



Essais de sol et analyses
géotechniques

PROCES VERBAL D'ESSAI RAPPORT ES23491/22_B

CONSTRUCTION D'HABITATIONS
Monsieur et Madame JONET - BUTTIENS

DEMANDE PAR :

Monsieur et Madame JONET - BUTTIENS
Route de Givet, 49
4560 Clavier

POUR LE COMPTE DE :

Monsieur et Madame JONET - BUTTIENS
Route de Givet, 49
4560 Clavier

LIEU DES ESSAIS :

Chaussée de Liège/Rue Henri Fays
4162 Hody

DATE DU RAPPORT : 04/07/2022

BE Siège principal
LU Siège d'exploitation

Lenclos, 72C
Rue Charles Kieffer, 11

B-6740 Etalle
L-8389 Grass

T. +32 63 42 22 94
T. +352 20 60 08 67

1. Description des machines et des essais

A. Essai au pénétromètre statique

Les essais de pénétration statiques (cône mécanique CPT-M1) sont réalisés avec un pénétromètre lesté (jusqu'à 200 kN). Le train de tige, muni à son extrémité du cône mécanique, avec un angle au sommet du cône de 60° et une section à la base de 10 cm², est poussé dans le sol via un vérin hydraulique avec une vitesse de pénétration constante de 2 cm/s.

Par l'intermédiaire de tiges couissant dans les tubes-allonges, il est possible de faire avancer la pointe seule.

La résistance au cône et la résistance totale (résistance au cône + résistance au frottement latéral) sont mesurées tous les 2 cm. Les résultats présentés en annexe reprennent uniquement les mesures tous les 10cm afin d'alléger la lecture. Toutes les valeurs mesurées peuvent être transmises sur simple demande.

En fin d'essai, après extraction des tubes, le niveau d'eau est relevé au moyen d'une sonde électronique. Le niveau d'eau déterminé de cette façon peut être fort imprécis dans le cas de terrains peu perméables (argiles, limons), et être fort éloigné du niveau réel des eaux souterraines.

Les résultats des essais sont présentés sur les diagrammes en annexe. La résistance à la pointe (q_c) exprimée en kN/cm² (courbe noire) et la résistance au frottement latéral sommée (FI) en kN (courbe rouge) y sont représentés en fonction de la profondeur.



B. Forages de reconnaissance

Les forages ont été exécutés à l'aide d'une sondeuse de type Comacchio GEO 305 (poids de 4,2 tonnes, puissance de 55,4kW à 2300 t/min).

Cette machine est conçue pour la réalisation de forages de reconnaissance (tarière, roto-percussion) et pour l'utilisation du pressiomètre type Ménard.

Le terrain est foré en Ø63mm au moyen d'un carottier T2 ou d'une tarière.

Un enregistrement des paramètres (vitesse avancement, pression de poussée, couple de rotation) a été réalisé lors de chaque forage. Ces paramètres sont enregistrés au moyen d'un appareil Jean Lutz et sont présentés en annexe.

La poussée sur l'outil est constante afin de pouvoir différencier la dureté des couches de terrain par mesure des différences de vitesse d'avancement. Lorsque la vitesse d'avancement diminue, cela signifie en principe que nous rencontrons des couches plus compactes.

2. Interprétations des résultats statiques

Légende des symboles utilisés

Q_0 : la contrainte due au poids propre des terres [kg/cm²]

q_c : la résistance à la pointe [kN/cm²] (Remarque : 1 kN/cm² = 10 Mpa ≈ 100 kgf/cm²)

F_l : le frottement latéral total [kN] (Remarque : 1 kN ≈ 100 kgf)

ϕ_u : angle de frottement interne apparent [°]

C : la constante de compressibilité [-]

P_{adm} : Pression de fondation admissible pour des semelles continues d'une largeur de 50cm, 70cm et 90cm [kg/cm²].

Par application de la théorie du Professeur De Beer sur l'interprétation des essais de pénétration statique, il est possible de déduire, de la valeur de la résistance à la pointe, un angle de frottement apparent ϕ_u du sol aux différents niveaux de mesure.

