18,60	Moraine	36/50 ^{12cm}	>100	>600/-	très dure
	21,00	Moraine	>50	>100	500/400	très dure
PZ4	1,00	Remblai	2/2/3	4	-/-	molle
	3,00	Remblai	1/2/3	4	-/-	molle
	5,00	Remblai	1/1/1	2	50/20	molle
	7,00	Remblai	2/5/8	10	100/200	moyenne
	9,00	Dépôt lac.	3/7/11	14	120/400	moyenne
	11,30	Calcaire	50 ^{10cm}	>100	-/-	très dure
PZ5	3,00	Remblai	1/2/2	4	-/-	molle
	5,50	Oeuningien	10/10/50 ^{10cm}	20	150/700	ferme
	7,25	Oeuningien	46/42/50 ^{10cm}	84	-/-	très dure
PZ6	1,15	Remblai	2/2/2	4	-/-	molle
	3,25	Remblai	3/3/4	6	80/40	moyenne
	6,00	Oeuningien	10/20/50	40	>600/-	dure
	8,00	Oeuningien	12/15/50	30	>600/-	dure
PZ7	1,50	Remblai.	1/2/2	4	-/-	molle
	3,70	Remblai	2/2/2	4	180/-	molle
	8,00	Remblai	2/3/3	6	80/300	moyenne
	10,50	Dépôt lac.	1/1/1	2	80/300	molle
	12,70	Dépôt lac.	1/1/1	2	80/100	molle
	15,80	Oeuningien	4/7/9	14	-/-	moyenne

Tableau 1 : Résultats des essais de pénétration standard SPT

Les résultats obtenus se corrélaient bien entre eux. Les sols ont une consistance molle à moyenne dès les premiers mètres dans les remblais pollués ou propre. Une fois la moraine atteinte, la consistance change radicalement pour avoir des valeurs dures, voire le refus de la part de l'essai ($N_{SPT}=100$).

4.2.3 RQD

Les 7 sondages ont atteint le substratum rocheux, celui-ci est très fortement fracturé sur une épaisseur de 3 à 5m.

Les résultats des calculs RQD (Rock Quality Designation) permettent d'appréhender les propriétés géomécaniques d'un massif rocheux et connaître son niveau d'altération.

Les résultats des RQD figurent sur les logs de forages.

Les RQD calculés vont de 25 à 98%. PZ1 et PZ2 présentent les RQD les plus faibles dus à la proximité d'une zone de faille et la présence d'une brèche tectonique. Le forage Pz5 situé en bordure S du versant calcaire présente les RQD les plus élevés.

Dans l'ensemble excepté pour les forages PZ1 et PZ2 qui se situent dans une zone fortement tectonisée dans la zone W avec des calcaires très fortement fracturés et broyés, le substratum rocheux calcaire de la zone E (Pz4, Pz5 et Pz6) est fracturé sur les 3 à 5 premiers mètres et devient plus massif sur la profondeur sondée.

4.2.4 Essais CPTU

Les 3 essais CPTU réalisés à proximité des sondages carottés peuvent être synthétisés comme suit:

- CPTU1 (vers Pz4) : remblais lâches et peu compact (localement qq passage plus décimétrique plus compact), fin du sondage dans les calcaires fracturés;
- CPTU2 (vers Pz1) : remblais lâches et peu compact (localement qq passage plus décimétrique plus compact), fin du sondage au sommet des moraines;
- CPTU3 (vers Pz3) : remblais lâches et peu compact jusqu'à 18 m (localement qq passage plus décimétrique plus compact), fin du sondage au sommet des moraines.

Les essais confirment la très faible compacité des remblais et la pénétration dans les moraines n'est pas suffisante pour en déduire des paramètres géotechniques.

4.2.5 Résultats des essais en laboratoire

Lors de la campagne de sondage, des échantillons remaniés et non remaniés ont été prélevés en vue d'effectuer des essais en laboratoire pour déterminer la nature des sols rencontrés et leurs caractéristiques mécaniques.

Les essais en laboratoire réalisés sont donnés en **annexe 3**, la synthèse suivante peut être faite :

- Des remblais pollués composés majoritairement de matériaux limono-argileux graveleux très peu compact, et très riches en matières organiques (jusqu'à 30%), on peut trouver du bois noyés dans les limons argileux; leur densité est extrêmement élevée localement (2.52-2.59 ou 2.71 !!!)
- Des dépôts composés de tourbes et déblais argileux ou graveleux très peu compact. Les niveaux de tourbe peuvent être métriques et contenir jusqu'à 60% de matières organiques (la densité est
- composées des matériaux oeningiens argileux parfois crayeux et de passage plus gravelo-sableux (2 essais sont probablement fait dans des moraines Pz6).

Les valeurs de poids volumiques calculés ne semblent pas réalistes, les échantillons ont dû être trop remaniés pour accorder crédit aux valeurs calculées; il est surtout très incompréhensible de trouver des poids volumiques apparents de 27,1 kN/m³ dans les remblais.

Les résultats des essais de teneur en eau ainsi que des limites d'Atterberg sont synthétisées dans le tableau suivant :

Formation	Teneur en eau w (%)	Limites d'Atterberg			Classification
		Limite de liquidité w _L (%)	Limite de plasticité w _P (%)	Indice de plasticité I _P (%)	
Dépôt lacustre	60-100	40-80	28-65	15-25	MH
Moraine	12-19	12-38	16-23	9-23	GC

*Classification en supposant 50% des grains < 0.06 mm

Tableau 2 : Résultats des essais de teneur en eau et de limites d'Atterberg

Les résultats des essais de granulométrie avec sédimentométrie sont résumés dans le tableau ci-après, les courbes granulométriques sont présentes dans le PV détaillé des résultats en **annexe 3**.

Formation	Teneur en eau naturelle w (%)	Granulométrie					Classification
		Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)	Gravier (%)	Pierres (%)	
Moraine	15-22	8-19	11-55	21-26	5-56	0-10	ML-GC

Tableau 3 : Résultats des essais granulométriques

4.2.6 Équipement en piézomètre

L'évolution du niveau de la nappe phréatique dans la zone des travaux sera suivie grâce aux piézomètres installés dans les sondages. L'instrumentation posée dans ces sondages est composée de tube piézométrique de diamètre 2", selon les détails suivants :

- § piézomètre Pz1 : double piézomètre Pz1a remblais longueur totale 10m, longueur hors terre de 0 m, tube plein de 0 à 1 m et de 9 à 10m, tube crépiné de 1 à 9 m. bouchon d'argile de 0 à 1 m et Pz1b calcaires longueur totale 27m, longueur hors terre de 0 m, tube plein de 0 à 17 m, tube crépiné de 17 à 27 m. bouchon d'argile de 10 à 14m;
- § piézomètre Pz2 : double piézomètre Pz2a remblais longueur totale 16.30m, longueur hors terre de 0 m, tube plein de 0 à 1 m et de 15.30 à 16.30m, tube crépiné de 1.30 à 15.30m. bouchon d'argile de 0 à 1 m, et Pz2b calcaires longueur totale 33m, longueur hors terre de 0 m, tube plein de 0 à 27 m, tube crépiné de 27 à 32 m, bouchon d'argile de 16.30 à 20.30m;
- § piézomètre Pz3 : double piézomètre Pz3a remblais longueur totale 18.50m, longueur hors terre de 0 m, tube plein de 0 à 1.50 m et de 17.50 à 18.50m, tube crépiné de 1.50 à 17.50m. bouchon d'argile de 0 à 1 m, et Pz3b calcaires longueur totale 33m, longueur hors terre de 0 m, tube plein de 0 à 26 m, tube crépiné de 26 à 33 m, bouchon d'argile de 18.50 à 22.50m;
- § piézomètre Pz4 : piézomètre Pz4a remblais longueur totale 18m, longueur hors terre de 0 m, tube plein de 0 à 1 m et de 8 à 9m, tube crépiné de 1 à 8m. bouchon d'argile de 0 à 1 m et de 8 à 10m, remblayage entre 10 et 18m;
- § piézomètre Pz5 : piézomètre Pz5a remblais longueur totale 12.80m, longueur hors terre de 0 m, tube plein de 0 à 1 m et de 5 à 6m, tube crépiné de 1 à 5m. bouchon d'argile de 0 à 1 m et de 5 à 7m, remblayage de 7 à 12.80m;
- § piézomètre Pz6 : double piézomètre Pz6a remblais longueur totale 7.30m, longueur hors terre de 0 m, tube plein de 0 à 1.3 m et de 6.30 à 7.30m, tube crépiné de 1.30 à 6.30m. bouchon d'argile de 0 à 1 m, et Pz6b calcaires longueur totale 14.50m, longueur hors terre de 0 m, tube plein de 0 à 9 m, tube crépiné de 9 à 14.50 m, bouchon d'argile de 6.30 à 9m;
- § piézomètre Pz7 : piézomètre Pz7a remblais longueur totale 24m, longueur hors terre de 0 m, tube plein de 0 à 1 m et de 9 à 10m, tube crépiné de 1 à 9m. bouchon d'argile de 0 à 1 m et de 9 à 10m, remblayage de 10 à 24m;

4.2.7 Mesure piézométrique

L'évolution du niveau de la nappe superficielle et des niveaux d'eau de l'aquifère karstique sous-jacent dans la zone des travaux seront suivi grâce aux piézomètres installés dans les sondages. L'instrumentation posée dans ces sondages est composée de tube piézométrique de diamètre 2", selon les détails présentés au § 4.2.6. Un nivellement par un géomètre a été effectué dès la fin des travaux de forages.

Une première campagne piézométrique a été réalisée le 23.05.2016. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant:

Forage	x	y	z terrain	z tube	Campagne du 23.05.2016		
					Profondeur (m)	altitude nappe superficielle (msm)	altitude aquifère karstique (msm)
Pz1a	545577.57	211024.32	919.06	918.94	4.03	914.91	-
Pz1b	545577.57	211024.32		918.89	10.16	-	908.73
Pz2a	545591.74	211046.93	918.68	918.52	4.52	914.00	-
Pz2b	545591.74	211046.93		918.49	10.50	-	907.99
Pz3a	545654.25	211032.05	918.39	918.32	4.2	914.12	-
Pz3b	545654.25	211032.05		918.28	3.93	-	914.35
Pz4	545667.78	211019.97	918.87	918.68	4.31	914.37	-
Pz5	545651.27	211007.01	919.35	919.27	4.79	914.48	-
Pz6a	545703.75	211019.36	919.12	919.07	4.52	914.55	-
Pz6b	545703.75	211019.36		919.03	4.40	-	914.63
Pz7	545688.68	211034.71	918.23	918.23	3.91	914.32	-

Tableau 4 : Résultats des mesures piézométriques

La nappe superficielle est drainée vers le centre de la vallée selon un axe S-N alors que l'eau des calcaires s'écoule selon un axe E-W. La carte piézométrique de la campagne du 23.05.2016 est présentée à la figure 8. Les niveaux d'eau dans les remblais se situent entre 3.90 et 4.80m de profondeur. Les niveaux d'eau dans les calcaires sont très variables et se situent entre 4 et 10m de profondeur.

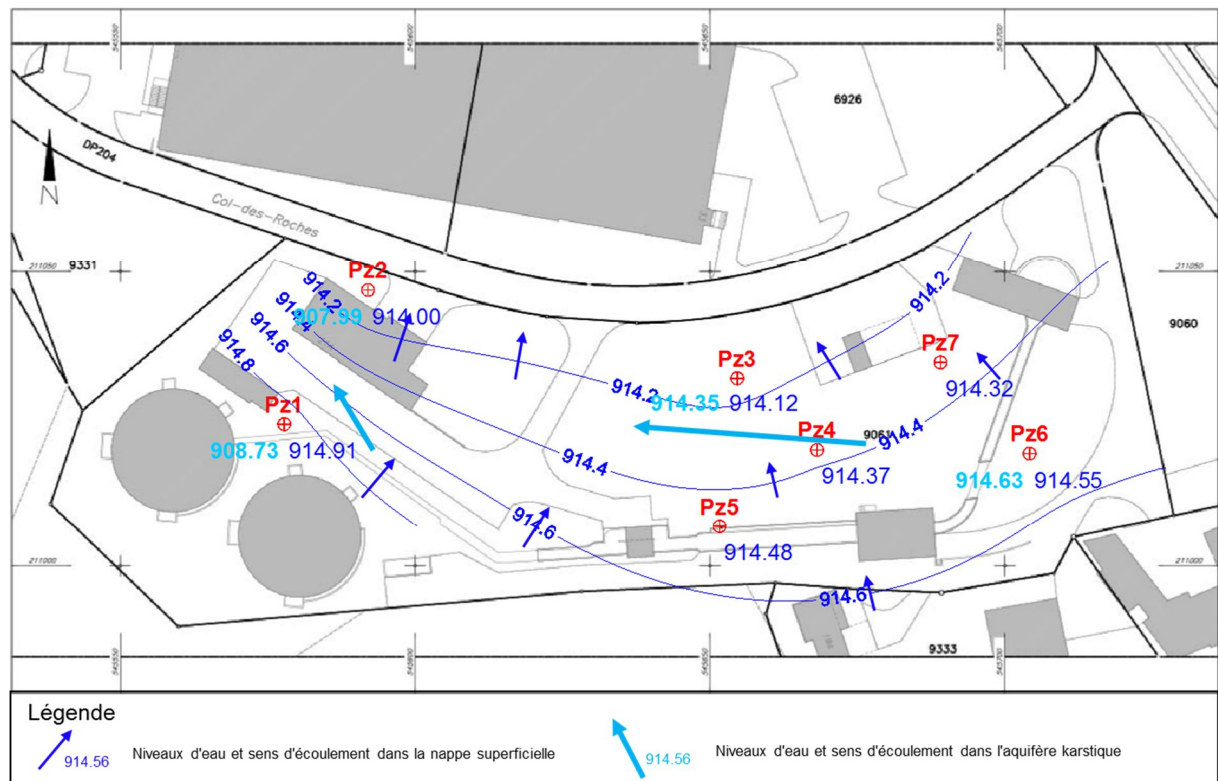


Figure 8 : Implantation des sondages sur les parcelles

4.3 Synthèse géotechnique

Les paramètres géomécaniques proposés sont tirés des valeurs mesurées par les essais in situ, les essais en laboratoire et l'expérience. Une estimation des valeurs pressiométriques est faite pour Ils sont détaillés dans le tableau suivant :

Couche	g [kN/m³]	Caractéristiques au cisaillement				SPT
		Long terme		Court terme		
		ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ_u (°)	c _u (kPa)	
Remblai pollué	18	20	0-5	-	10	2-10
Dépôt lacustre	18	20	0-5	-	10	2-10
Moraine ML	20-21	30	10-20	0	70	10-30
Moraine GM	21-22	35	20-30	0	200	30-100
Calcaire fracturé	22-23	40	500	-	-	>100

Tableau 5: Paramètres proposés pour les terrains reconnus lors des sondages

4.4 Synthèse hydrogéologique

Les piézomètres installés dans les remblais et dans les calcaires ont permis de distinguer 2 types de nappes:

- § Nappe superficielle située dans les remblais dont le substratum imperméable à peu perméable est constitué par la présence de dépôts glacio-lacustres et palustres et dont la profondeur est située entre 3.5 et 5m. L'eau s'écoule selon un axe S-N;
- § L'aquifère karstique constitué par les calcaires fissurés du Crétacé et du Jurassique. Cet aquifère est drainé vers l'ouest de la parcelle. Les niveaux d'eau mesurés varient entre 4 et 11m.

Les coupes géologiques interprétatives permettent de mettre en évidence la faible épaisseur de dépôts glacio-lacustres et palustres sur la bordure sud-est et est du site qui constituent un bouchon imperméable et limite les connexions hydrauliques entre la nappe superficielle et les calcaires. Les niveaux d'eau dans les calcaires sur cette bordure sont identiques à ceux de la nappe superficielle.

5. Recommandations constructives

5.1 Terrassement et remblayage

Le terrassement pourra se réaliser à la pelle rétro dans les remblais pollués en mettant en œuvre les procédures de tri des déchets pour l'acheminement en décharge selon OLED; les remblais sains peuvent être acheminés dans des décharges de type A, par contre les tourbes ne seront pas admises et doivent emprunter une autre filaire, composte ou décharge de type B ou E selon leur teneur en matière organique.

La portance des sols en place étant insuffisante pour la circulation des engins de chantier, une piste de chantier dimensionnée selon les besoins des engins de chantier employés sera nécessaire à chaque étape de terrassement et en fond de fouille.

5.2 Soutènement et talus

Les travaux de fouille qui atteignent la nappe seront réalisés avec des parois blindées pour limiter les pompages d'eau potentiellement polluées des remblais. De plus la stabilité de talus non blindés n'est pas très bonne dans les terrains immergés.

