Mercredi 31 Mai 2023

AG de RockEnGeo.be

Nouvel Hôpital du GHDC à Gilly

Consolidation des sols des bassins à schlamms

Christian SCHROEDER
Hughes LEGRAIN
Hubert GODIN

Clément FORTOT
Bénédicte VAN CROMBRUGGE

Pol VAN DE VYVERE
Vincent VANDEHEYDEN

Le contexte

Chaussée de Ransart
N587
N569
Chaussée de Fleurus (GY)
Gilly
N587
N569
N90
Route de la Basse Sambre
Pironchamps
N568
Farciennes
N571
Pont-de-Loup
N570
R3
R3
N571
Châtelineau
Avenue du Centenaire
N572
Chaussée de Charleroi
Chaussée de Châtelineau
Châtelet
N570
N566
Montignies-sur-Sambre
N576
Route de Châtelet
N576
N975
N573
N922
Coordonnées du pointeur en
Lambert Belge 72
X = 158734 m
Y = 123168 m
SPW (2022)

Géologie

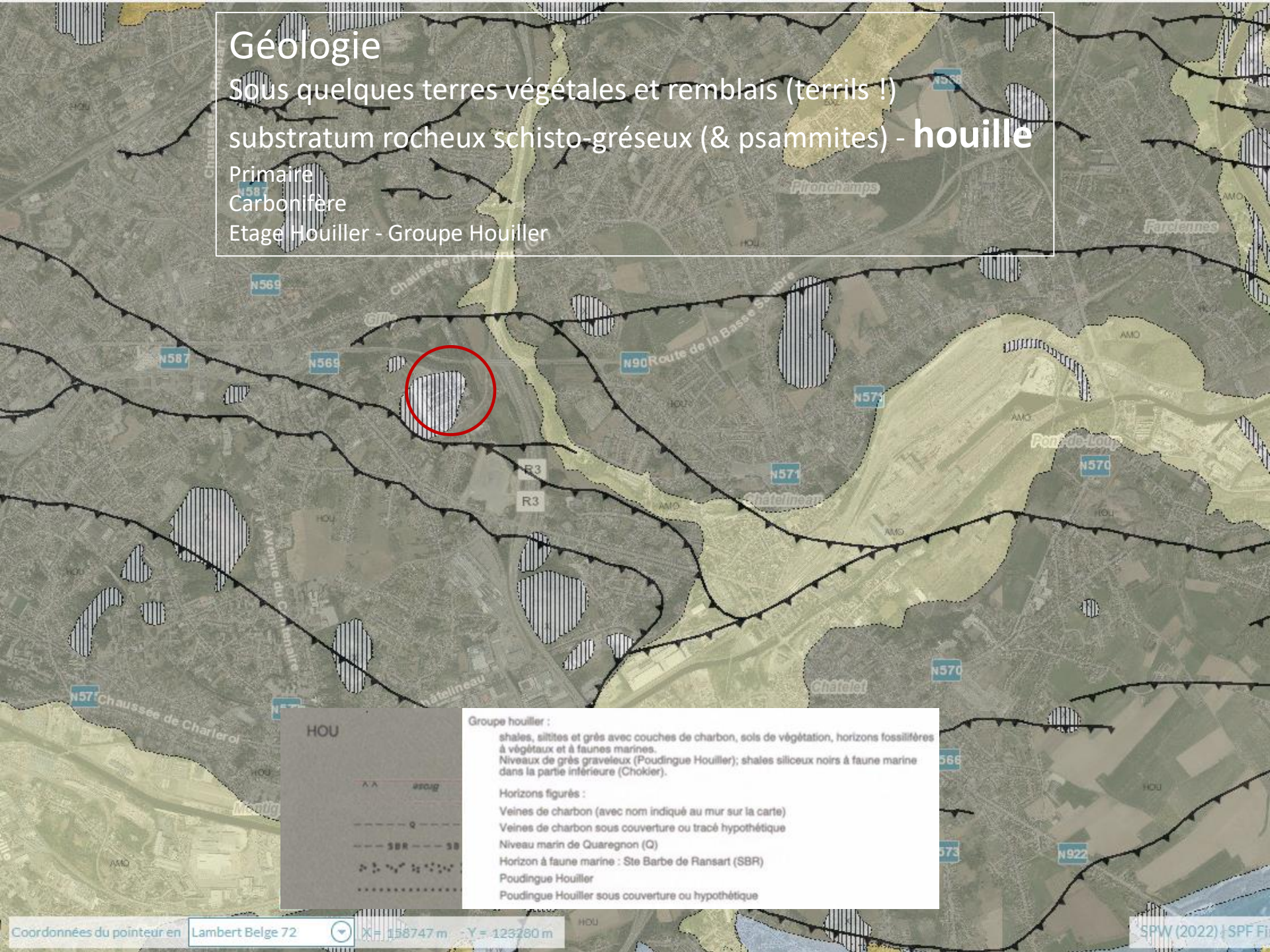
Sous quelques terres végétales et remblais (terrils !)