Les hypothèses simplificatrices de base de cette théorie sont les suivantes :

- cohésion du sol nulle : $c = 0$ [kPa]
- poids volumique du sol au-dessus de la nappe : $\gamma = 16$ [kN/m³] = 1600 [kg/m³]
- poids volumique du sol immergé : $\gamma = 20$ [kN/m³] = 2000 [kg/m³]

L'angle de frottement apparent ϕ_u du sol est déterminé aux différents niveaux de mesure de la manière suivante :

- 1) L'essai de pénétration permet de calculer le rapport suivant :

$$N''_{q,d} = \frac{q_c}{\sigma'_{v'}} \quad (1)$$

Avec $N''_{q,d} = f(\phi', \phi_u)$ (2)

- 2) On postule $\phi' = 30^\circ$ et on déduit ϕ_u de la relation (2)
- 3) Si $\phi_u < 30^\circ$, on adopte la valeur trouvée ;
Si $\phi_u > 30^\circ$, on la rejette ; on admet dans ce cas que $\phi' = \phi_u$ et on recalcule l'angle de frottement apparent, considéré comme égal à l'angle de frottement interne.

A partir de la résistance à la pointe q_c , il est possible, moyennant certaines hypothèses, de disposer d'une valeur minimale de la constante de compressibilité C d'un sol :

$$C = \alpha \cdot \frac{q_c}{\sigma'_{v'}}$$

Avec α valant : 1,5 pour les couches de sable peu compactes et les couches faibles ;
2,0 pour les couches de sables compactes et les couches consolidées de cohésion normale ;
2,5 pour les couches rigides et sur-consolidées ;
0,5 à 0,7 pour les argiles organiques et la tourbe.

Nos calculs sont basés sur $\alpha = 1,5$ de manière à conserver une marge de sécurité pour la plupart des sols rencontrés. Pour une détermination exacte de ces valeurs de α , des essais en laboratoire doivent être effectués.

En général, plus la valeur de α est grande (et donc celle de C également), moins il y a de tassements.

Calcul des tassements

Les tassements sont calculés à l'aide de la formule de Terzaghi :

$$S = \frac{dh}{C} 2,3 \log \frac{P + Sz}{P}$$

Où :

S	:	Tassement [m]
dh	:	Epaisseur de la couche comprimée [m]
C	:	Coefficient de compressibilité [sans dimensions] (voir point 2)
P	:	Contrainte initiale dans le plan d'assise de la fondation [tonne/m ²]
Sz	:	Accroissement de la contrainte dans le plan d'assise en [tonne/m ²]

Les calculs de tassement ont été réalisés en considérant les hypothèses suivantes :

- Les calculs s'arrêtent lorsque la contrainte appliquée sur le sol par les fondations correspond à la contrainte initiale du sol.
- Les tassements dépendent du niveau exact d'une éventuelle nappe phréatique. Dans nos calculs, le niveau d'eau utilisé est le niveau relevé directement dans les trous de sondage. Il peut donc y avoir quelques approximations.
- Ces calculs ne tiennent pas compte d'un éventuel gonflement du sol.
- Les tassements sont calculés dans la situation temporelle égale à la fin de la construction. Ces résultats ne sont plus valables en cas de variation des hypothèses (niveau d'eau, nouvelles constructions voisines, ...).
- Il est supposé que le tassement différentiel peut provoquer des dégâts seulement si :

$$\frac{dS}{L} > \frac{1}{500}$$

Où :

dS	:	Tassement différentiel entre deux points de support voisins
L	:	Distance entre deux points de support

En ce qui concerne la vérification des tassements admissibles, il convient de vérifier à la fois les tassements absolus et différentiels.

Les valeurs généralement retenues comme valeurs maximales de tassement absolu admissible (suivant EC7) pour les constructions neuves sont :

- Semelle filante ou isolée : 2cm
- Radier : 5cm

En conclusion, vu le nombre important d'hypothèses, le tassement calculé ne correspond pas au tassement réellement mesuré. Les valeurs des tassements calculés doivent donc être utilisées précautionneusement dans d'éventuels prises de décision et calculs.