Les travaux de fouille à faible profondeur (maximum 3 m) peuvent être prévus avec des talus 1:1; les talus seront dans tous les cas protégés par une feuille PE ou un géotextile, et les écoulements provenant des talus seront à capter et à évacuer.

5.3 Fondations

Compte tenu de l'épaisseur de matériau peu compact et de la composition des remblais, la réalisation d'ouvrage fondé sur pieux semblent la meilleure option. Dans le cas où l'on souhaite réaliser un bassin ou un bâtiment en fondations générale, cet ouvrage doit être conçu pour supporter des tassements différentiels et totaux relativement conséquents. Le tassement secondaire des tourbes en particulier est difficile à estimer avec l'état des connaissances. L'expérience montre déjà à plusieurs endroits des désordres importants sur les structures.

Pour fonder un bassin sans pieux, il faudrait retirer une épaisseur de remblais pollués d'au moins 2,5 à 3 m pour obtenir à long terme un état de contrainte sous le radier inférieur à celui connu actuellement. Ainsi on pourrait admettre que le remblai en place fait office de surcharge et que la majeure partie des tassements se sont faits durant les 30 dernières années. Toutefois, le tassement secondaire des

tourbes va se poursuivre dans le temps suite à leur décomposition et le choix de ce type de fondation peut être la source de tassement dans le temps.

Etant donné les coûts d'évacuation des terres polluées, ainsi que leur taxe de décharge, il y a probablement intérêt à poser tous les ouvrages sur pieux. Les terrains d'ancrage des pieux sont le toit de la moraine avec la prise en compte pour le frottement latéral de la valeur $q_{sk}=80-120 \text{ kN/m}^2$; la pointe atteindra les calcaires fracturés et la valeur $q_{pk}=3\,000 \text{ kN/m}^2$.

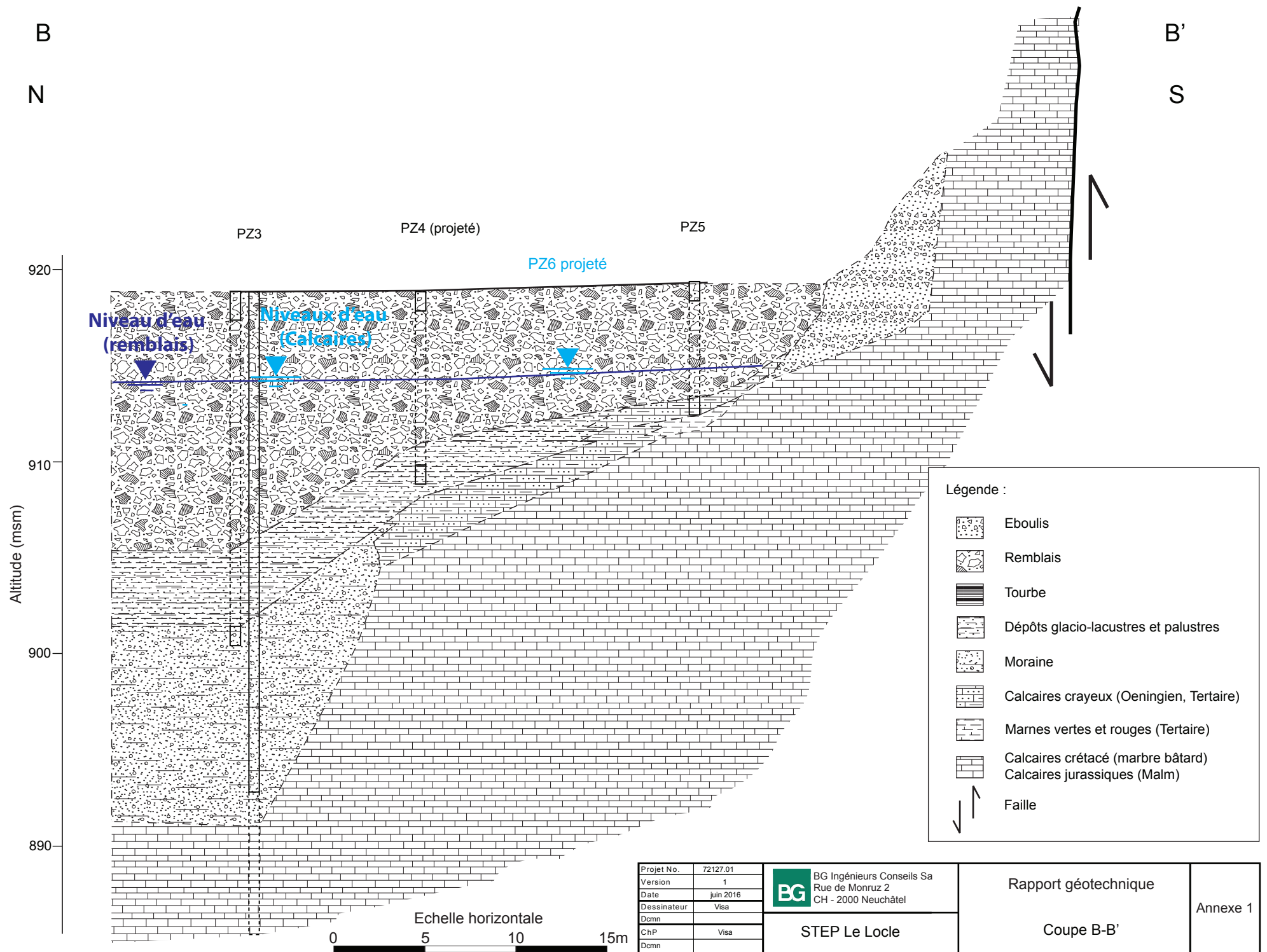
5.4 Gestion des eaux

Une gestion coordonnée et organisée des eaux de chantier est primordiale pour assurer la qualité du fond de fouille et la pérennité des surfaces de travail. Une installation de traitement des eaux pour pouvoir traiter l'intégralité des eaux de chantier (eaux d'infiltration, eaux météoriques, eaux de lavage et de gâchage) sera à prévoir pour les travaux afin de garantir un rejet des eaux de chantier conforme à la norme SIA 431.

Les considérations qui précèdent sont basées sur l'interprétation de sondages ponctuels. L'interpolation des résultats entre sondages devra être confirmée lors des travaux afin de prendre les éventuelles mesures d'adaptation nécessaires.




Annexe1

Coupes géologiques




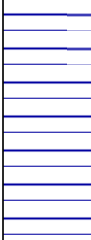






Annexe 2

Logs des sondages

		Sondage : Pz1					Date : 10.05.2016						
Site : STEP Le Locle		X : 211'024.32 Y : 545'577.57 Z terrain : - Z tube : 918.89 Diam. puits : 2 x 2"					Echelle : 1/45 Opérateur : Dcmn Validation : Entreprise : SIF Groutbor						
Affaire : 72127.03							Page : 1/4						
Cote	Prof.	Nature du terrain		Géologie	Niveau d'eau	SPT	Pénétrètre de poche	Scissomètre	Echantillon géotechnique (USCS)	Echantillon OLED	RQD %		
0.00	0.00			Remblais	<div>23.05.2016</div> <div>Remblais</div> <div>4.03 m</div>								
-1.50	1.50	Avant-trou.				2/2/3							
			Limons graveleux bruns-beiges, humides, bois, briques, pierres calcaires, compactes 2.4 - 2.8m : Bloc calcaire + bois de parts et d'autres.				0.4						
							0.7						
							0.7						
							0.3						
						2/3/3							
-4.80	4.80						1.1	3.8	CM				
		Limons graveleux, légèrement argileux, bruns-gris, marbrés, humides, pierres calcaires, un peu de bois; compactes.				2/3/4							
-6.00	6.00		Limons argileux avec quelques graviers, mou, bcp de déchets : briques, ferrailles, gris-brun, bois.				0.4						
							1	5.2					
							0.7	3.5			ML		
							0.6	1.6					
							2.2						
-8.10	8.10					Dépôts lacustres et palustres	2/5/3	1.2					
		Limons argileux saturés en haut, beige-gris avec blocs calcaires ~8.8 - 9.0m dans matrice argilo-limoneuse grise, quelques graviers.			0.4								
									GC				
					+6								
-9.00	9.00												
Observations :													

EXGTE 3.18

		Sondage : Pz1					Date : 10.05.2016					
Site : STEP Le Locle		X : 211'024.32 Y : 545'577.57 Z tube : - Z terrain : 918.89 Diam. puits : 2 x 2"					Echelle : 1/45 Opérateur : Dcmn Validation : Entreprise : SIF Groutbor					
Affaire : 72127.03							Page : 2/4					
Cote	Prof.	Nature du terrain		Géologie	Niveau d'eau	SPT	Pénétromètre de poche	Scissomètre	Echantillon géotechnique (USCS)	Echantillon OLED	RQD %	
-9.00	9.00						+6					
-9.55	9.55		Tourbe lithée, bois, brun-noir.	Dépôts lacustres et palustres	10.16 m  23.05.2016 Calcaire			6.8				
											Pt	
			Argiles compactes, fermes à moyennement fermes, riches en MO, quelques gravillons, lithage.					1.1		5.5		
								1.0		4.6		
								1.3				
-11.00	11.00											
								7/9/11	1.1	5.3		
			Limons sablo-graveleux gris-mouillés peu cohésifs.									
-12.20	12.20											
			Limons argilo-graveleux gris-beige avec graviers et pierres calcaires.									
									1.2			
									0.6			
							4.5					
						12/14/16						
							3.6					
							+6					
									CI			
							2.4					
-15.10	15.10						5.4					
			Gravier limono-sableux avec pierres calcaires, saturés, pas de déchets, passe +/- limoneuse compactes, ferme, gravillons.	Moraine		14/39/46						
								4.4				
								+6				
								3				
						20/28/37						
							2.8					
Observations :												
EXGTE 3.18												



Site : STEP Le Locle

Affaire : 72127.03

Sondage : Pz1

X : 211'024.32

Y : 545'577.57

Z tube : -

Z terrain : 918.89

Diam. puits : 2 x 2"

Date : 10.05.2016

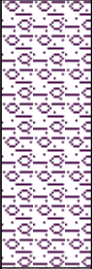





Echelle : 1/45

Opérateur : Dcmn

Validation :

Entreprise : SIF Groutbor

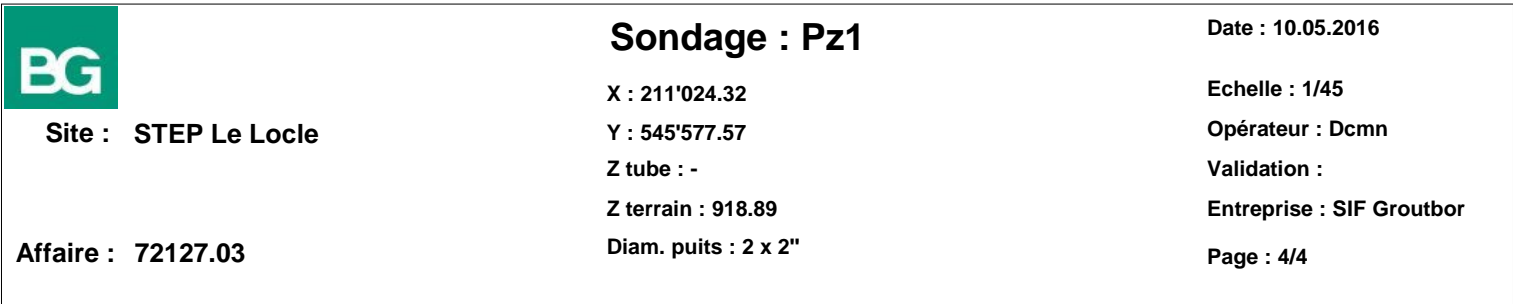
Page : 3/4

Cote	Prof.	Nature du terrain	Géologie	Niveau d'eau	SPT	Pénétromètre de poche	Scissomètre	Echantillon géotechnique (USCS)	Echantillon OLED	RQD %
-15.10	15.10	 <div>Graviers limono-sableux avec pierres calcaires, saturés, pas de déchets. passe +/- limoneuse compactes, ferme, gravillons.</div>	Moraine			<div> <div>4.4</div> <div>+6</div> </div>				
-19.60	19.60									
-20.60	20.60									
-21.20	21.20	 <div>peu de restitution. Cailloux + pierres calcaires concassées.</div>								
-21.40	21.40	 <div>Blocs de calcaires dans matrice limoneuse.</div>								
-22.00	22.00	 <div>Cailloux + pierres calcaires concassées.</div>								
-24.00	24.00	 <div>Blocs de calcaires très fracturés, concassés. Fractures avec remplissage argileux jaunes-verts.</div>	25	0	33	25				
-27.00	27.00	 <div>Blocs de calcaires jaunes très fracturés.</div>								

Observations :

EXGTE 3.18

Logiciel JEAN LUTZ S.A - www.jeanlutzsa.fr



Date : 10.05.2016

X : 211'024.32

Echelle : 1/45

Y : 545'577.57

Opérateur : Dcmn

Z tube : -

Validation :

Z terrain : 918.89

Entreprise : SIF Groutbor


Diam. puits : 2 x 2"








Page : 4/4

[illegible]

Observations :






























EXGTE 3.18


		Sondage : Pz2					Date : 09.05.2016			
Site : STEP Le Locle		X : 211'046.93 Y : 545'591.74 Z terrain : Z tube : 918.49 Diam. puits : 2 x 2"					Echelle : 1/50 Opérateur : Dcmn Validation : Entreprise : SIF Groutbor			
Affaire : 72127.03							Page : 1/4			

Cote	Prof.	Nature du terrain		Géologie	Niveau d'eau	SPT	Pénétromètre de poche	Scissomètre	Echantillon géotechnique (USCS)	Echantillon OLED	RQD %
0.00	0.00										
			Avant-trou.	Remblais avec déchets (remaniement de mat. org.)	4.52 m  23.05.2016 Remblais						
-1.50	1.50										
-2.20	2.20		Limons graveleux bruns, pierres calcaires. 2.2m enrobé 2cm épais, bois.								
			Limons graveleux, beiges-bruns pierres calcaires, enrobés, briques.				2.0				
-2.90	2.90						1.4				
-3.00	3.00		Dalle de béton.				0.8	0.7			
			Limons graveleux-sableux, bruns-rouges compactes, humides, scories, briques, verres céramiques, cendres, MO, bois.				0.6	0.3			
-4.00	4.00						1.0				
			Limons argileux noirs, bois en morceaux, % en MO augmente, plastiques, compactes, humides, briques, céramiques, ferraille.								
-5.00	5.00										
			Remanié : fines lavées gravillons + graviers bruns, déchets de bois, plastiques, briques, ferraille, verre.								
-8.80	8.80										
-9.10	9.10		Limons argileux, graviers, bruns, ferraille, briques, MO, cendres, charbon, marbrés.	1.3							
			"Argiles", tourbes, lithage, très riche en MO, déchets, bois, ferraille, plastique, compactes, secs.	1.4	5.5						

Observations :

EXGTE 3.18

		Sondage : Pz2					Date : 09.05.2016						
Site : STEP Le Locle		X : 211'046.93 Y : 545'591.74 Z tube : Z terrain : 918.49 Diam. puits : 2 x 2"					Echelle : 1/50 Opérateur : Dcmn Validation : Entreprise : SIF Groutbor						
Affaire : 72127.03							Page : 2/4						
Cote	Prof.	Nature du terrain		Géologie	Niveau d'eau	SPT	Pénétromètre de poche	Scissomètre	Echantillon géotechnique (USCS)	Echantillon OLED	RQD %		
-9.10	9.10		"Argiles", tourbes, lithage, très riche en MO, déchets, bois, ferraille, plastique, compactes, secs.	Remblais avec déchets (remaniement de mat. org.)	10.50 m  23.05.2016 Calcaire		1.5	3.6	Pt				
-10.40	10.40		Limons argileux, bruns, lithage, compactes, secs, mous, MO.										
-10.60	10.60		Argiles limoneuses bruns noires, bcp de MO, bois, marbrés.				0.7	3.6					
-11.00	11.00		Limons argileux bruns-beiges, noirs, marbrés, mous, MO, lithage, ferraille				0.5		4.0				
						1.4	4.3						
-12.00	12.00					3/8/10	1.0	3.6					
				Dépôts lacustres et palustres									
							1.3		3.0				
							0.9		3.8				
													
							1.4		4.2				
							9/12/18	1.4	3.4				
									2.4				
													
									2.4				
-15.30	15.30							1.0				2.0	
													
								2.0					
							2.1		2.9			ML	
-17.00	17.00			Moraine		4/8/18	0.9						
													
							1.3						
							1.8						
								5.3					
								1.2					
							8/13/13	+6					
								0.7					
Observations :													
EXGTE 3.18													