substratum rocheux schisto-gréseux (& psammites) - **houille**

Primaire

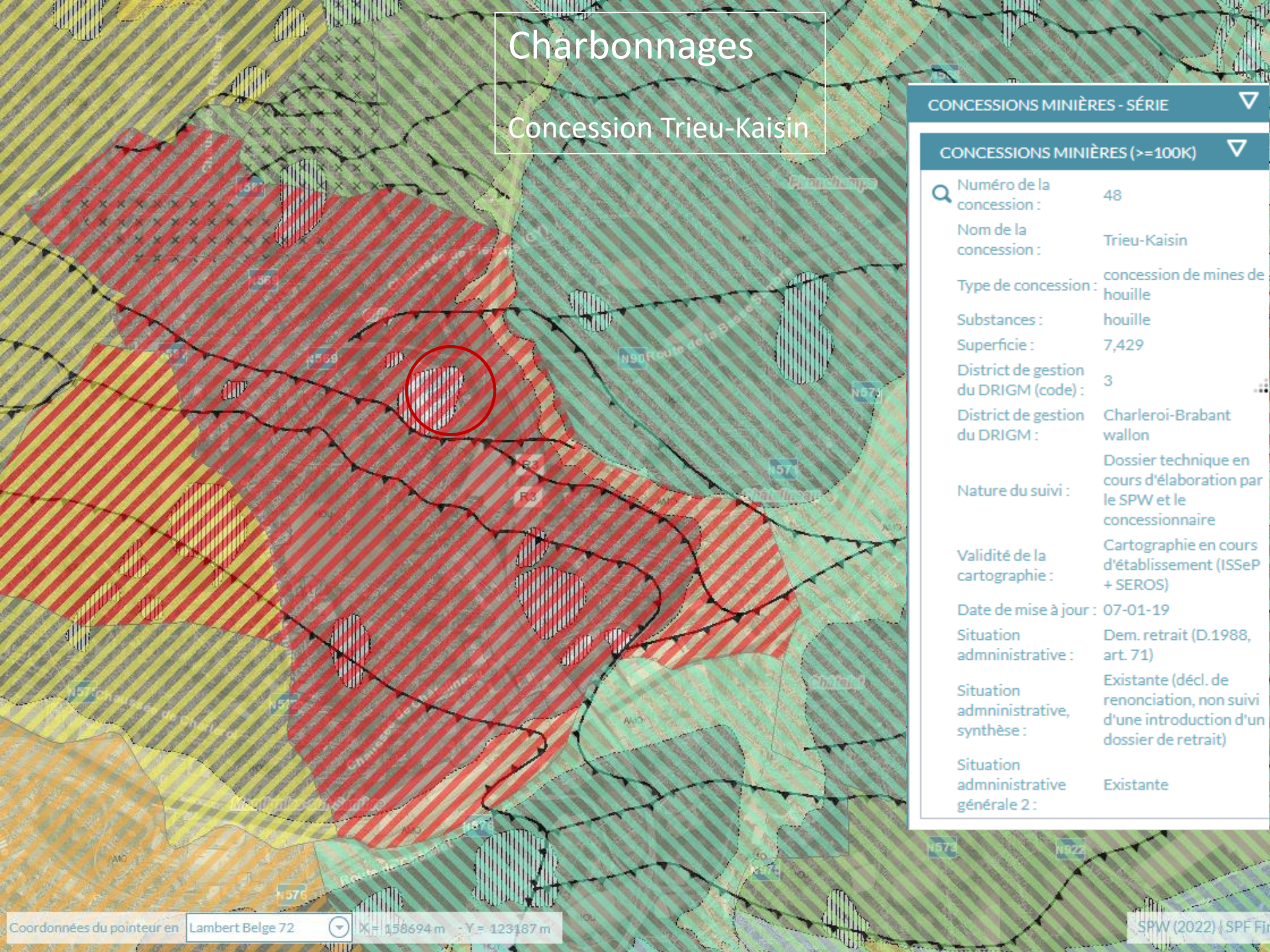
Carbonifère

Etage Houiller - Groupe Houiller



Charbonnages

Concession Trieu-Kaisin



REGION WALLONNE-ARCHIVES MINIERES
Propriété de la Région wallonne
Ne peut être cédé à autrui