3. Nature du sol

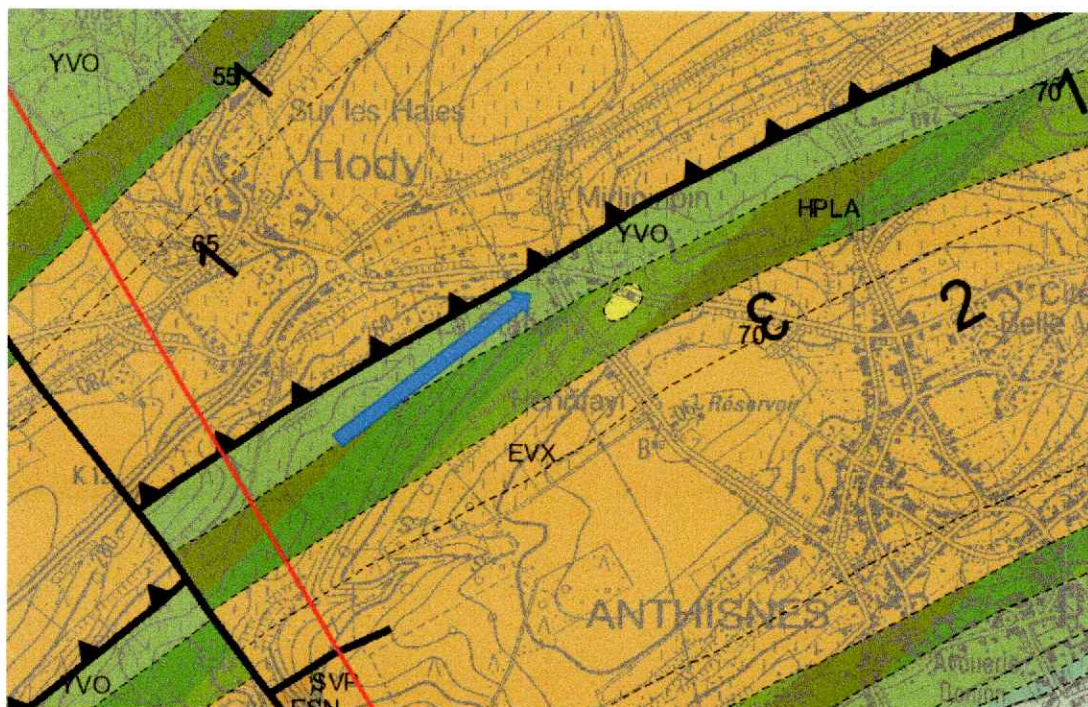
La nature du terrain ne peut être donnée qu'à partir d'un forage de reconnaissance ou d'un carottage et d'essais en laboratoire. Les valeurs données à partir des essais CPT ne revêtent qu'une valeur indicative.

Il n'est pas possible de se baser sur les résidus de terre trouvés sur les barres puisque plusieurs tubes de sondage ont parcouru différentes couches et que les particules se sont mélangées.

De manière générale, les valeurs suivantes peuvent être considérées :

Nature du sol	ϕ	C
Tourbe	Faible	3 - 10
Boue	Faible	5 - 8
Argile	4-14	10 - 20
Limon	20-28	20 - 50
Sable	28-35	50 - 400

Suivant les cartes géologiques (<http://geologie.wallonie.be/home.html>), le sol est constitué de la formation de Monfort et de la formation d'Yvoir ; celles-ci sont séparées par une faille de chevauchement traversant le terrain concerné du sud-est vers le nord-ouest.



La formation de Monfort est constituée de microquartzites arkosiques micacées, souvent calcarifères, se présentant en bancs plaquetés pluricentimétriques et en bancs massifs pluridécimétriques et parfois plurimétriques (« grès » dans le langage courant)¹.

Le membre d'Yvoir présente des calcaires gris-bleu, de grain moyen à fin, en bancs pluridécimétriques à métriques. Ils renferment toujours des articles de crinoïdes dans des proportions variables : tantôt abondants, tantôt plus sporadiques. Ces calcaires sont caractérisés par la présence de cherts noirs, irrégulièrement distribués selon les couches : certains bancs en contiennent une grande quantité ; d'autres en sont dépourvus. La dimension de ces cherts varie depuis celle de sphérules centimétriques jusqu'à celle de plaques épaisses de quelques centimètres et longues de quelques décimètres, toujours allongées selon la stratification et de formes très contournées.

Le forage FC1 situé dans la formation de Monfort ne révèle pas de présence de roche comme visible sur la photo des caisses à carottes ci-après. La diagraphie du forage montre une vitesse d'avancement et un couple de forage variable de manière périodique mais restant dans le même ordre de grandeur. La formation gréseuse n'a donc pas été rencontrée mais aucune présence de cavité n'a été décelée jusqu'à 13,00m, niveau jusqu'auquel nous sommes descendus.