Site : STEP Le Locle

Affaire : 72127.03

Sondage : Pz2

X : 211'046.93
Y : 545'591.74
Z tube :
Z terrain : 918.49
Diam. puits : 2 x 2"

Date : 09.05.2016


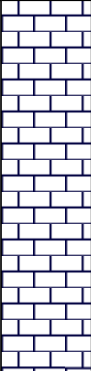
Echelle : 1/50

Opérateur : Dcmn

Validation :

Entreprise : SIF Groutbor

Page : 3/4

Cote	Prof.	Nature du terrain	Géologie	Niveau d'eau	SPT	Pénétrométrie de poche	Scissomètre	Echantillon géotechnique (USCS)	Echantillon OLED	RQD %
-17.00	17.00	 <div>Limons graveleux légèrement argileux à graviers et pierres calcaires, saturés.</div>	Moraine			1.0				
	+6									
5/10/11										
17/23/26										
					28/50 ->14cm					
-27.00	27.00		Brèche tectonique							66
-27.50	27.50	Calcaires massifs jaunes.								
		 <div> Calcaires fracturés avec remplissages argileux verts entre 28.0 - 30.2m Blocs compacts entre 27.0 - 27.5m Très fracturés entre 30.1 - 31.0m </div>								

Observations :

EXGTE 3.18

Logiciel JEAN LUTZ S.A - www.jeanlutzsa.fr



Sondage : Pz2

Date : 09.05.2016

Site : STEP Le Locle

X : 211°046.93

Echelle : 1/50

Y : 545°591.74

Opérateur : Dcmn

Z tube :

Validation :

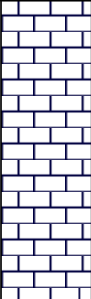
Z terrain : 918.49

Entreprise : SIF Groutbor

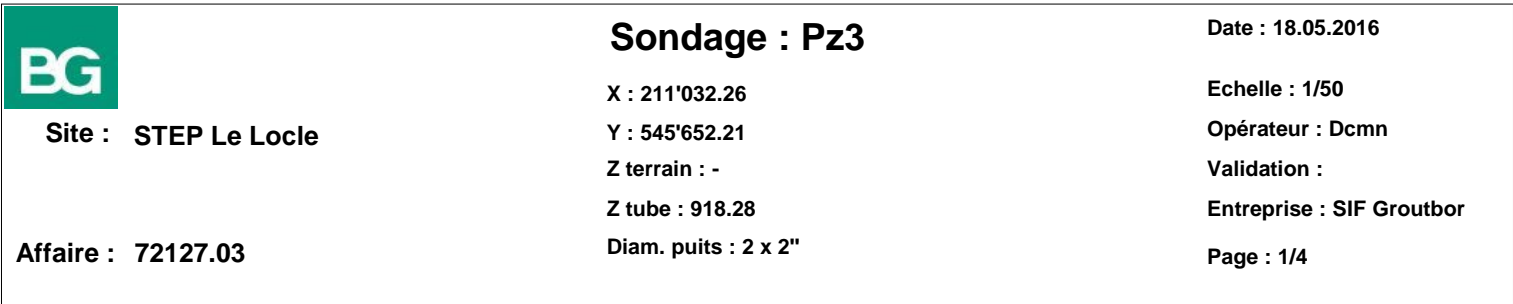
Diam. puits : 2 x 2"

Page : 4/4

Affaire : 72127.03

Cote	Prof.	Nature du terrain	Géologie	Niveau d'eau	SPT	Pénétromètre de poche	Scissomètre	Echantillon géotechnique (USCS)	Echantillon OLED	RQD %
-27.50	27.50									
			Brèche tectonique							60
		Calcaires fracturés avec remplissages argileux verts entre 28.0 - 30.2m Blocs compacts entre 27.0 - 27.5m Très fracturés entre 30.1 - 31.0m								
-32.00	32.00									
		Remplissage argileux vert.								
-33.00	33.00									

Observations :



Date : 18.05.2016

X : 211'032.26

Echelle : 1/50

Y : 545'652.21

Opérateur : Dcmn

Z terrain : -

Validation :

Z tube : 918.28

Entreprise : SIF Groutbor


Diam. puits : 2 x 2"






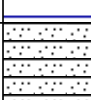

Page : 1/4

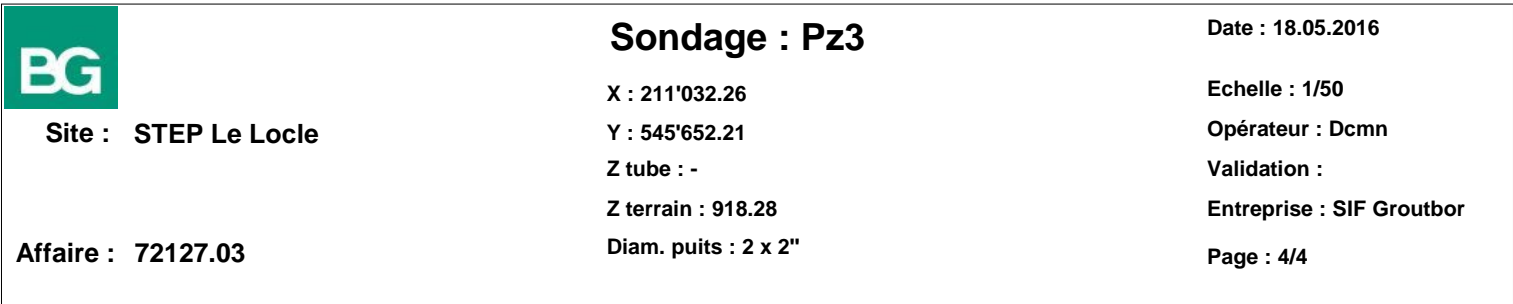
[illegible]

Observations :

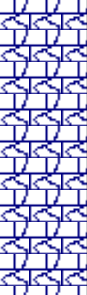

EXGTE 3.18

		Sondage : Pz3					Date : 18.05.2016						
Site : STEP Le Locle		X : 211'032.26 Y : 545'652.21 Z tube : - Z terrain : 918.28 Diam. puits : 2 x 2"					Echelle : 1/50 Opérateur : Dcmn Validation : Entreprise : SIF Groutbor						
Affaire : 72127.03							Page : 2/4						
Cote	Prof.	Nature du terrain		Géologie	Niveau d'eau	SPT	Pénétromètre de poche	Scissomètre	Echantillon géotechnique (USCS)	Echantillon OLED	RQD %		
-10.00	10.00												
			Limons argileux, noirs-bruns, consistance très molle, quelques gravillons, coquille, morceau de céramique à 11.65m, riche en MO fibreuse, lithage, 10-20 morceaux de bois, entre 10.0-10.6 consistance très molle, déchets de verres (11.3m), céramique (11.7m).	Remblais			0.85		MH				
						s'enfonce seul		4.3					
							0.7						
							0.7						
							0.5	2.2					
-11.70	11.70							3.4					
							s'enfonce seul	1.4				4.5	
-12.30	12.30					Limons un peu argileux avec tourbe marbrés beiges-bruns, coquilles, consistance molle à compacte.		0.5				2.4	
								0.8				3.1	
-13.30	13.30					Limons un peu argileux beiges avec coquilles, morceaux de céramique à 13.2m, marbré beige-brun, consistance molle.		1.3				3.3	
					1.4	7.0	MH						
-14.40	14.40		Limons argileux à coquilles, consistance ferme.	Dépôts lacustres		4/4/5			ML				
							0.5	1.0					
							0.9	1.7					
							0.5	0.7					
							3/4/4	0.5				0.7	
								0.9				1.0	
								1.6					
-15.70	15.70		Limons un peu argileux à coquilles, consistance très molle, beige, morceau de verre (14.5m), un peu de MO.										
-17.50	17.50		Limons beiges avec coquilles, très mou, saturé, un peu de MO.										
				Moraine									
							+6						
							36/50 ->12cm						
							4.3						
Observations :													
EXGTE 3.18													

		Sondage : Pz3					Date : 18.05.2016									
Site : STEP Le Locle		X : 211'032.26 Y : 545'652.21 Z tube : - Z terrain : 918.28 Diam. puits : 2 x 2"					Echelle : 1/50 Opérateur : Dcmn Validation : Entreprise : SIF Groutbor									
Affaire : 72127.03							Page : 3/4									
Cote	Prof.	Nature du terrain		Géologie	Niveau d'eau	SPT	Pénétromètre de poche	Scissomètre	Echantillon géotechnique (USCS)	Echantillon OLED	RQD %					
-17.50	17.50		Argiles limoneuses beiges-gris, avec peu de graviers centimétriques, quelques pierres calcaires, passes argileuses, passes +/- graveleuses.	Moraine			5.2	5.3	ML							
-23.00	23.00															
			Argiles limoneuses grises, fermes à dures.													
-25.00	25.00															
-25.40	25.40		Argiles avec des graviers gris, molles, moyennes.													
			Argiles grises dures secs, blocs calcaires.													
-26.00	26.00															
			Argiles avec des graviers gris, molles à moyennes, blocs calcaires.													
-26.60	26.60															
			Calcaires marneux jaunes, massifs fracturés, zone très altérée entre 30.0 - 32.0m	Crétacé inf. / marbre bâtarde (moins tectonisé -> + sain)							82					
													50			
													0			
Observations :												EXGTE 3.18				



Page : 4/4

Cote	Prof.	Nature du terrain	Géologie	Niveau d'eau	SPT	Pénétromètre de poche	Scisomètre	Echantillon géotechnique (USCS)	Echantillon OLED	RQD %
-26.60	26.60									
			Crétacé inf. / marbre bâtarde (moins tectonisé -> + sain)							0
		Calcaires marneux jaunes, massifs fracturés, zone très altérée entre 30.0 - 32.0m								0
-32.00	32.00		Calcaires massifs blancs gris.							60
-33.00	33.00									

EXGTE 3.18

Site : STEP Le Locle

X : 211'019.97

Echelle : 1/40

Y : 545'667.78

Opérateur : Dcmn

Z terrain : -

Validation :

Z tube : 918.68

Entreprise : SIF Groutbor

Affaire : 72127.03


Diam. puits : 2"

Page : 1/3

Cote	Prof.	Nature du terrain	Géologie	Niveau d'eau	SPT	Pénétromètre de poche	Scissomètre	Echantillon géotechnique (USCS)	Echantillon OLED	RQD %
0.00	0.00									
-0.15	0.15	TV								
-0.40	0.40	Limons sablo-graveleux bruns, briques, humides.								
-0.80	0.80	Graviers limoneux secs, pierres calcaires beiges, briques.								
-1.15	1.15	Limons graveleux beiges-bruns-noirs à gravillons.			2/2/3					
		Limons graveleux bruns-rouilles, briques, scories, céramiques, cendres, charbons.							1.15 - 2.0m : PZ4-01	
-3.00	3.00				1/2/3					
		Limons graveleux bruns, pierres calcaires, briques, bois calciné, plastique, verre, ferraille, lâches.	Remblais	4.31 m 23.05.2016 Remblais	s'enfonce seul	0.5	0.2	MH		
-6.35	6.35					0.4				
		Argiles à tourbes, noires, niveaux avec bois, pierres calcaires, déchets, verre, céramique, mous à compactes.			2/5/8	1.3	3.7			
-8.00	8.00					1.0	1.8			
						1.0	2.7			

Observations :

EXGTE 3.18

		Sondage : Pz4					Date : 09.05.2016			
Site : STEP Le Locle		X : 211'019.97 Y : 545'667.78 Z tube : - Z terrain : 918.68 Diam. puits : 2"					Echelle : 1/40 Opérateur : Dcmn Validation : Entreprise : SIF Groutbor			
Affaire : 72127.03							Page : 2/3			
Cote	Prof.	Nature du terrain	Géologie	Niveau d'eau	SPT	Pénétromètre de poche	Scissomètre	Echantillon géotechnique (USCS)	Echantillon OLED	RQD %
-8.00	8.00									
-8.50	8.50	Morceaux de bois, troncs.	Remblais			1.8	4.7	Pt		
							4.4			
					3/7/11	1.3				
						1.1	3.4			
					2/5/8	1.2	4.2			
-10.40	10.40	Tourbes noires, compactes, mous.	Dépôts lacustres et palustres					MH		
					50 cps -> 10cm					
-12.80	12.80	Calcaires broyés marneux à crayeux, blancs.	Oeningien							
										10
		Calcaires massifs fracturés, remplissage jaunes-vert (14.0 - 14.1m), beiges.	Calcaires							85
										90
Observations :										

Cote	Prof.	Nature du terrain	Géologie	Niveau d'eau	SPT	Pénétromètre de poche	Scissomètre	Echantillon géotechnique (USCS)	Echantillon OLED	RQD %
-12.80	12.80									
-17.00	17.00	Calcaires massifs fracturés, remplissage jaunes-vert (14.0 - 14.1m), beiges.	Calcaires							90
-18.00	18.00	Calcaires massifs gris fracturés, remplissages d'argiles.								100



Sondage : Pz5

Date : 22.04.2016

Site : STEP Le Locle

X : 211'007.01

Echelle : 1/35

Y : 545'651.27

Opérateur : Dcmn

Z terrain : -

Validation :

Z tube : 919.27

Entreprise : SIF Groutbor

Affaire : 72127.03


Diam. puits : 2"

Page : 1/2

Cote	Prof.	Nature du terrain	Géologie	Niveau d'eau	SPT	Pénétromètre de poche	Scissomètre	Echantillon géotechnique (USCS)	Echantillon OLED	RQD %
0.00	0.00									
		Avant-trou			2/2/2					
-1.40	1.40									
-1.60	1.60	Limons argileux avec quelques graviers beiges-bruns, brique, compactes, mou.								
-2.00	2.00	Limons sableux, bruns-noirs, avec gravillons et graviers, lâches, cendres noirâtres, secs, briques, scories.								
			Remblais							
		Limons argileux, bruns-oranges, humides, lâches, cendres, pierres ponce, briques, tissus, ferrailles rouillées, verre, céramique.			1/2/2					
-3.60	3.60				3/3/4				2.4-3.6m : PZ5-01	
-5.00	5.00	Limons argileux bruns, mou-lâches, humides, cendres, charbon, briques, ferraille, tissus. (4.4 - 4.8m niveau brun-noir peu cohésif-lâche, cendres, débris de coquilles, céramiques)		4.79 m						
-5.35	5.35	Argiles beige-vert, secs, pas de déchets, fermes à dures.	Oeningien	23.05.2016 Remblais	10/10/50 -> 9cm	1.4	7.2			
-5.95	5.95	Blocs de calcaire autochtone, matrice limono-argileuse, pierres calcaires beiges, secs.								
					10/20/50 -> 6 cm					
-6.70	6.70	Argiles marbrées beiges-gris-vert, secs, fermes à dures.	Marnes rouges et vertes							
		Argiles limoneuses, secs sans cohésions, concassé, beige-ocre.								