Région wallonne-Archives minières
Concession n° 0 4 8 Pièce n°

Vu pour être annexé à l'arrêté royal du 9 août 1854, Mines
N° 2310.
Pr le Ministre des Travaux publics,
L'Inspecteur-général délégué,
Millome

Puits Levant

Plan

d'une partie de la Concession de
Houillère de Forêts et Comble
...ations appelées dans la
...ite Orientale
...tionnée le 29 février 18
...Gaisin de St Ste Barbe

Vu et approuvé
le Président du Conseil d'Adm.
de la Société des Charbonnages
du Bois de Forêts et Comblesmont
à Gilly, le 27 Janvier 1863
Mussonne
Gilly

Vu et vérifié
l'Ingénieur du 2e District des mines
...

Vu, le 10 octobre 1863,
l'Ingénieur en chef
de la 1re Division des mines
J. Gerard

Montigny s/ Sambre

N° 9 PF

Couloir PF

SAMBRE

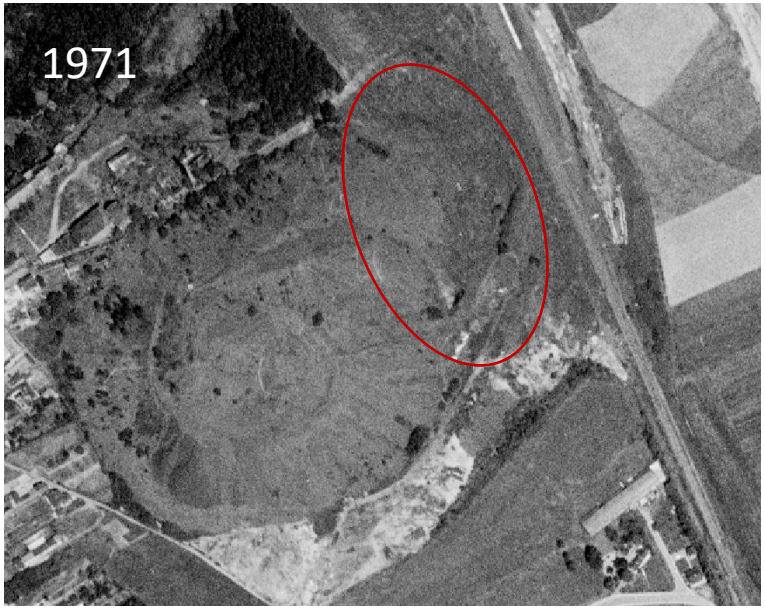
Échelle de 1 à 2000

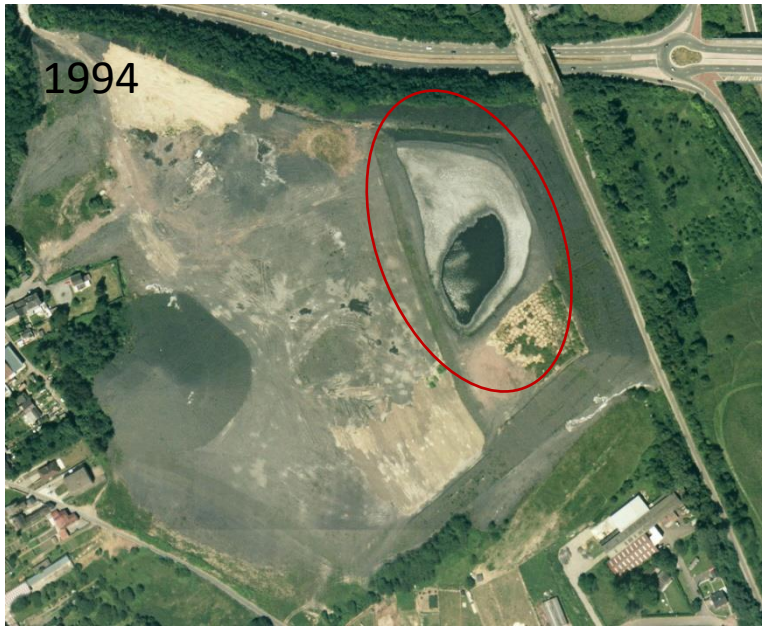
Orifice du Grand Puits

La ligne noire indique l'ancienne limite
La ligne bleue ... la nouvelle

Evolution du terrain dans la zone concernée "bassin à schlamms"