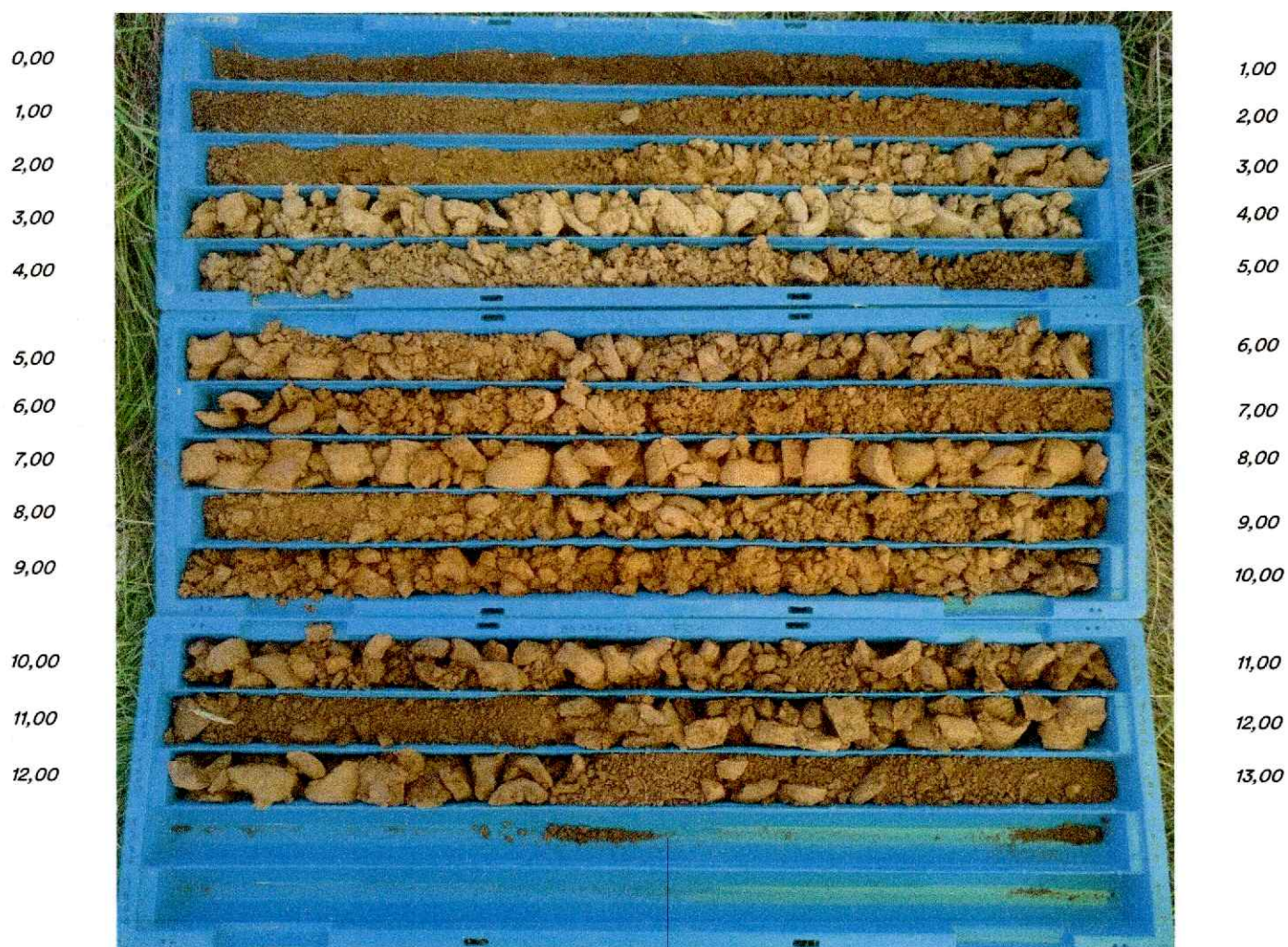
Au forage FC2, comme le montre la diagraphie, un sol plus compact a été rencontré à une profondeur de 7,00m. Celui-ci est constitué d'une alternance de limon argileux et de gravier calcaireux ; un nodule de chert (concrétion siliceuse dure se trouvant dans les roches calcaires, photo ci-dessous) a également été rencontré entre 9,60m et 10,00m faisant diminuer la vitesse d'avancement du forage.