Observations :

EXGTE 3.18



Site : STEP Le Locle

Affaire : 72127.03

Sondage : Pz5

X : 211'007.01

Y : 545'651.27

Z tube : -

Z terrain : 919.27

Diam. puits : 2"

Date : 22.04.2016

Echelle : 1/35

Opérateur : Dcmn

Validation :

Entreprise : SIF Groutbor


Page : 2/2

Cote	Prof.	Nature du terrain	Géologie	Niveau d'eau	SPT	Pénétromètre de poche	Scissomètre	Echantillon géotechnique (USCS)	Echantillon OLED	RQD %
-6.70	6.70									
-7.30	7.30	Argiles limoneuses, secs sans cohésions, concassé, beige-ocre.	Marnes rouges et vertes		46/42/50 -> 14cm					
-7.85	7.85	Limons argileux beige-vert avec pierres calcaires, graviers, mou, cohésif, humide.								
-8.30	8.30	Calcaire réduit en poudre, poudre blanche.	Calcaires Crétacé		12/15/50 ->12 cm					70
		Calcaires massifs fracturés, fractures avec remplissage argileux.								80
										98
-13.50	13.50									


Observations :

EXGTE 3.18

Logiciel JEAN LUTZ S.A - www.jeanlutzsa.fr

		Sondage : Pz6					Date : 26.04.2016							
Site : STEP Le Locle		X : 211'019.36 Y : 545'703.75 Z terrain : - Z tube : 919.07 Diam. puits : 2 x 2"					Echelle : 1/40 Opérateur : Dcmn Validation : Entreprise : SIF Groutbor							
Affaire : 72127.03							Page : 1/2							
Cote	Prof.	Nature du terrain	Géologie	Niveau d'eau	SPT	Pénétromètre de poche	Scissomètre	Echantillon géotechnique (USCS)	Echantillon OLED	RQD %				
0.00	0.00													
-0.15	0.15	Terre végétale.	Remblais	23.05.2016 Remblais										
-0.40	0.40	Limons graveleux bruns, quelques déchets, briques, verres, cendres, secs.				2.1	3.8							
		Limons graveleux bruns-noirs, briques, pierres calcaires, cendres beiges (0.8m), mous à compactes, secs.				4.7								
-1.30	1.30					3.0								
-2.60	2.60	Graviers limono-sableux bruns-noirs, bcp de déchets, lâches, verres, scories, briques, céramique, humide.							1.3 - 2.6m : PZ6-01					
-3.25	3.25	Graviers limoneux à pierres calcaires beiges-bruns très peu de déchets (briques), lâches, peu cohésif.												
		Graviers limono-sableux bruns-noirs, bcp de déchets, lâches, verre, scories, briques, céramique, humides.				0.8	0.4							
-4.30	4.30													
		Graviers anguleux, légèrement limoneux, pierres calcaires, quelques briques, peu cohésif.												
-5.00	5.00	Limons graveleux peu cohésifs, mous, pierres calcaires, morceaux de bois, quelques déchets, bruns-beiges.	Oeningien	23.05.2016 Remblais		0.7		Pt						
-5.60	5.60	Argiles vertes limoneuses, molles.												
-5.90	5.90	Tourbe, bois, noir-brun.	Moraine											
-6.00	6.00	Limons argileux avec graviers anguleux, mous, bruns, humides.												
-6.30	6.30	Limons argileux à pierres et blocs calcaires beiges, secs.				+6								
-7.20	7.20	Argiles vertes-beiges, molles, cohésifs, blocs et graviers calcaires, secs, blocs (7.8m).				+6		GC						
						+6								
Observations :														

EXGTE 3.18



Sondage : Pz6

X : 211°019.36

Y : 545°703.75

Z tube : -

Z terrain : 919.07

Diam. puits : 2 x 2"

Date : 26.04.2016

Echelle : 1/40

Opérateur : Dcmn



Validation :

Entreprise : SIF Groutbor

Page : 2/2

Site : STEP Le Locle






Affaire : 72127.03





Cote	Prof.	Nature du terrain	Géologie	Niveau d'eau	SPT	Pénétromètre de poche	Scissomètre	Echantillon géotechnique (USCS)	Echantillon OLED	RQD %
-7.20	7.20									
								GC		
-9.00	9.00		Argiles vertes-beiges, molles, cohésifs, blocs et graviers calcaires, secs, blocs (7.8m).							
										
			Calcaires fracturés beiges avec remplissage argileux vert des fractures.							
			Calcaires Crétacé							
-13.80	13.80									


Observations :

EXGTE 3.18

Logiciel JEAN LUTZ S.A - www.jeanlutzsa.fr

		Sondage : Pz7					Date : 13.05.2016					
Site : STEP Le Locle		X : 211'029.82 Y : 545'685.31 Z terrain : - Z tube : 918.42 Diam. puits : 2"					Echelle : 1/40 Opérateur : Dcmn Validation : Entreprise : SIF Groutbor					
Affaire : 72127.03							Page : 1/3					
Cote	Prof.	Nature du terrain		Géologie	Niveau d'eau	SPT	Pénétromètre de poche	Scissomètre	Echantillon géotechnique (USCS)	Echantillon OLED	RQD %	
0.00	0.00											
			Avant-trou.	Remblais	<div>3.91 m</div> <div>23.05.2016</div> <div>Remblais</div>							
-1.50	1.50					1/2/2						
			Limons graveleux bruns-noirs, présence de scories noirâtres à rougeâtres, traces d'irisation bleues-vertes, quelques pierres calcaires, cendres, mou, lâches, secs, quelques déchets (briques).				1.4	0.8		2 - 3 m : Pz7-01		
-3.00	3.00					1.6						
			Limons graveleux légèrement argileux bruns-noirs, compactes, mou, briques, céramique.				1.8					
-3.70	3.70					2/2/2						
			Graviers limoneux bruns-beiges, remaniés, lâches, pierres calcaires, déchets inertes, plastique, céramique, brique, ferraille, saturés.									
-7.20	7.20											
			Limons graveleux bruns-gris, mous, compactes, humides, quelques déchets inertes.				0.7	3.2				
							2/3/3					
Observations :												
EXGTE 3.18												

		Sondage : Pz7					Date : 13.05.2016				
Site : STEP Le Locle		X : 211'029.82 Y : 545'685.31 Z tube : - Z terrain : 918.42 Diam. puits : 2"					Echelle : 1/40 Opérateur : Dcmn Validation : Entreprise : SIF Groutbor				
Affaire : 72127.03							Page : 2/3				
Cote	Prof.	Nature du terrain		Géologie	Niveau d'eau	SPT	Pénétromètre de poche	Scissomètre	Echantillon géotechnique (USCS)	Echantillon OLED	RQD %
-7.20	7.20					2/3/3	0.9	3.2			
-8.50	8.50		Limons graveleux bruns-gris, mous, compactes, humides, quelques déchets inertes.	Remblais							
-9.00	9.00		Tourbe, argiles limoneuses noires-bruns, molles, compactes, humides.	Dépôts lacustres et palustres			1.0	2.8			
-10.00	10.00		Argiles limoneuses brunes, compactes, molles, niveau de bois (9.7 - 9.8m).				1.0	3.7			
			Limons un peu argileux bruns-beiges, coquilles, consistance molle, compactes.				1.0	3.9			
							0.8	4.6			
							s'enfonce seul	3.2			
								0.9			
								1.4			
								1.2	2.8		
									3.2		
								1.6			
									5.0		
							s'enfonce seul	1.0			
								1.1	1.2		
								0.7	0.8		
							1.7				
						0.9					
						1.3					
-15.00	15.00						2.8				
			Limons argileux bruns-gris, très mous, plastique.				0.6				
-15.80	15.80										
			Limons sableux beige-gris, compacte, molle.	Moraine		4/7/9					
Observations :											
EXGTE 3.18											



Site : STEP Le Locle

Affaire : 72127.03

Sondage : Pz7

X : 211'029.82

Y : 545'685.31

Z tube : -

Z terrain : 918.42

Diam. puits : 2"

Date : 13.05.2016


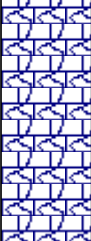
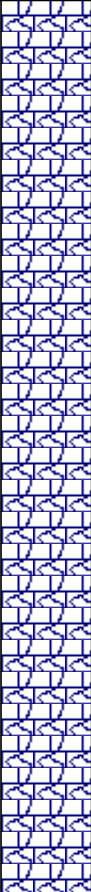
Echelle : 1/40

Opérateur : Dcmn

Validation :

Entreprise : SIF Groutbor

Page : 3/3

Cote	Prof.	Nature du terrain	Géologie	Niveau d'eau	SPT	Pénétromètre de poche	Scissomètre	Echantillon géotechnique (USCS)	Echantillon OLED	RQD %
-15.80	15.80									
-16.15	16.15	 Limons sableux beige-gris, compacte, molle.	Moraine							
		 Calcaires broyés très fracturés (en morceaux) gris à blancs.	Oeningien							0
-17.50	17.50									25
		 Calcaires massifs fracturés jaunes, remplissage argileux vert-jaune (calcaires concassés entre 21.35 - 21.55).	Calcaires Crétacé							0
										65
										50
										0
										75
-22.30	22.30									

Observations :

EXGTE 3.18

Logiciel JEAN LUTZ S.A - www.jeanlutzsa.fr

Annexe 3

Rapports des essais en laboratoire et essais CPT



Protocole d'essais en laboratoire n° 6016060.6451

Mandant: BG Ingenieure Conseils SA
Mohammad Monfared
Avenue de Cour 61
Case postale SA 241
CH-1001 Lausanne

Objet: **Le Locle, STEP**

Mandat: Essai géotechniques

Prélèvement de l'échantillon: Avril–Mai 2016, par Mandant

Livraison de l'échantillon: Mai 2016, par poste

Contenu du protocole	Page	
Page de couverture	1	
Résultats des essais	2-3	A
Granulométrie	4	

* indications du mandant

A essais accrédités

Zollikofen, le 21.06.2016

Directeur du laboratoire : Miroslaw Januszko Responsable des examinateurs: Matthias Vollenhals

Les résultats des essais ne sont valables que pour les échantillons examinés. Il est interdit de copier des extraits de ce protocole sans accord écrit du laboratoire. Les échantillons intacts seront conservés durant 2 mois à partir de la date du test. Veuillez s'il vous plait consulter nos conditions générales sur www.geotest.ch.

Laboratoire:
GEOTEST AG
Bernstrasse 165
CH-3052 Zollikofen

Tel. 031 910 01 01
Fax 031 910 01 00
zollikofen@geotest.ch

310.01.FO.F.L.02

Mandat no:	6016060.6451	Date:	13.06.2016
Objet:	Le Locle, Step		
Remarques:			

GEOTEST

GEOLOGEN / INGENIEURE /
GEOPHYSIKER /
UMWELTFACHLEUTE

Résultats des essais géotechniques en laboratoire



Sondage		PZ	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3	Essai accrédité selon
Profondeur	D	m	4.6-4.8	6.8-6.7	8.4-8.6	9.4-9.6	14.2-14.4	16.15-16.5	11.3-11.6	14.0-14.25	14.0-14.25	14.0-14.25	14.0-14.25	SN 670 004-2b
Remaniement : (fort, moyen, faible)	R		moyen	moyen	moyen	moyen	fort	moyen	moyen	fort	fort	moyen	moyen	SN 670 340-1
No. de laboratoire			31216	31217	31218	31219	31220	31193	31197	31194	31193	31197	31195	DIN 18122-1 p.m. /SN 370 345b
Classification USCS			CM	ML	GC	Pt	CL	Pt	ML	Pt	ML	MH	MH	
Teneur en eau naturelle	w	%	22.2	29.4	22.7	172.4	12.7	229.9	42.9	229.9	42.9	93.5	66.8	SN 670 340-1
Limites de consistance	Limites de liquidité	w _L	34	42	41	non	23	non	45	non	45	72	68	
	Limites de plasticité	w _P	21	28	23	plastique	14	plastique	38	plastique	38	64	43	
Indice de plasticité	$I_P = w_L - w_P$	%	13	14	18		9		7		7	8	25	
Indice de liquidité	$I_L = 1 - I_C = (w^* - w_P)/I_P$													
Indice de consistance	$I_C = (w_L - w^*)/I_P$													
Granulométrie		(en % de la masse)												
		argile			9									SN 670 902-1b
		limon			17									SN 670 816a
		sable			22									
		gravier			52									
		pierres			1									
Masse volumique des particules solides		ρ_s												
Masse volumique du sol		ρ			2.71	1.04			2.07					SN 670 335a
Masse volumique du sol sec		ρ_d			2.21	0.38			1.45					
Résistance au cisaillement non drainé	scissomètre	max. résid.												SN 670 350a
	laboratoire	$q_{up}/2$												
	pénétromètre	Φ'												
Résistance au cisaillement drainé (cisaillement direct)	Angle de frottem. effectif	Φ'												n.a.
	Cohésion effective	c'												
	Résistance totale	Φ'_R												
Résistance résiduelle		c'_R												
Essai oedométrique	$\sigma'_{v1} = 100$ à 200	E_{oed1}												SN 670 340-5
	$\sigma'_{v2} = 100$ à 200	E_{oed2}												
	$\sigma'_{v1} = 200$ à 400	E_{oed1}												
	$\sigma'_{v2} = 200$ à 400	E_{oed2}												
	$\sigma'_{v1} = 200$ à 400	E_{oed1}												
Teneur en carbonate		CaCO ₃												SN 670 371 p.m.
Compactage Proctor	w_{opt}	%												SN 670 330
	$p_{d opt}$	t/m ³												
	$S_{r opt}$	%												
Teneur en matières organiques				13.1		60.5						28.2	13.1	SN 670 370a
												p. i.= procédure interne		
												p. m.= procédure modifiée		
												n.a. = non accrédité		

Mandat no:	6016060.6451	Date:	21.06.2016
Objet:	Le Locle, Step		
Remarques:			

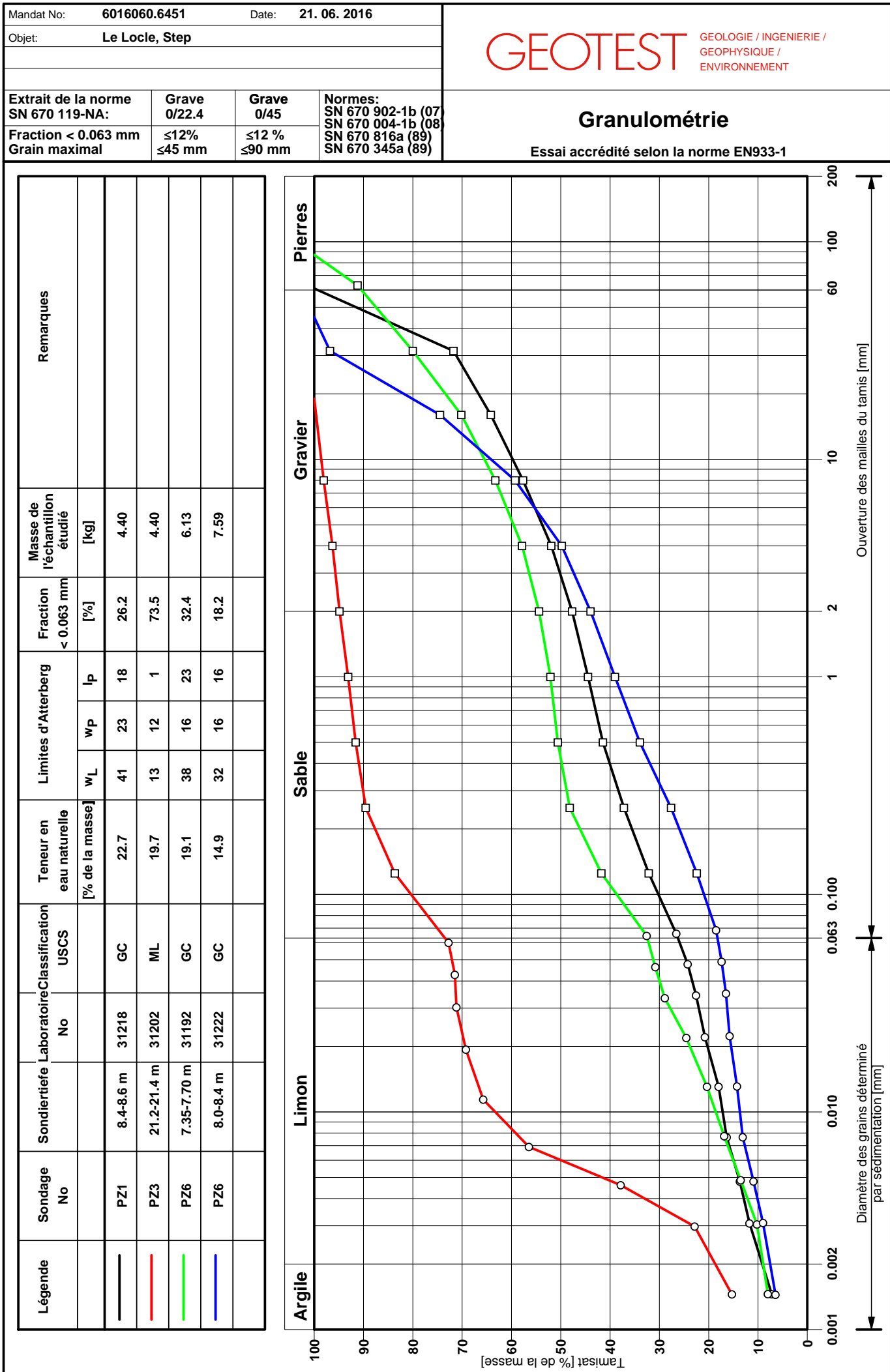
GEOTEST

GEOLOGEN / INGENIEURE /
GEOPHYSIKER /
UMWELTFACHLEUTE

Résultats des essais géotechniques en laboratoire



Sondage	PZ		3	3	4	4	4	6	6	6	7	Essai accrédité selon
Profondeur	D	m	17.0- 17.3	21.2- 21.4	8.3-8.65	10.0- 10.2	4.5-4.8	5.7-6.0	7.35- 7.70	8.0-8.4	13.4- 16.6	
Remaniement : (fort, moyen, faible)	R		moyen	moyen	moyen	moyen	moyen	moyen	moyen	fort	fort	
No. de laboratoire			31221	31202	31199	31198	31200	31201	31192	31222	31223	
Classification USCS												
Teneur en eau naturelle	w	%	61.4	19.7	181.5	100.7	34.7	143.2	19.1	14.9	61.5	SN 670 004-2b
Limites de consistance	Limites de liquidité	%	42	13	non	77	57	non	38	32	59	SN 670 340-1
	Limites de plasticité	%	36	12	plastique	64	55	plastique	16	16	47	DIN 18122-1 p.m. /SN 370 345b
Indice de plasticité	$I_P = w_L - w_P$	%	6	1		13	2		23	16	12	
Indice de liquidité	$I_L = 1 - I_C = (w^* - w_P)/I_P$											
Indice de consistance	$I_C = (w_L - w^*)/I_P$											
Granulométrie (en % de la masse)												
	argile	%		19					9	8		
	limon	%		55					24	11		
	sable	%		21					22	26		SN 670 902-1b
	gravier	%		5					36	56		SN 670 816a
	pierres	%		0					10	0		
Masse volumique des particules solides	ρ_s	t/m ³										
Masse volumique du sol	ρ	t/m ³		2.59			1.85		2.52			SN 670 335a
Masse volumique du sol sec	ρ_d	t/m ³		2.16			1.37		2.12			
Résistance au cisaillement non drainé												
	scissomètre	max. résid.										SN 670 350a
	laboratoire	$q_{up}/2$										
	pénétromètre	$q_{up}/2$										
Résistance au cisaillement drainé (cisaillement direct)												
	Angle de frottem. effectif	Φ'										n.a.
	Cohésion effective	c'										
	Résistance totale	Φ'_R										
	Résistance résiduelle	c'_R										
Essai oedométrique												
	$\sigma'_{v1} = 100$ à 200	kN/m^2										SN 670 340-5
	$\sigma'_{v2} = 100$ à 200	kN/m^2										
	$\sigma'_{v1} = 200$ à 400	kN/m^2										
	$\sigma'_{v2} = 200$ à 400	kN/m^2										
Teneur en carbonate												
	$CaCO_3$	%										SN 670 371 p.m.
Compactage Proctor												
	w_{opt}	%										SN 670 330
	$\rho_{d opt}$	t/m ³										
	$S_r opt$	%										
Teneur en matières organiques												
		%				22.5		38.8				SN 670 370a
												p. i.= procédure interne
												p. m.= procédure modifiée
												n.a. = non accrédité