WalOnMap permet le "voyage dans le temps"

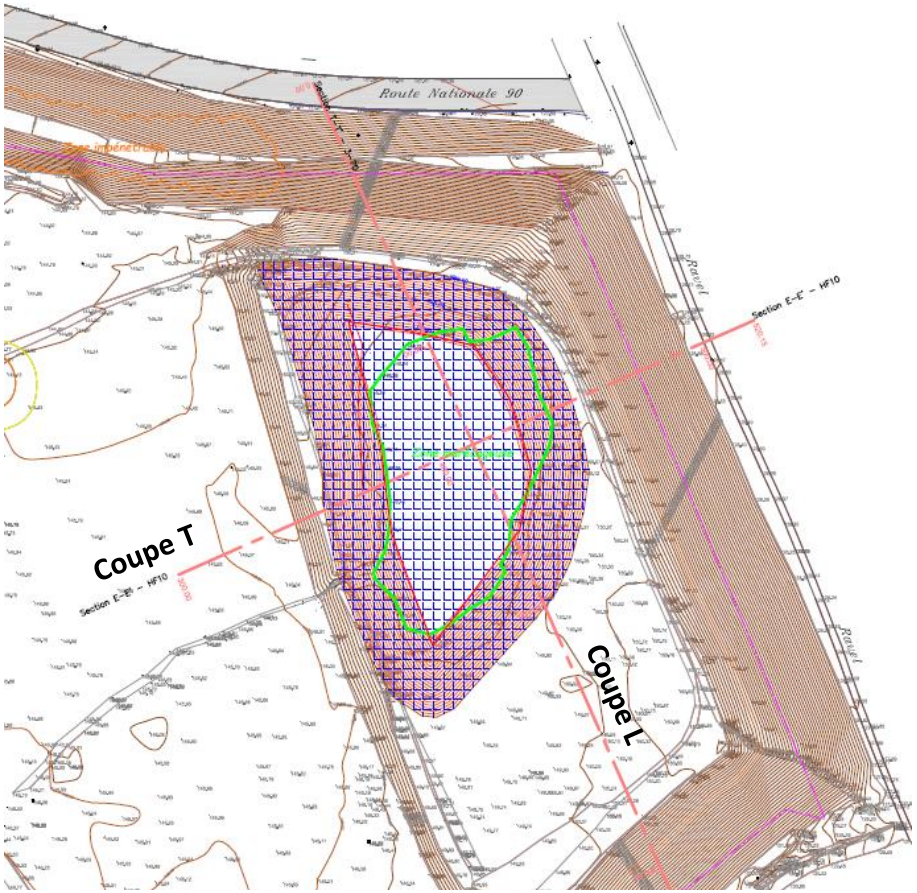


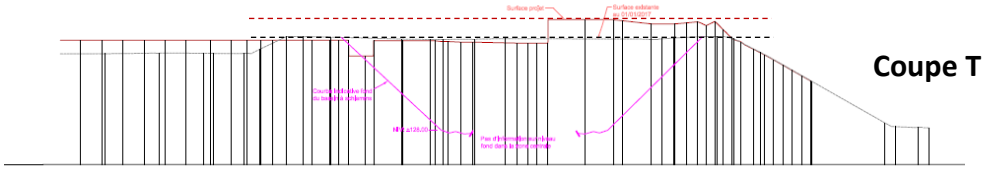


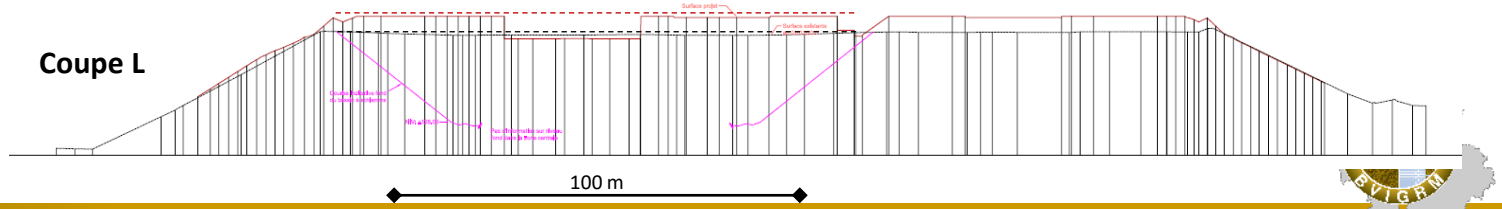
Le projet

Le bassin à schlamms existant, d'une superficie de l'ordre de l'ha, est rempli de boue sur une vingtaine de mètres d'épaisseur.