¹ Source : [49-1-2 Tavier Esneux.pdf \(wallonie.be\)](#)

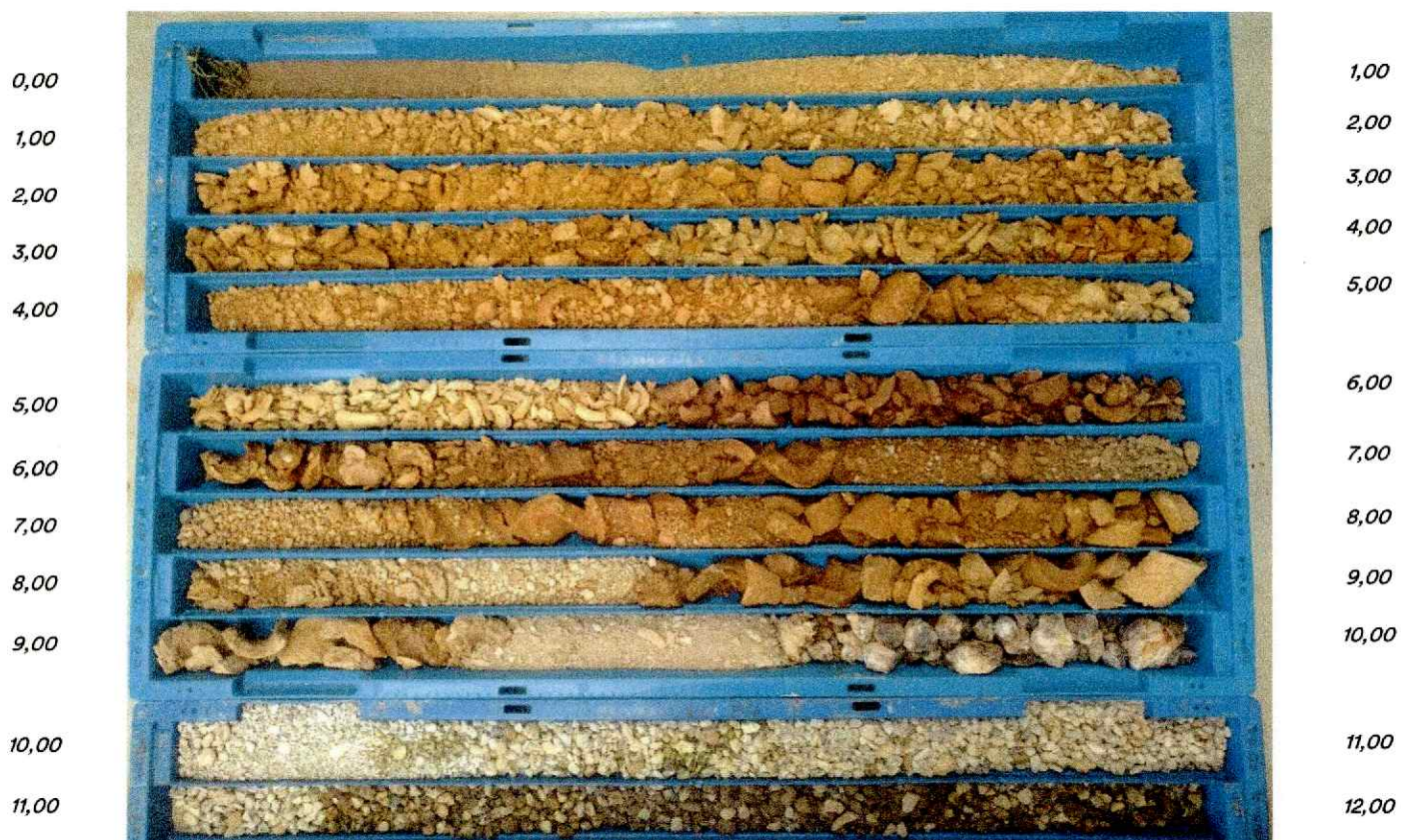
Résultats du forage FC1

Types de terrains		Sol limono argileux		
Sondages		TN	Toit	Pied
FC1	Prof.		0,00	13,00
	Niveau	+264,64	+264,64	+251,64
	Outil forage		Tarière	