ESSAIS AU PÉNÉTROMÈTRE STATIQUE

**RENOVATION STEP
PARCELLE NO. 9061, LE COL
2400 LE LOCLE**

**N° de rapport: 60-765
Volume 1 de 1**

Geoprofile GmbH

**ESSAIS AU PÉNÉTROMÈTRE STATIQUE
RENOVATION STEP
PARCELLE NO. 9061, LE COL
2400 LE LOCLE**

Maître d'Ouvrage	-
Client	BG Ingénieurs Conseils SA
Adresse	Rue de Monruz 2 CH-2000 Neuchâtel M. Mohammad Monfared
N° d'affaires du client	
N° d'affaires Geoprofile GmbH	60-765
Volume	1 de 1
Confidentialité	La distribution du rapport est limitée aux organisations approuvées par le Maître d' Ouvrage

Résumé

Le Maître d'Ouvrage projette la rénovation de la station d'épuration des eaux (STEP) sur la parcelle n° 9061 à 2400 Le Locle.

Avec l'objectif de gagner des connaissances approfondies sur la condition de sous-sol local, le Client chargeait le Geoprofile GmbH d'exécuter 3 essais au pénétromètre statique jusqu'à une profondeur de 25 m.

Ce rapport présente les prestations géotechniques suivantes:

- l'exécution de 3 essais au pénétromètre statique avec une longueur totale de 42.70 m, en incluant la mesure de la pression de l'eau interstitielle (CPTU 1 - CPTU 3);
- l'évaluation des données brutes;
- la description des couches et la détermination des paramètres géotechniques;

Date d'intervention: 24. – 25. mai 2016

version	date	description	contrôlé	approuvé
1	14.06.2016	Rapport Final	bshs	hjt

TABLE DES MATIÈRES

Page

Situation avec les positions des sondages CPTU

1

ANNEXES

Annexe A: Détails de la réalisation des essais

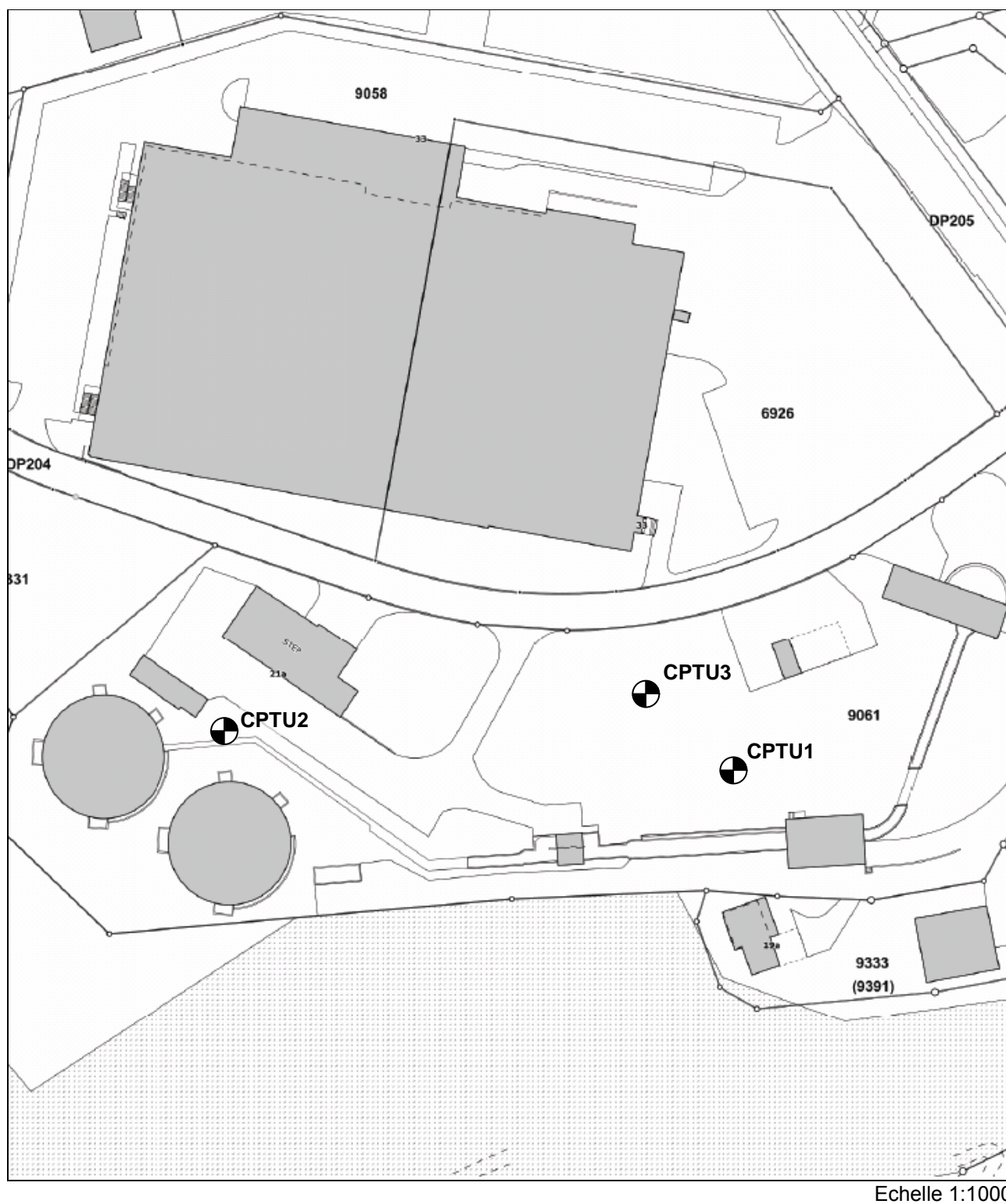
Annexe B: Essais au pénétromètre statique – données brutes

Annexe C: Essais au pénétromètre statique – interprétation géotechnique

APPENDICES (informations supplémentaires)

Appendice 1: Essai au pénétromètre statique

Appendice 2: Interprétation des essais au pénétromètre statique



SITUATION AVEC LA POSITION DE SONDAGE CPTU
 Rénovation STEP, parcelle n° 9061, Le Col, 2400 Le Locle

ANNEXE A
DETAILS DE LA RÉALISATION DES ESSAIS

CONTENU

Annexe

Détails des essais au pénétromètre statique

A1

COMMANDE D'ESSAI

Cours d'essai général:	Voir appendice 1, "essai au pénétromètre statique (CPT)" (GEO/APP/001)
Préparation:	<ul style="list-style-type: none"> – Sélection des positions de sondage par client – Sélection de la sonde par Geoprofile GmbH – Saturation antérieur du filtre par l'emmagasinement en vacuum avec l'huile de tournesol pendant 24 heures minimum – Montage du filtre dans un fluide avant de chaque essai
Essai:	Pas des précautions spécifiques au projet
Interruption:	Voir appendice 1, "essai au pénétromètre statique (CPT)" (GEO/APP/001)
Mensuration et nivellement:	Mensuration et nivellement par client
Mesures additionnelles:	aucune
Avant-trou:	-

APPAREIL DE SONDAGE

Mécanisme de poussée:	Double cylindre hydraulique avec une force maximale de 150 kN et un mouvement vertical maximal de 1 m
Montage du mécanisme de poussée:	seul
Force de réaction:	Camion 18 to
Diamètre des barres de poussée:	36 mm
Tubage de protection:	aucun
Réducteur de frottement latéral:	Intégré dans la sonde
Pénétrromètre:	<ul style="list-style-type: none"> – Type S15CFIIP15 – Mesure indépendante de la résistance de la pointe q_c, le frottement local f_s, la pression de l'eau interstitielle u_2, et de l'inclinaison le long des axes X et Y (i_x et i_y) – Superficie de la pointe 15cm^2 – Superficie du manche de frottement 225cm^2 – Ratio des superficies net a: 0.6

ENREGISTREMENT DES DATES

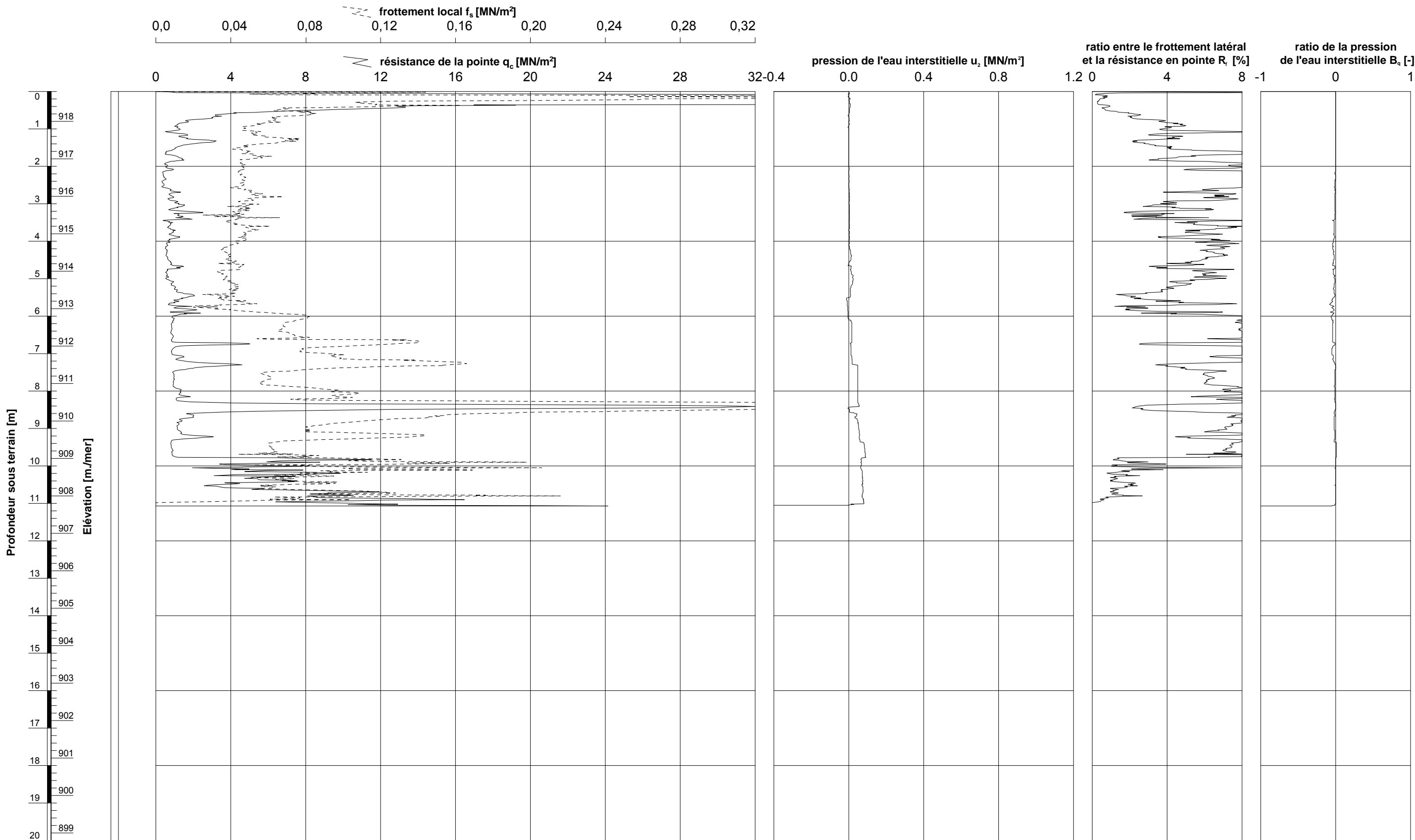
Enregistrement des dates:	Enregistrement digital, 1 mesurage pour chaque cm d'avance
Correction de la profondeur:	Correction de la profondeur pour l'inclinaison de la sonde

ANNEXE B
ESSAIS AU PÉNÉTROMÈTRE STATIQUE – DONNEES BRUTES

CONTENU	Annexe
Essai au pénétromètre statique CPTU 1	B1
Essai au pénétromètre statique CPTU 2	B2
Essai au pénétromètre statique CPTU 3	B3

dessiné: Matthias Zweifel dd: contrôlé:

GeODin-System / FR CPT Daten A3 CH 1_100 v7.GLO / 15.06.2016/17:25:06



Date d'intervention : 24.05.2016
Elévation : 918.80 m./mer
Eau : m sous terrain

Coordonnées: 545667.0 m O
211019.0 m N

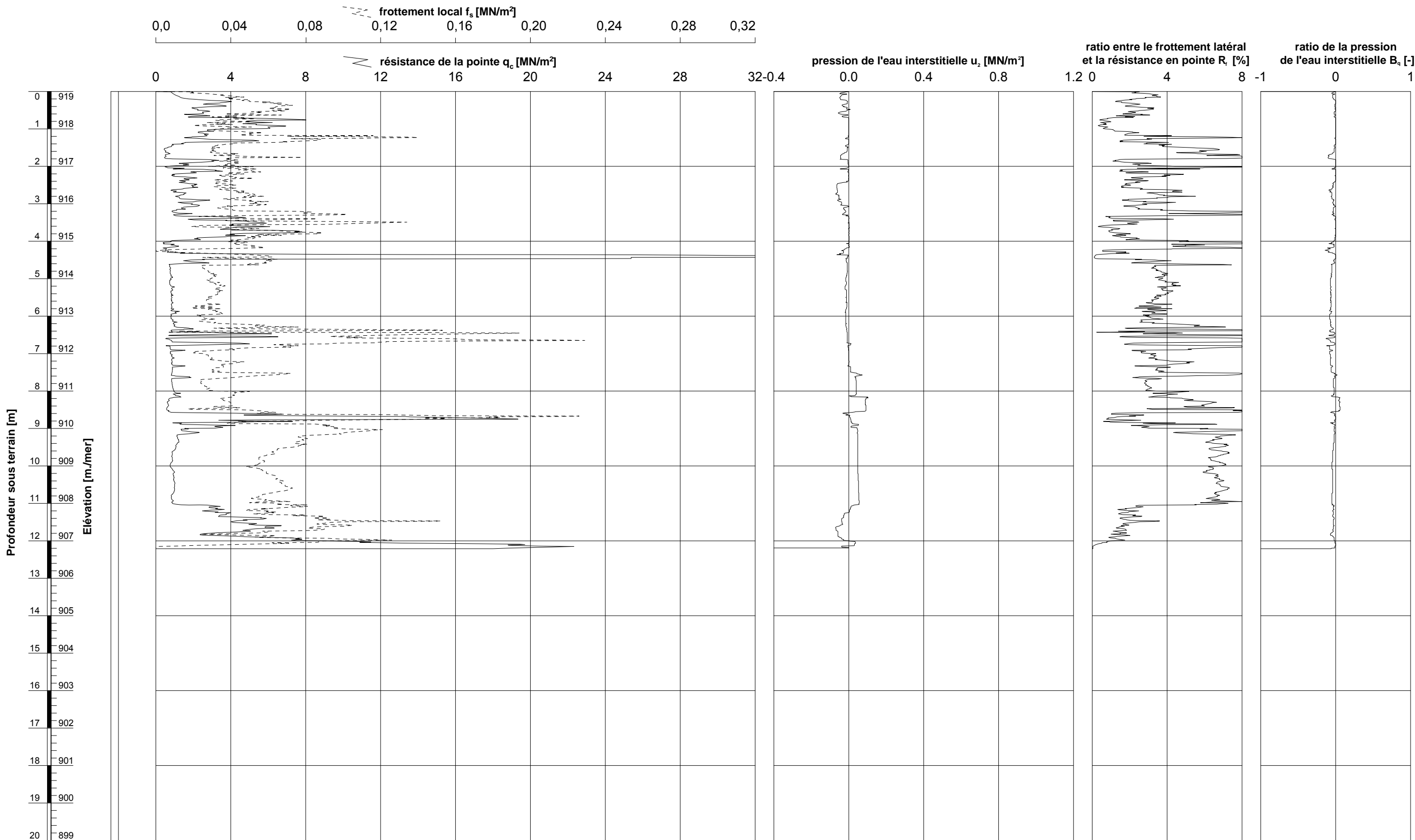
Sonde de mesure : S15CFIIP15
Superficie : 15 cm²