Résultats du forage FC2

Types de terrains		Sol limono argileux			Terrain calcaire	
Sondages		TN	Toit	Pied	Toit	Pied
FC2	Prof.		0,00	9,30	9,30	12,00
	Niveau	+266,97	+266,97	+257,67	+257,67	+254,97
	Outil forage		Tarière		Carottier T2	

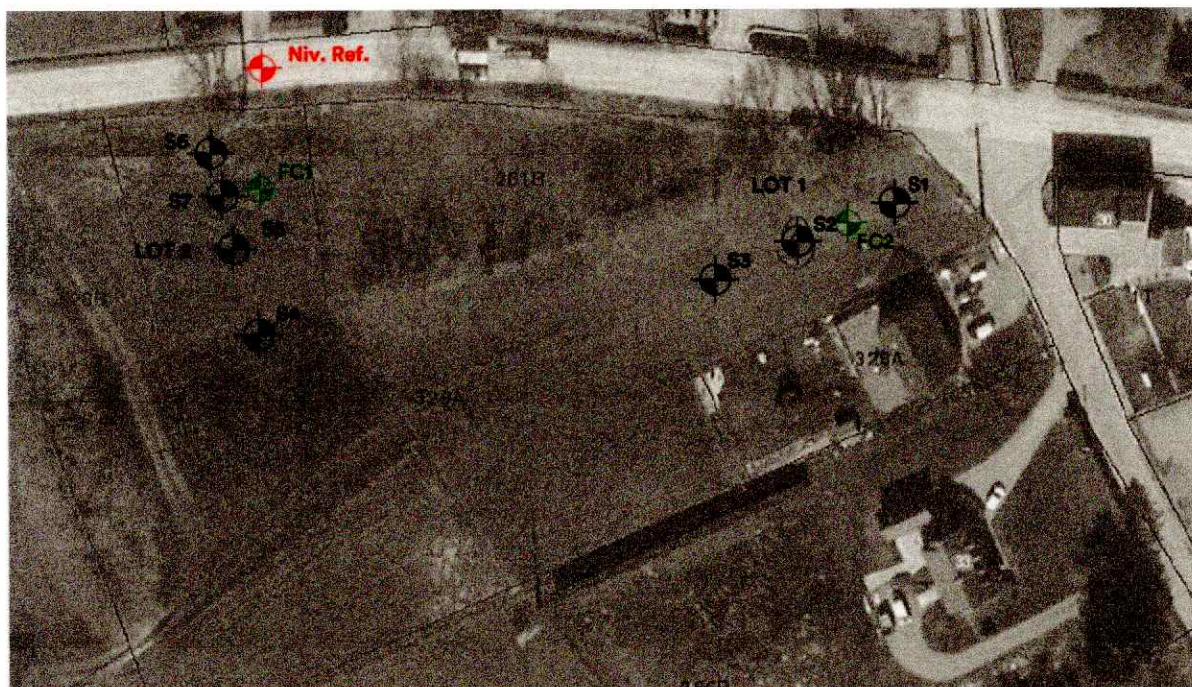


4. Implantation et nivellement

Au vu des résultats hétérogènes, un septième essai a été réalisé. Les 7 essais au pénétromètre statique (S) et les 2 forages de reconnaissance (FC) sont repérés sur le plan d'implantation ci-dessous.

Les cotes de niveau du terrain naturel au droit des essais ont été relevées par rapport au niveau repère 0,00m pris sur le clou de géomètre situé sur la route, à l'avant du lot 2. Les coordonnées Lambert 72 de tous les points d'essai sont reprises dans le tableau ci-dessous.

		Coordonnées Lambert 72			Cote relative en m
	Essai	X	Y	Z	
Lot 1	S1	231.009.608	131.219.156	267.420	-0,51
	S2	231.002.044	131.216.264	266.945	-0,99
	S3	230.989.292	131.211.034	266.277	-1,66
	FC2	231.000.101	131.217.951	266.973	/
Lot 2	S4	230.916.102	131.199.494	262.817	-5,12
	S5	230.911.411	131.213.788	264.040	-3,89
	S6	230.906.359	131.229.302	265.321	-2,61
	S7	230.908.618	131.222.000	264.624	-3,31
	FC1	230.905.764	131.221.845	264.639	/



5. Niveau d'eau

Essai	Profondeur du niveau d'eau [m] (*)	Profondeur d'éboulement [m] (*)
S1	/	9,30
S2	/	7,40
S3	/	6,00
S4	17,80	/
S5	/	8,40
(**) S6	/	3,85
S7	/	15,40
FC1	/	12,99
FC2	/	11,88

(*) par rapport au terrain naturel en place lors des essais de sol.

La « profondeur d'éboulement » indique la profondeur à laquelle le trou de sondage s'est éboulé. Cette information indique qu'aucune présence d'eau n'a été relevée jusqu'à cette profondeur d'éboulement.

La valeur indiquée pour « la profondeur du niveau d'eau » se rapporte au niveau de la nappe d'eau souterraine mesuré dans le trou de sondage, immédiatement après avoir enlevé les tubes de sondage. Ces valeurs sont donc données à titre indicatif. Une bonne définition de la nappe d'eau souterraine n'est possible que lorsqu'on installe un piézomètre.

Rappelons également que le niveau de la nappe d'eau souterraine fluctue en fonction des conditions climatiques (saisons, pluviosité). En général, le niveau le plus élevé est atteint vers le 15 avril et le plus bas vers le 15 octobre (ce niveau peut varier de un à deux mètres en général).

(**) Pas de construction prévue à cet endroit.

6. Caractéristiques mécaniques du sol

Sous la couche superficielle, aux 7 essais, le sol présente directement des caractéristiques mécaniques moyennes à bonnes avec des valeurs de capacité portante de l'ordre de 0,10 MPa à 1,00 MPa.

Du côté du lot 1, aucune tomographie électrique n'a été réalisée. Cependant, le forage révèle la présence de roche calcaire arénitique, c'est-à-dire, sous forme de grave ; cette roche n'étant pas saine et compacte. Les essais au pénétromètre statiques n'atteignent le refus à la pointe qu'au point S3 à 6,14m ; les autres points (S1 et S2) allant plus profondément sans rencontrer de couche compacte. Ceci traduit le caractère hétérogène du sol. La couche supérieure est constituée d'une matrice principalement limoneuse.

Concernant le lot 2, le forage a été localisé afin de se trouver dans la zone de faible résistivité relevée lors de la campagne tomographique. Ce forage ne révèle pas la présence de croche jusqu'à une profondeur de 13,00m. Comme l'indique le rapport de l'Umons-FPMs, dans la région de Hody, le socle primaire est subaffleurant, ce qui n'est pas ce qui est observé dans le forage.

La présence d'un socle primaire calcaire altéré a été mise en évidence dans le forage FC2 (dans la formation d'Yvoir). L'hypothèse de la présence d'une poche cryptokarstique à cet endroit est tout à fait plausible, traduit la présence de sol limoneux meuble à l'endroit théorique d'un socle rocheux.

Voir annexe I concernant la situation du terrain par rapport aux zones d'aléas d'inondation, les zones de contraintes karstiques, les risques miniers répertoriés et la description du type de sol.

7. Conclusions

Ne possédant pas toutes les données définitives de la construction (Niveau d'assise des fondations, matériaux utilisés, ...) les conclusions ci-dessous sont conservatives et établies de manière générale. Le système de fondation ainsi que la descente des charges sont propres à chaque construction.

Compte tenu de ce qui précède, malgré la présence de roche karstifiée et altérée en profondeur, les terrains sont constructibles au vu des résultats des essais de pénétration dynamique. Les précautions ci-dessous seront à prendre concernant les fondations et la gestion des eaux sur les 2 terrains.

Concernant les fondations, une construction de gabarit classique (2 niveaux de hourdis) pourrait être fondée avec une assise sous la couche végétale et hors-gel sur radier général en béton armé avec un taux de travail admissible limité à 1,00 MPa.

Pour la gestion des eaux, en zone de formation carbonatée, il y a lieu de suivre les règles suivantes :

1° les circuits d'adduction d'eau et d'évacuation des eaux usées et pluviales, y compris celles des surfaces imperméabilisées (terrasses, parkings, aires de chargement ou de stockage, ...), sont conçus de manière à être et à rester étanches en cas de mouvements de terrain. Il en est de même pour les réservoirs de tous types, enfouis ou hors sol (citernes, fosses septiques, bassins, mares, étangs d'ornement, cuves de récupération d'eau de pluie, piscines, ...). Le trop-plein de ces réservoirs est raccordé aux circuits d'évacuation d'eaux usées ou de pluie, selon le cas ;

2° les réseaux d'épandage diffus sont conçus de manière à prendre en compte le risque de mouvements de terrain pouvant toucher les immeubles, infrastructures et impétrants ;

3° les fondations et assises à établir sont conçues de manière à prendre en compte la présence de zones altérées et à parer aux tassements différentiels et aux mouvements de retrait/gonflement du sol, au besoin sur base des résultats d'essais de sols préalables.