ESSAI AU PÉNÉTROMÈTRE STATIQUE
Données de mesure
Rénovation STEP, 2400 Le Locle

Sondage: CPTU 1

dessiné: Matthias Zweifel dd: contrôlé:

GeODin-System / FR CPT Daten A3 CH 1_100 v7.GLO / 15.06.2016/17:23:36



Date d'intervention : 24.05.2016
Elévation : 919.00 m./mer
Eau : m sous terrain

Coordonnées: 545578.0 m O
211024.0 m N

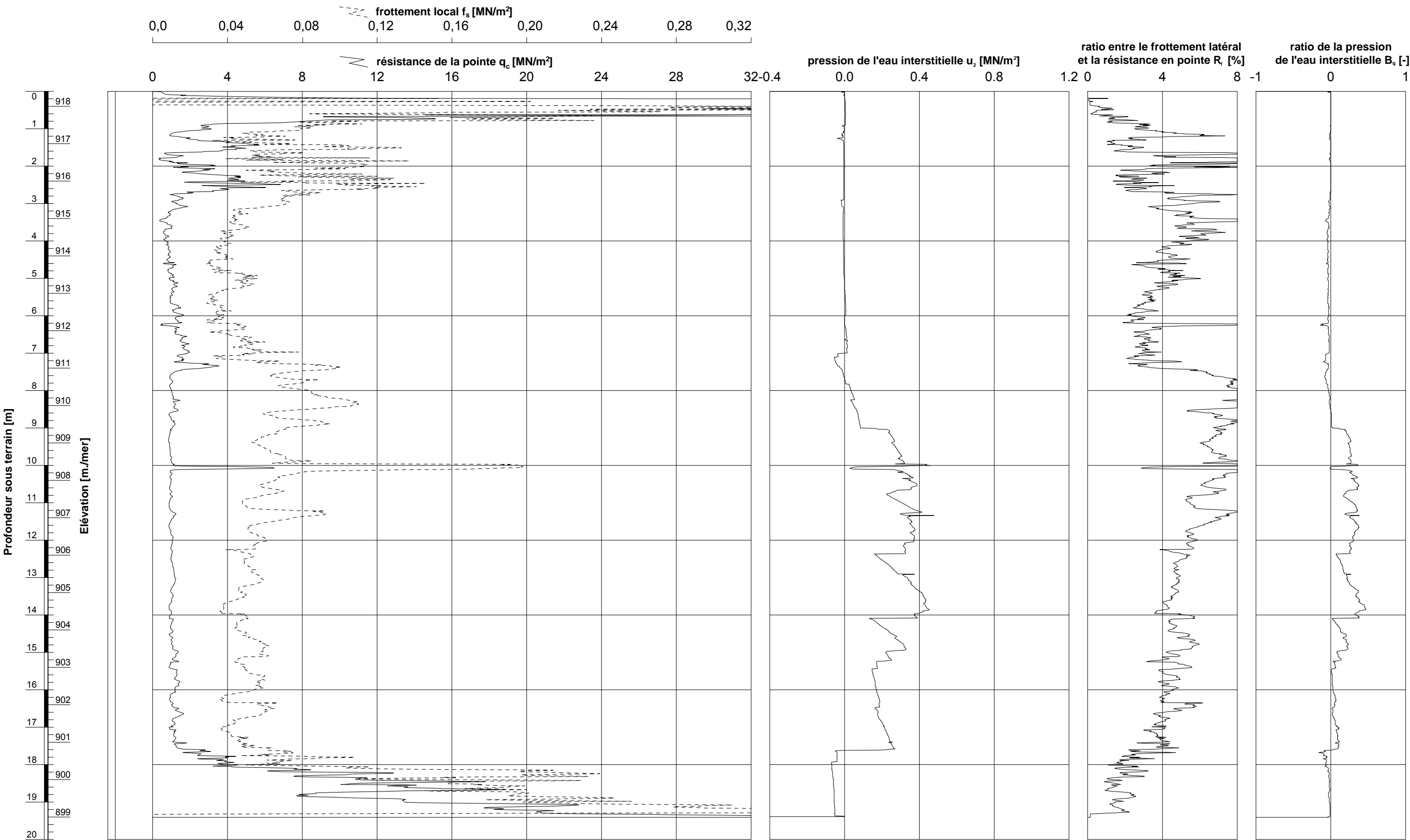
Sonde de mesure : S15CFIIP15
Superficie : 15 cm²

ESSAI AU PÉNÉTROMÈTRE STATIQUE
Données de mesure
Rénovation STEP, 2400 Le Locle

Sondage: CPTU 2

dessiné: Matthias Zweifel dd: contrôlé:

GeODin-System / FR CPT Daten A3 CH 1_100 v7.GLO / 15.06.2016/17:23:59



Date d'intervention : 24.05.2016
Elévation : 918.40 m./mer
Eau : m sous terrain

Coordonnées: 545654.0 m O
211032.0 m N

Sonde de mesure : S15CFIIP15
Superficie : 15 cm²

ESSAI AU PÉNÉTROMÈTRE STATIQUE
Données de mesure
Rénovation STEP, 2400 Le Locle

Sondage: CPTU 3

ANNEXE C
ESSAIS AU PÉNÉTROMÈTRE STATIQUE – INTERPRETATION GEOTECHNIQUE

CONTENU	Annexe
Essai au pénétromètre statique CPTU 1	C1
Essai au pénétromètre statique CPTU 2	C2
Essai au pénétromètre statique CPTU 3	C3

dessiné: MZ Datum: 24.05.2016 contrôlé: cfa

GeODin-System / FR CPT Interp A3 1_100 v7.GLO / 15.06.2016/17:24:50

- +

○

résistance au cisaillement non drainé c_u [kN/m²]

sensitivité S_t [-]
- ×

·

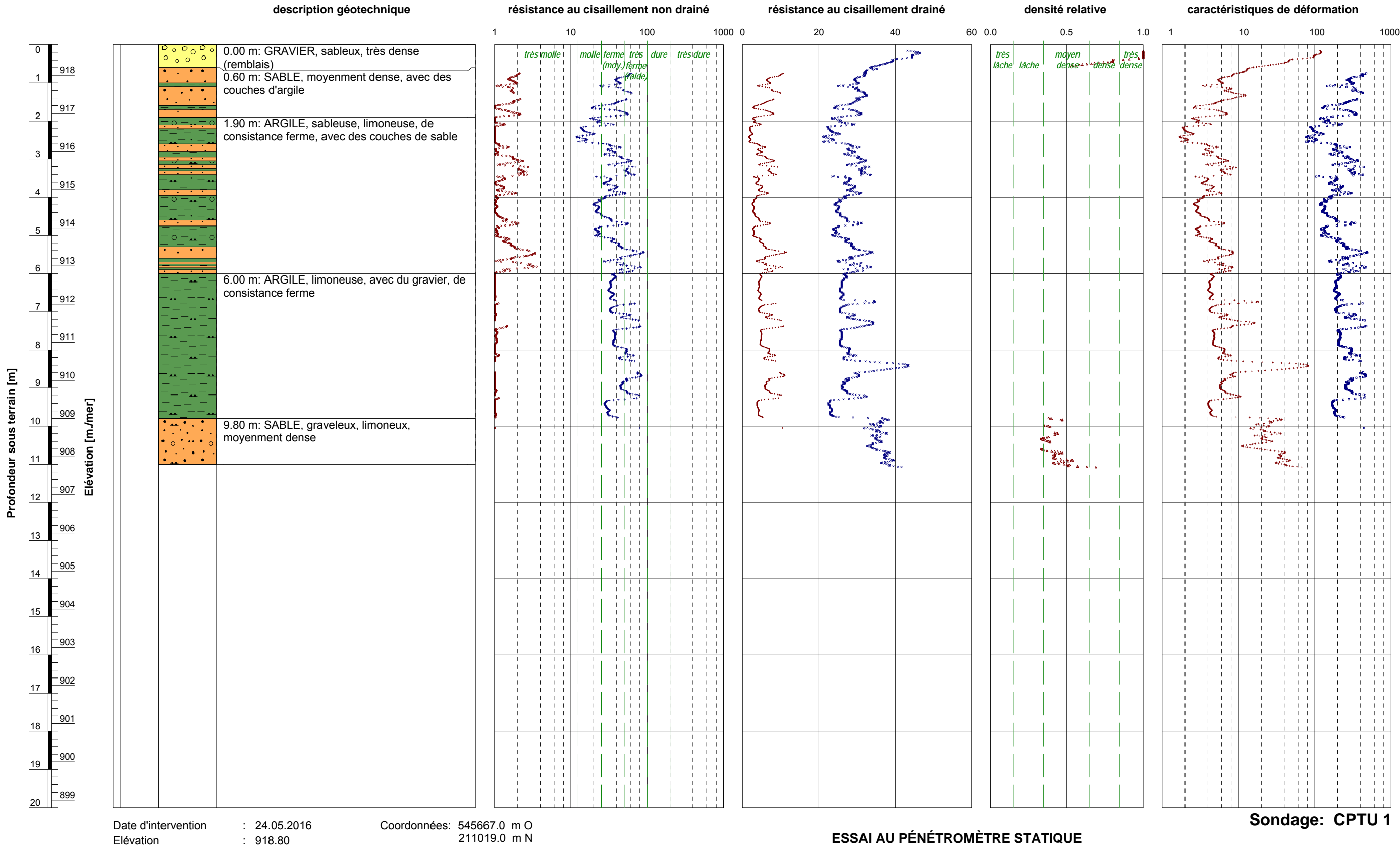
angle de frottement interne effectif ϕ' [°]

cohésion effective c' [kN/m²]
- △

densité relative I_D [-]
- +

pression de préconsolidation σ_p' [kN/m²]

module de déformation oedométrique au premier chargement $E_{s,1}$



dessiné: MZ Datum: 24.05.2016 contrôlé: cfa

GeODin-System / FR CPT Interp A3 1_100 v7.GLO / 15.06.2016/17:24:29

- +

○

résistance au cisaillement non drainé c_u [kN/m²]

sensitivité S_t [-]
- ×

·

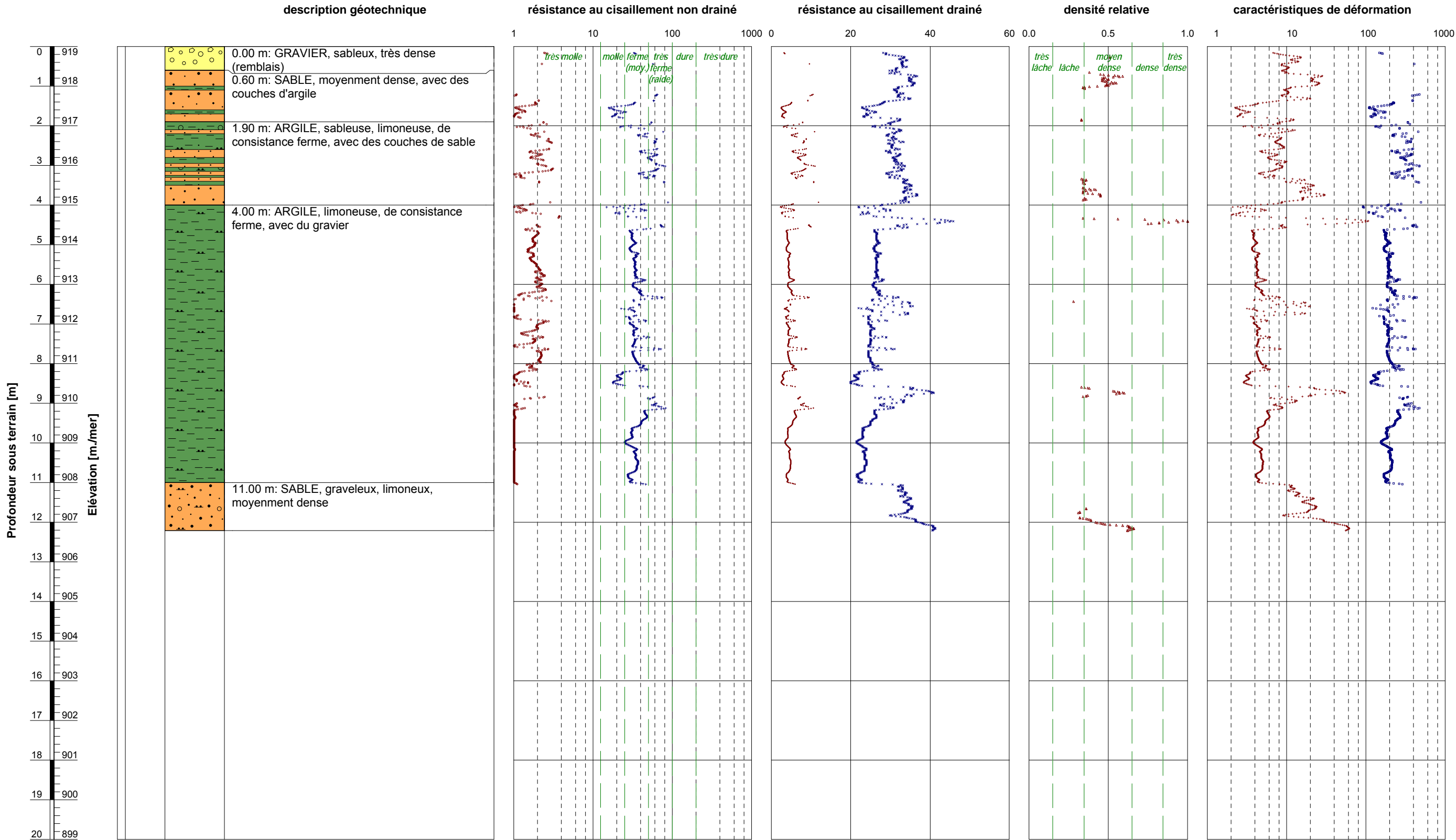
angle de frottement interne effectif ϕ' [°]

cohésion effective c' [kN/m²]
- △

densité relative I_D [-]
- +

pression de préconsolidation σ_p [kN/m²]

module de déformation oedométrique au premier chargement $E_{s,1}$



dessiné: MZ Datum: 24.05.2016 contrôlé: cfa

GeODin-System / FR CPT Interp A3 1_100 v7.GLO / 15.06.2016/17:22:05

- +

résistance au cisaillement non drainé c_u [kN/m²]

○

sensitivité S_t [-]
- ×

angle de frottement interne effectif ϕ' [°]