4° Autres règles plus contraignantes établies par les administrations.

Nous préconisons d'éviter de créer des axes de ruissellement concentré sur le terrain en modifiant la topographie (axes de ruissellement non présent actuellement). Dans le cas où un système d'infiltration des eaux est prévu sur le terrain (si la perméabilité du sol le permet), celui-ci devra être placé suffisamment loin de toute construction adjacente (le terrain le permettant au vu de la taille) afin de ne pas interférer avec le sol en place au niveau des habitations.

On veillera à asseoir les fondations sur les couches de même compacité pour éviter les risques de désordre dus à des tassements différentiels.

Les résultats donnés dans ce rapport ne sont valables qu'aux endroits des tests réalisés. En conformité avec l'Eurocode 7 (ENV 1997), un contrôle visuel de la nature des couches sous-jacentes aux fondations doit être effectué lors des travaux de terrassements afin de déceler des éventuelles hétérogénéités locales.



Ing. Nadin Franck



Ir. Gillet Grégory

ANNEXE I. Cartes thématiques de la DGARNE sur WalonMap



Cartographie de l'aléa d'inondation (en vigueur) – Série

Aléa d'inondation par débordement de cours d'eau et par ruissellement

Aléa d'inondation par débordement et ruissellement, échelles comprises entre le 1:25.000 et le 1:5000

- | | |
|--|--|
| ☐ 110 : Aléa faible par débordement | ☐ 230 : Aléa élevé par ruissellement |
| ☐ 120 : Aléa moyen par débordement | ☐ 310 : Aléa faible par débordement & ruissellement |
| ☐ 130 : Aléa élevé par débordement | ☐ 320 : Aléa moyen par débordement & ruissellement |
| ☐ 210 : Aléa faible par ruissellement | ☐ 330 : Aléa élevé par débordement & ruissellement |
| ☐ 220 : Aléa moyen par ruissellement | |

Atlas du karst wallon - Série

Sites karstiques

- ☐  Abri-sous-roche
- ☐  Cavité
- ☐  Doline-Dépression
- ☐  Dépression paléokarstique
- ☐  Perte-Chantoir
- ☐  Pseudo-doline
- ☐  Puits houiller
- ☐  Divers

Sites karstiques > 30m en surface

- ☐  Sites karstiques > 30m en surface

Ecoulements souterrains

-  Circulation d'eau souterraine hypothétique (pas de traçage)
-  Circulation d'eau souterraine vérifiée par traçage

Failles

-  Faille

Galeries

-  Galeries

Formations carbonatées

- ☐  Craie du Crétacé
- ☐  Calcaire du Bajocien
- ☐  Calcaire du Sinémurien
- ☐  Calcaire du Dévonien
- ☐  Calcaire du Dévonien sous couverture
- ☐  Schiste et calcaire argileux SVP du Famennien
- ☒  Calcaire du Carbonifère
- ☐  Calcaire du Carbonifère sous couverture
- ☐  Poudingue du Permien

Zones de consultation de la DRIGM - Série

Présence de carrières souterraines



Présence de puits de mines



Présence potentielle d'anciens puits de mines



Présence de minières de fer



Présence de karst



Concessions minières - Série

Nature des gisements concédés (Substances)

- ☐  Concession de mines de houille
- ☐  Concession de mines métalliques
- ☐  Concession de mines de fer
- ☐  Concession de mines d'or
- ☐  Concession de mines de schistes alunifères
- ☐  Concession de mines de graphite
- ☐  Concession de mines de lignite
- ☐  Réservoir souterrain de stockage de gaz naturel

Dans les zones définies, la consultation de la Direction des Risques industriels, géologiques et miniers (DRIGM - geologie@spw.wallonie.be) est recommandée, sinon nécessaire, préalablement à tout projet.

Carte Numérique des Sols de Wallonie - Série

- ☐ Sans sujet
- ☐ Carte non éditée
- ☐ Description :

Remarque(s) : Situé à moins de 100m des dolines d'Henrifay