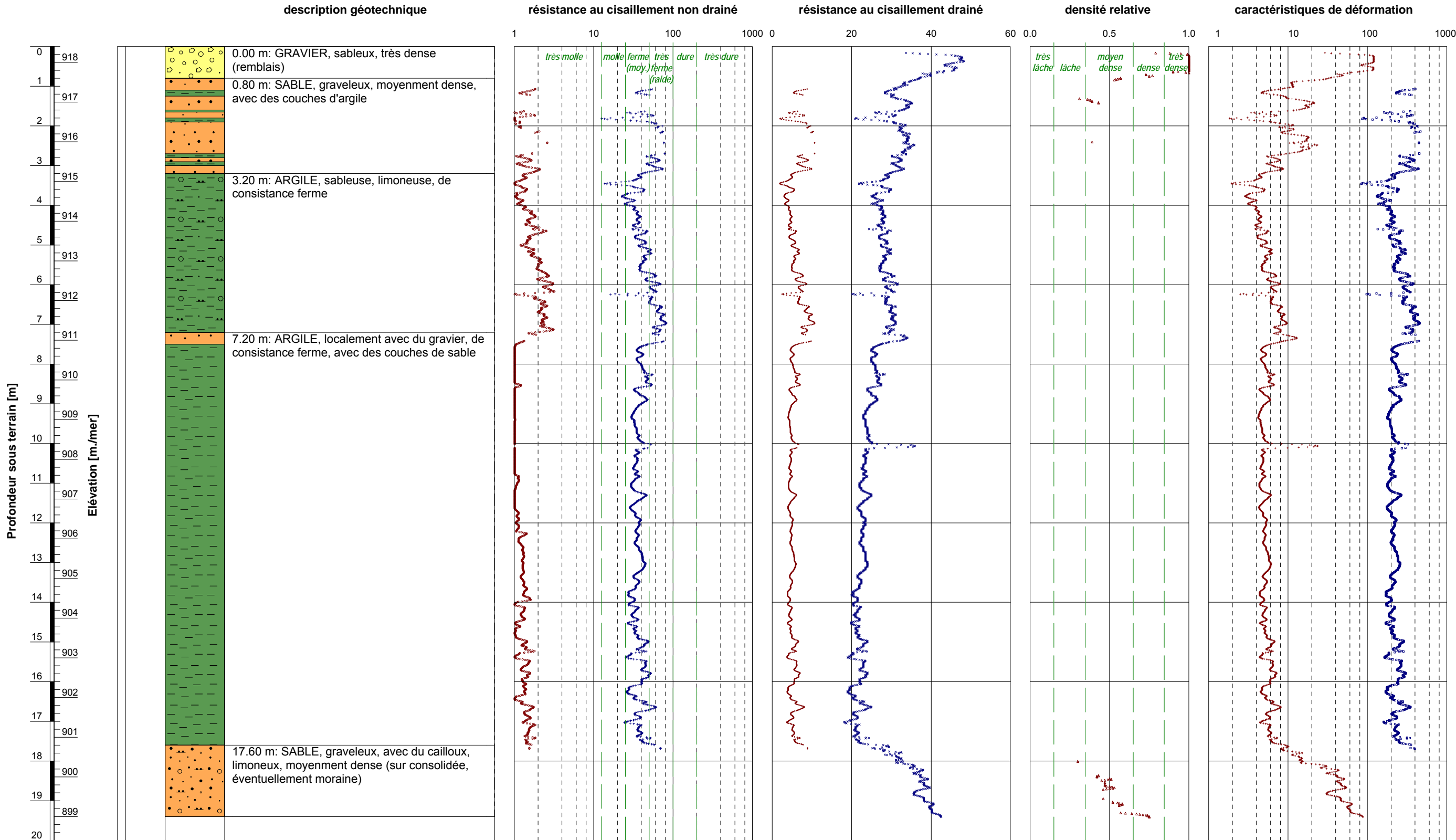
·

cohésion effective c' [kN/m²]
- △

densité relative I_D [-]
- pression de préconsolidation σ'_p [kN/m²]

+

module de déformation oedométrique au premier chargement $E_{s,1}$



APPENDICES

INFORMATIONS SUPPLEMENTAIRES

CONTENU

Appendice 1: Essai au pénétromètre statique (CPT)

Appendice 2: Interprétation de l'essai au pénétromètre statique

GENERALITES

L'essai au pénétromètre statique (CPT) est un procédé qui est souvent utilisé pour explorer le terrain à bâtir. On détermine en l'occurrence la résistance du terrain à bâtir durant une pénétration constante et continue à l'aide d'un pénétromètre cylindrique équipé de capteurs internes. On mesure la profondeur de pénétration (z), la résistance de pointe (q_c), le frottement superficiel local (f_s) et éventuellement la pression de l'eau interstitielle (u_2) et l'angle d'inclinaison vertical (i_x et i_y). Les résultats permettent de tirer des conclusions claires sur la nature du terrain à bâtir.

Les procédés appliqués par Geoprofile pour l'essai au pénétromètre statique et les appareils utilisés suivent la norme ISO EN 22476-1 et les réglementations de la publication «International Reference Test Procedure» de la société internationale de mécanique des sols et de la Géotechnique (ISSMGE, 1999).

Sauf accord contraire, les critères suivants s'appliquent pour l'achèvement de l'essai;

- la profondeur de pénétration souhaitée est atteinte;
- l'écart par rapport à la verticale est supérieur à 15° ;
- l'écart par rapport à la verticale augmente soudainement;
- la puissance maximale de l'équipement sous pression, du dispositif d'appui, des bielles et/ou des capteurs de mesure est atteinte;
- les circonstances de l'appréciation du directeur des sondages comme notamment le risque de dommages matériels ou corporels.

RESULTATS

La présentation des résultats des essais au pénétromètre statique comprend:

- les paramètres q_c , f_s et R_f ainsi que u_2 en fonction de la profondeur sous la surface de la terre,
- éventuellement les paramètres q_t , q_n et B_q lors des essais avec des mesures de pression interstitielle.
- éventuellement l'angle d'inclinaison lors des essais avec des mesures d'angles.

La surface de la terre sert de valeur de référence des essais. La définition des paramètres individuels est la suivante:

z = Profondeur de pénétration dans la surface de la Terre, corrigée par rapport à l'angle d'inclinaison vertical (i):

$$= \int_0^l \cos i \cdot dl$$

sachant que:

z = profondeur de pénétration

l = longueur de pénétration

i = angle d'inclinaison vertical

q_c = résistance de pointe par rapport aux valeurs de référence de l'essai,

f_s = frottement superficiel local. La profondeur est corrigée de sorte que le frottement superficiel (mesuré derrière la pointe) se rapporte à la profondeur de la pointe de sondage.

R_f = Rapport du frottement superficiel à la résistance de pointe (f_s/q_c).

u_2 = Pression interstitielle directement derrière la pointe de la sonde (position 2). La profondeur est corrigée de sorte que la pression de l'eau interstitielle mesurée se rapporte à la profondeur de la pointe de sondage.

Durant la réalisation de l'essai, une perte de saturation de l'élément filtrant peut notamment survenir (Lunne et al., 1997). En voici les possibles raisons:

- pénétration dans un sol en partie saturé;
- apparition d'une pression négative de l'eau interstitielle de sorte qu'une cavitation survient. Ceci peut par exemple se produire durant la pénétration dans un sable compact ou une argile surconsolidée.

Une perte de saturation conduit normalement à une moindre pression interstitielle lors de la pénétration dans le sol en dessous de cette zone.

q_t = Résistance de pointe totale. Ce paramètre comprend des corrections pour la pression interstitielle hydrostatique et la pression interstitielle transitoire ainsi que pour la construction de la pointe de sondage:

$$q_t = q_c + (1-a)u_2$$

Sachant que:

a = le rapport de surface net de la section de la surface d'acier dans l'ouverture entre la pointe de sondage et le manchon de frottement. Ce rapport dépend du type de pénétromètre.

q_n = $q_t - \sigma_{vo}$ = la résistance de pointe nette. Ce paramètre comprend des corrections pour la pression interstitielle hydrostatique et la pression interstitielle transitoire ainsi que pour la construction de la pointe de sondage et la tension in situ dans le sous-sol. Sachant que:

σ_{vo} = la tension in situ verticale totale dans la zone de la pointe. Cette valeur est calculée.

B_q = Rapport de pression interstitielle:

$$B_q = (u_2 - u_o) / q_n \quad \text{où}$$

u_o = pression de l'eau interstitielle hydrostatique dans la zone de la pointe de sondage Il s'agit d'une valeur calculée.

AUTRES MESURES

D'autres mesures peuvent être effectuées au moyen de l'essai au pénétromètre statique électrique:

- mesure de la pression hydrostatique de l'eau à une certaine profondeur;
- test de dissipation. On mesure en l'occurrence la réduction de la pression de l'eau interstitielle transitoire au cours du temps. Les résultats permettent des déductions sur la perméabilité horizontale des couches à grains fins et donc sur le temps requis jusqu'à l'annulation des affaissements primaires.
- contrôle de la génération du frottement. On mesure en l'occurrence l'augmentation du frottement superficiel local après une interruption de l'opération de sondage. Les résultats permettent de déduire l'évolution au cours du temps du frottement superficiel le long d'un fût du pieu.

Pour réaliser ces mesures supplémentaires, l'opération de sondage doit être stoppée.

BIBLIOGRAPHIE

CEN (2005), "Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Felduntersuchungen - Teil 1: Drucksondierungen mit elektrischen Messwertaufnehmern und Messeinrichtungen für den Porenwasserdruck (ISO EN 22476-1:2005)

ISSMGE International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (1999), "International Reference Test Procedure for the Cone Penetration Test (CPT) and the Cone Penetration Test with Pore Pressure (CPTU)", Bericht vom ISSMGE Technical Committee 16 bzgl. die Bestimmung von Baugrundeigenschaften mittels in-situ Prüfverfahren, Proceedings of the Twelfth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Amsterdam, editiert Barends et al., Vol. 3, pp. 2195-2222.

Lunne, T. (1999), "Special Workshop – Investigation Methods", Proceedings of the Twelfth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Amsterdam, editiert Barends et al., Additional Volume, pp. 51-52.

INTRODUCTION

Le présent document donne un aperçu des méthodes d'exploitation utilisées pour les résultats d'essais au pénétromètre statique. La qualification des méthodes individuelles dépend notamment des exigences du projet respectif et doit être évaluée par un ingénieur en géotechnique.

L'exploitation des résultats des essais au pénétromètre statique aide à fixer des paramètres pour des modèles géotechniques. Les modèles conventionnels reposent normalement sur la théorie de la plasticité pour l'état limite de la force portante et sur la théorie de l'élasticité et de la consolidation pour l'état limite de l'adéquation à l'usage (CEN, 1994) Ces modèles géotechniques présentent les caractéristiques suivantes :

- une analyse du comportement à l'état drainé ou non drainé pour les modèles de plasticité
- l'analyse de l'état limite de la force portante se distingue de celle de l'état limite de l'adéquation à l'usage.

Les méthodes d'exploration pour les essais au pénétromètre statique se basent le plus souvent sur des corrélations empiriques avec un contexte théorique. L'intégration des données avec d'autres techniques d'exploration supplémentaires telles que des carottages et des essais en laboratoire augmente le degré de fiabilité. Lunne et al. (1997) donnent un aperçu des différentes méthodes d'exploitation.

Les méthodes d'évaluation expliquées ci-dessous sont soumises à quelques restrictions:

- Les corrélations empiriques se rapportent aux paramètres de référence qui ont été mesurés dans un procédé de référence défini. C'est ainsi que la résistance au cisaillement non drainée issue de résultats de sondage avec un facteur N_{KT} se rapporte à celle qui a été calculée en laboratoire dans un essai triaxial non drainé, en une étape, consolidé de manière isotrope (CIU) sur un échantillon de sol non perturbé. Le paramètre de référence n'est pas obligatoirement approprié au modèle géotechnique choisi de sorte qu'un ajustement pourrait être requis.
- La plupart des méthodes d'évaluation sont le plus souvent valables pour un sable ou une argile. Pour le limon, les mélanges argile/sable/gravier, les mélanges à couches très minces, les couches cimentées et/ou les sols érodés, des écarts peuvent survenir. Pour ces couches, on doit procéder de manière spécifique (Peuchen et al., 1996; Lunne et al., 1995).
- Les évaluations se rapportent aux conditions au début des explorations géotechniques. Les facteurs géologiques et de technique environnementale ainsi que les travaux de construction peuvent modifier les conditions du terrain à bâtir préexistantes.
- L'essai au pénétromètre statique ne donne des informations directes sur l'état limite de l'adéquation à l'usage (déformations) que jusqu'à un certain point car, lors de la pénétration, le sol environnant est fortement déformé. Par rapport à l'état limite de la force portante, des données supplémentaires plus précises peuvent s'avérer nécessaires.

- Le comportement drainé ou non drainé pour l'analyse géotechnique peut correspondre au comportement respectif drainé ou non drainé pendant l'opération de sondage mais ce n'est pas une obligation. Il incombe à l'ingénieur en géotechnique d'estimer quel comportement est pertinent pour les questions géotechniques.

COMPORTEMENT DE PENETRATION

Durant l'opération de sondage, des déformations relativement grandes apparaissent à proximité immédiate et des déformations élastiques relativement petites apparaissent à une distance relativement grande du pénétromètre. La composition des couches individuelles, la densité, la structure et les contraintes in situ influencent les grandeurs de mesure.

La résistance de pointe mesurée q_c est notamment influencée par la pression de l'eau interstitielle. Etant donné que le rapport de la contrainte effective à la pression interstitielle dans les couches à gros grains est élevé, cette influence peut normalement être négligée. Lors de la pénétration dans l'argile, le même rapport est cependant faible. Il peut donc être important de connaître la valeur de la pression interstitielle autour du pénétromètre. Parmi les paramètres qui tiennent compte des répercussions de la pression interstitielle, on citera la résistance de pointe totale q_t , la résistance de pointe nette q_n et le rapport de pression interstitielle B_q . Ces paramètres peuvent être calculés lorsque l'on dispose des données sur la pression de l'eau interstitielle. Les répercussions de la pression interstitielle sur le frottement superficiel f_s sont très faibles et sont habituellement ignorées. Le calcul du rapport de frottement R_f (défini comme f_s/q_c) ne permet pas de faire des déductions sur les effets de la pression interstitielle.

La vitesse de pénétration concernant la perméabilité du sol détermine si le comportement du sol est en premier lieu non drainé, drainé ou en partie drainé. Normalement, le comportement du sol est drainé pour les essais au pénétromètre statique dans le sable et le gravier (il n'y a pas de pression de l'eau interstitielle provoquée en raison de l'opération de sondage plus que la pression hydrostatique) et non drainé dans l'argile (influence significative de la pression de l'eau interstitielle). Dans les sols ayant une perméabilité moyenne, tels que le limon, le drainage est partiel. Les paragraphes suivants détaillent le calcul des paramètres géotechniques sur la base des essais au pénétromètre statique.

CLASSIFICATION

La classification des différentes couches par rapport au comportement général du sol (et à un degré plus limité, au type de sol) constitue un élément important du essai au pénétromètre statique comparativement à d'autres techniques de investigation.

La classification du comportement du sol concorde avec la méthode décrite par Robertson (1990). Celle-ci étudie une classification standardisée du comportement du sol qui donne une ligne directrice générale pour définir le type de sol probable (par exemple sable, limoneux). Pour cela, des données d'un sondage concernant la pression de l'eau interstitielle sont requises. Il existe une méthode simplifiée pour obtenir des résultats sans mesurer la pression de l'eau interstitielle (Robertson et al., 1986).

CONTRAINTES IN SITU

Les contraintes dans le terrain à bâtir doivent être connues pour que les paramètres tels que la densité relative I_D et l'angle de frottement intérieur φ' puissent être calculés. La contrainte verticale effective σ'_v peut être calculée mais la contrainte horizontale effective $\sigma'_{ho} = K_0 \sigma'_{vo}$ est le plus souvent inconnue et dépend d'abord du degré de préconsolidation OCR [-] et de l'angle de frottement intérieur φ' [°] :

$$K_0 = (1 - \sin \varphi') \cdot OCR^{\sin \varphi'} \quad [1]$$

Pour une explication des symboles utilisés, référez-vous à l'annexe «essai au pénétromètre statique électrique (CPT)» sauf indication contraire. L'équation repose sur la préconsolidation mécanique d'échantillons reconstitués en laboratoire. La préconsolidation peut être provoquée dans la nature par des facteurs géologiques tels que la surcharge glaciaire et l'érosion mais également par des fluctuations des nappes phréatiques et par le vieillissement des sédiments («ageing»). Normalement, les valeurs in situ de K_0 pour des profondeurs allant jusqu'à 50 m se situent entre 0,4 et 2,0. A des profondeurs supérieures (> 50 m), ce coefficient de pression au repos est habituellement inférieur à 1.

La pression passive maximale des terres fixe une limite supérieure à la contrainte horizontale effective. Le coefficient de la pression passive des terres se détermine, en négligeant une éventuelle cohésion, selon l'équation suivante:

$$K_p = \frac{1 + \sin \varphi'}{1 - \sin \varphi'} \quad [2]$$

Lorsque la contrainte horizontale effective atteint le niveau de la pression passive des terres, des fissures peuvent se former dans le sol. Dans les argiles desséchées, une formation de fissures peut également apparaître plus tôt. Dans des couches cimentées, il peut exister une pression horizontale des terres supérieure à ce qui est décrit plus haut, en raison de la cohésion existante. La combinaison du rapport pour K_0 et K_p donne une limite supérieure pour la préconsolidation:

$$OCR_{\max} = \left[\frac{1 + \sin \varphi'}{(1 - \sin \varphi')^2} \right]^{\frac{1}{\sin \varphi'}} \quad [3]$$

Pour une argile, le degré de préconsolidation maximal OCR_{\max} est donc inférieur à 4, pour un sable cependant supérieur à 50.

Le degré de préconsolidation de sédiments à grains fins peut être directement déduit des résultats de sondage (Kulhawy et Mayne, 1990):

$$OCR = \alpha \cdot (q_T - \sigma_v) \quad [4]$$

Kulhawy et Mayne proposent une valeur α de 0,3 [-]. La corrélation des essais au pénétromètre statique avec des essais œdométriques évalués pour les argiles et les limons en Suisse suggère qu'une valeur de 0,25 serait mieux appropriée aux circonstances suisses. Pour estimer le degré de préconsolidation (OCR) Geoprofile prend comme base une valeur α de 0,25 ce qui conduit à un degré de préconsolidation un peu plus bas par rapport à Kulhawy et Mayne.

Pour les sables et les mélanges de sable et de gravier, le degré de préconsolidation peut s'estimer comme suit:

$$OCR = \left[\frac{0.192 \cdot (q_t / p_{atm})^{0.22}}{(1 - \sin \varphi')(\sigma'_{vo} / p_{atm})^{0.31}} \right]^{\frac{1}{\sin \varphi' - 0.27}}$$

sachant que p_{atm} représente la pression atmosphérique.

La pression de préconsolidation σ'_p découle de la multiplication par la contrainte verticale effective in situ:

$$\sigma'_p = \sigma'_{vo} \cdot OCR \quad [5]$$

Si l'on calcule en outre l'angle de frottement intérieur effectif φ' , la pression horizontale des terres au repos est également connue conformément à [1].

PROPRIETES DE CISAILLEMENT EFFECTIVES

L'angle de frottement intérieur effectif φ' n'est pas une constante. En plus de la composition (minéralogie, forme et rugosité du grain) et de la densité, il dépend également des contraintes dans le sol et du mode de cisaillement. Il y a des indications qui montrent que les facteurs tels que le mode de sédimentation ou l'anisotropie de contrainte in situ sont moins importants.

Les valeurs calculées des angles de frottement effectifs se rapportent au niveau de contrainte in situ pendant le sondage. Ceci devrait par exemple convenir pour calculer la stabilité d'une pente. Dans le cas d'une augmentation significative des contraintes, par exemple en cas de remblayage ou de fondation sur pieux, l'angle de frottement effectif pour le sable et le mélange de sable et de gravier doit être adapté aux nouvelles contraintes ce qui signifie le plus souvent une réduction des paramètres de cisaillement. Le procédé selon Bolton (1986, 1987) représente pour cela une méthode largement acceptée. Comme l'angle de frottement critique φ'_{crit} est déjà atteint à un faible niveau de contrainte dans le cas de sols à grains minces, la diminution des paramètres de cisaillement effectifs pour l'argile et le limon est moins habituelle.

Le rapport de l'angle de frottement intérieur φ' à la résistance de pointe q_c peut être calculé d'une manière simple ou plus intensive. Les méthodes simples s'appuient sur une classification conservatrice du comportement du sol. Une exploration empirique plus coûteuse tient en outre compte des contraintes in situ σ'_{vo} et σ'_{ho} (cf. paragraphe «contraintes in situ»). De plus la densité peut être explicitement intégrée. Des approches relativement nouvelles ne tiennent compte qu'implicitement de la densité en incluant q_c car lors de l'estimation de la densité des incertitudes supplémentaires sont introduites.

Une vérification des résultats des essais au pénétromètre statique dans des chambres de calibrage remplies de sable permet d'estimer l'angle de frottement intérieur effectif φ' pour ce matériau (Kulhawy et Mayne, 1990):

$$\varphi' = 17.6 + 11 \cdot \log(q_{t1}) \quad [6]$$

$$q_{t1} = \frac{q_t / p_{atm}}{\sqrt{\sigma'_{vo} / p_{atm}}} \quad [p_{atm} = \text{pression atmosphérique} \approx 100 \text{ kPa}] \quad [7]$$

Le procédé de référence correspond à des essais triaxiaux sous charge axiale sur des échantillons de sable consolidés de manière isotrope et anisotrope (CID et CAD). Par rapport aux équations antérieures (par exemple Robertson et Campanella, 1983) la corrélation contient une correction pour la taille de la chambre de calibrage par rapport à la pointe de sondage.

L'estimation des paramètres de cisaillement effectifs pour les sédiments à grains fins et mélangés repose sur une forme de la formule de force portante (Senneset et al., 1988, 1989):

$$q_n = N_m (\sigma'_{vo} + a) \quad [9]$$

où:

$$N_m = \frac{N_q - 1}{1 + N_u B_q} \quad [10]$$

$$N_q = \tan^2 \left(45 + \frac{1}{2} \varphi' \right) e^{(\pi - 2\beta) \tan \varphi'} \quad [11]$$

$$N_u = 6 \tan \varphi' (1 - \varphi') \quad [12]$$

β = angle de plastification

a = attraction

Pour cela l'angle de plastification et l'attraction doivent être estimés. Senneset et al. donnent des valeurs indicatives pour différents matériaux en fonction de la consistance ou de la densité. L'estimation des angles de frottement intérieurs effectifs dépend relativement peu des valeurs choisies pour β et a . La méthode choisie par Geoprobe repose sur une estimation prudente des deux paramètres.

L'estimation de la cohésion effective des couches à grains fins dépend de la pression de préconsolidation σ'_p (Mesri et El-Ghaffar, 1993):

$$c' = 0.024 \cdot \sigma'_p \quad [13]$$

Pour déterminer la pression de préconsolidation σ'_p cf. le paragraphe «contraintes in situ». L'intégration d'autres jeux de données géotechniques pour déterminer la cohésion effective est recommandée. Il appartient à un ingénieur en géotechnique de juger si l'utilisation d'une cohésion effective est judicieuse compte tenu des questions géotechniques et de l'évolution non linéaire de l'enveloppe. Pour les analyses à long terme, il peut être approprié de négliger complètement la cohésion effective.

DENSITÉ RELATIVE

La détermination de l'espace poreux minimal et maximal des échantillons de sable en laboratoire (e_{\min} et e_{\max}) constitue la base du concept de densité relative. Il est improbable que lors des essais en laboratoire, on calcule effectivement la valeur la plus basse ou la valeur maximale pour l'espace poreux e_{\max} ou e_{\min} . Le poids spécifique in situ peut ainsi dépasser la valeur enregistrée en laboratoire.

Les liens habituels entre q_c et la densité relative I_D reposent sur des essais aux au pénétromètre statique dans une chambre de calibrage remplie de sable. Ces tentatives font partie de projets de recherche géotechniques généraux et sont soumises à certaines restrictions, telles que:

- dépendance du type de sol
- imprécisions lors de la détermination de I_D en laboratoire
- plage limitée des tensions et des valeurs K_0
- simplifications pour la préparation d'échantillons et pour les enregistrements sur la contrainte du sol

Les étapes suivantes servent à déterminer la densité (lâche, compact, etc.) sur place:

- (a) estimation des contraintes in situ σ'_{vo} et σ'_{ho}
- (b) corrélation empirique de la densité relative I_D où q_c , σ'_{vo} et σ'_{ho}

L'estimation des contraintes in situ a été expliquée ci-dessus. De plus, si l'on dispose d'indications générales sur la compressibilité du sable, celles-ci devraient être intégrées à l'évaluation de la densité relative. Plus l'uniformité de la distribution granulométrique augmente, plus les grains individuels sont anguleux, plus la part fine augmente et plus la compressibilité d'un sable a tendance à augmenter.

L'estimation de la densité relative s'effectue selon Kulhawy et Mayne (1990):

$$I_D^2 = \frac{q_{t1}}{305 Q_c \cdot Q_{OCR} \cdot Q_A} \quad [14]$$

où q_{t1} dépend de [7] et les facteurs Q_c , Q_{OCR} et Q_A sont calculés comme suit:

Q_c	= facteur de compressibilité	
	$0,91 < Q_c < 1,09$	(Une valeur basse représente une faible compressibilité)
Q_{OCR}	= facteur de préconsolidation	
	$OCR^{0.2}$	

Q_A = facteur qui considère de l'augmentation de la résistance de pointe au cours du temps
 $1.2 + 0.05 \cdot \log(t/100)$ (t en années)
 $\approx 1,3$ pour les sables qui se sont déposés après la dernière glaciation

MODULE DE COMPRESSION LORS DE LA PREMIERE CHARGEMENT

Les liens entre les résultats des essais aux au pénétromètre statique et le module de compression oedométrique pour la première chargement E_{s1} sont donnés à titre indicatif. Pour déterminer de manière exacte le comportement de déformation sous charge, des données supplémentaires (par exemple le dilatomètre ou l'essai œdométrique) sont indispensables.

Normalement, on applique la théorie de l'élasticité pour l'analyse du comportement de déformation des sols drainés. Lunne et Christophersen (1983) proposent, en s'appuyant sur une vérification des résultats des essais aux au pénétromètre statique dans des chambres de calibrage remplies de sable, l'équation suivante pour estimer le module de compression en cas de première chargement:

$$M_{E1} = \begin{cases} 4 \cdot q_c & q_c < 10 \text{ MPa} \\ 2 \cdot q_c + 20 & 10 < q_c < 50 \text{ MPa} \\ 120 & q_c > 50 \text{ MPa} \end{cases} \quad [15]$$

L'estimation du module de compression en cas de première sollicitation pour les couches à grains fins s'effectue le plus souvent selon l'équation suivante:

$$M_{E1} = \alpha_c \cdot q_c \quad [16]$$

Ou bien, après correction pour la pression de l'eau interstitielle transitoire et la construction de la sonde:

$$M_{E1} = \alpha_n \cdot q_n \quad [17]$$

α représente en l'occurrence un coefficient de corrélation qui dépend notamment de la plasticité, de la granulométrie, de la minéralogie et de l'historique de la contrainte. Mitchell et Gardner (1975) donnent des valeurs indicatives pour α_c qui sont comprises entre 1 et 8 en fonction de la composition, de la plasticité et de la résistance au cisaillement. Des études récentes s'appuyant sur la résistance de pointe nette q_n recommandent une valeur α_n entre 4 et 8 (Senneset et al, 1989). La méthode choisie par Geoprofile considère une valeur globale α_n de 5 comme applicable.

L'estimation de la pression de préconsolidation σ'_p dépend de [5].

RESISTANCE AU CISAILLEMENT NON DRAINEE

La résistance au cisaillement non drainée c_u (antérieurement : s_u) n'est pas une constante. Elle dépend de facteurs tels que le mode et la direction de cisaillement, l'historique et l'anisotropie de contrainte, de la vitesse de cisaillement et de la température.

Il y a différentes méthodes théoriques et empiriques pour mettre la résistance de pointe q_c en corrélation avec la résistance au cisaillement non drainée s_u . Les approches théoriques s'appuient sur la théorie de la force portante ou la mécanique des sols de l'état critique effectif (critical state soil mechanics, CSSM). C'est ainsi que le mode de cisaillement simple peut être décrit de la manière suivante (Wroth 1984):

$$s_u / \sigma'_{vo\ DDS} = \frac{1}{2} \sin \varphi' \cdot OCR^\Lambda \quad [18]$$

soit $\Lambda = 1 - C_s/C_c$ le potentiel de dilatation volumétrique plastique et C_c et C_s , l'indice de compression en cas de première chargement ou de déchargement. Pour les argiles présentant une sensibilité faible à moyenne, Λ est le plus souvent compris entre 0,7 et 0,8, pour les argiles sensibles Λ est plutôt autour de 0,9. La relation connue (Jamiolkowski et al., 1985; Ladd, 1991; Ladd and DeGroot 2003):

$$s_u / \sigma'_{vo\ DDS} = 0.22 \cdot OCR^{0.8} \quad [19]$$

qui a été développée dans le laboratoire de terrassement du MIT est en l'occurrence un sous-ensemble de [18] où $\varphi' = 26^\circ$ et $\Lambda = 0,8$. La méthode choisie par Geoprofile utilise la valeur issue des données de sondage pour l'angle de frottement intérieur effectif φ' et un Λ de 0,8.

Les approches empiriques reposent le plus souvent sur une corrélation directe de la résistance de pointe nette q_n avec la résistance au cisaillement non drainée (Rad et Lunne, 1988):

$$s_{u\ TX} = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{N_{kt}} = \frac{q_n}{N_{kt}} \quad [20]$$

Le facteur N_{kt} est habituellement compris entre 15 et 25 mais il dépend notamment de la plasticité et du degré de préconsolidation. Le procédé de référence pour la relation ci-mentionnée est l'essai de compression triaxial consolidé non drainé (CU). La méthode choisie par Geoprofile se réfère à une résistance au cisaillement non drainée avec un facteur N_{kt} de 18 mais qui n'est utilisée que pour contrôler la résistance au cisaillement non drainée issue de [18] (et donc indirectement également de φ').

La sensibilité d'une argile est le rapport entre la résistance au cisaillement maximale et la résistance au

cisaillement non drainée perturbée:

$$S_t = s_{u,max} / s_{u,rest} \quad [21]$$

Comme le frottement superficiel local mesuré f_s dans l'argile dépend d'abord de la résistance au cisaillement perturbée non drainée, la sensibilité peut être déduite de la manière suivante (Rad et Lunne, 1986):

$$S_t = \frac{N_s}{R_f} \quad [22]$$

sachant que R_f désigne le rapport de frottement et que N_s est habituellement compris entre 6 et 9. La méthode choisie par Geoprofile s'appuie pour l'estimation de la sensibilité sur une valeur N_s de 7,5.

BIBLIOGRAPHIE

Bolton, M.D. (1986), "The Strength and Dilatancy of Sands", *Geotechnique*, Vol. 36, No. 1, pp. 65-78.

Bolton, M.D. (1987), "The Strength and Dilatancy of Sands, Discussion", *Geotechnique*, Vol. 37, No. 2, pp. 225-226.

Kulhawy, F.H. et P.W. Mayne, (1990), *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design*, Report EPRI EL-6800, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 306 pp.

Ladd, C.C., Foott, R.R., Ishihara, K., Schlosser, F. et Poulos, H.G. (1977), "Stress-Deformation and Strength Characteristics", *Proc. 9th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Vol. 2, pp. 421-494.

Lunne, T., Powell, J.J.M. et Robertson, P.K. (1995), "Use of Piezocone Tests in Non-Textbook Materials", *Proc. Int. Conf. on Advances in Site Investigation Practice*, Inst. of Civil Engineers, London, pp. 438-451.

Lunne, T. et Christophersen, H.P. (1983), "Interpretation of cone Penetrometer data for offshore Sands", *Proc. of the offshore technology conference*, Richardson, Texas, paper nr. 4464

Lunne, T., Robertson, P.K. et Powell, J.J.M. (1997), "Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice", *Blackie Academic & Professional*, London, p. 312.

Mayne, P.W. et Kulhawy, F.H. (1982), " K_o - OCR Relationships in Soil", ASCE Jnl. of Geotechnical Engineering, Vol. 108, No. GT6, pp. 851-872.

Mesri, G. et Abdel-Ghaffar, M.E.M. (1993). "Cohesion Intercept in Effective Stress Stability Analysis." Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, No. 8, pp. 1229-1249.

Mitchell, J.K. et Gardner, W.S. (1975), "In-Situ Measurements of Volume Change Characteristics", ASCE Speciality Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties, North Carolina, Vol. II, pp. 279-345.

Rad, N.S. et Lunne, T. (1988), "Direct Correlations between Piezocone Test Results and Undrained Shear Strength of Clay", Penetration Testing 1988, Proc. First Int. Symp. On Penetration Testing, ISOPT-1, De Ruiter (ed.), Vol. 2, pp. 911-917.

Robertson, P.K. (1990), "Soil Classification using the Cone Penetration Test", Can. Geotech. Jnl., Vol. 27, No. 1, pp. 151-158.

Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D. et Grieg, J. (1986), "Use of Piezometer Cone Data", Proc. In-Situ '86, ASCE Specialty Conf., Blacksburg, VA, pp. 1263-1280.

Senneset, K., R. Sandven, T. Lunne, T. By, et T. Amundsen, (1988), "Piezocone Tests in Limony Soils," Penetration Testing, Vol. 2, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 955-974.

Senneset, K., R. Sandven, et N. Janbu, (1989), "Evaluation of Soil Parameters from Piezocone Tests," Transportation Research Record 1235, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C, pp. 24-37.

Wroth, C.P. (1984), "The Interpretation of In-Situ Soil Tests", Geotechnique, Vol. 34, No. 4, pp. 449-489.