Le projet envisage de **rehausser le terrain** de quelques **5 m** par la pose d'un remblai sur le bassin.







2018 remblai terminé

suite ... *

* Exposé Bénédicte Van Crombrugge

Le schlamm

(en allemand, Schlamm signifie "boue")

est le résidu fin (< 0.1 mm) des lavages des matériaux extraits.

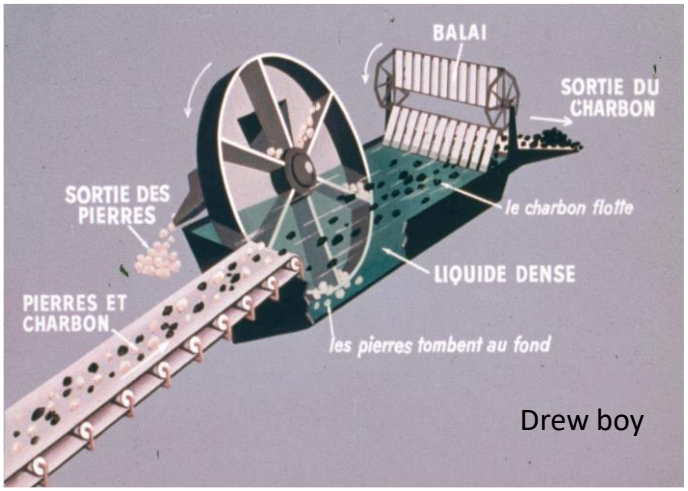
Crédit Spaque (Cuesmes)

"Production" des schlamms

Quelques types de lavoirs

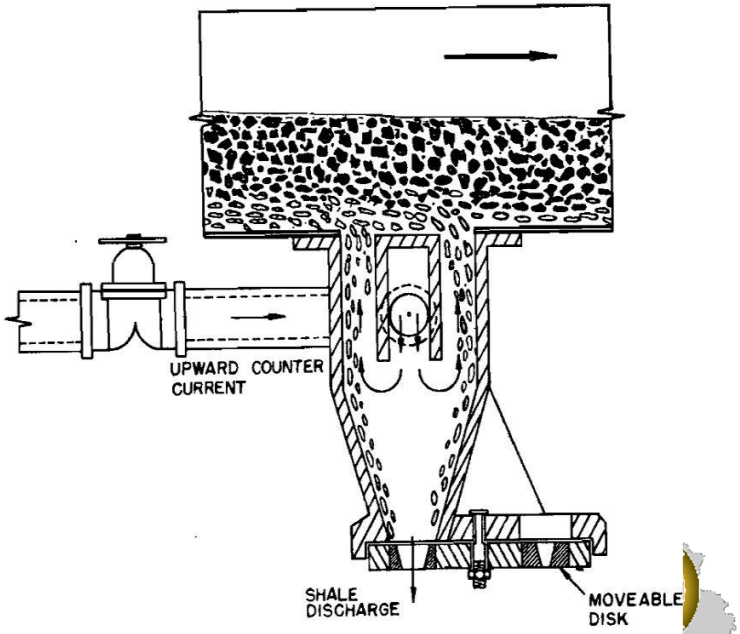
L'exploitation du charbon comporte, en gros, les étapes suivantes :

- extraction dans le fond
- remontée des matériaux extraits (houille et roches)
- triage et lavage pour séparer les stériles (roches) du charbon - rôle des "lavoirs"



Drew boy

Les "lavoirs" sont remplis d'un liquide composé d'un mélange d'eau et d'additif (argile, magnétite...) permettant d'obtenir une densité intermédiaire entre celle du charbon (+/- 1.2 à 1.8) et celle des roches (stériles - +/- 2.5 à 2.7).
Les roches tombent au fond du lavoir et sont envoyées au terril, le charbon flotte et est récupéré (puis rincé).



Le résidu "schlamm", boue noire constituée de fines poussières de charbon, d'eau (et éventuellement additifs) est stocké dans des "bassins" à ciel ouvert où il décante et sèche (un petit peu).

Avenue Gouverneur Cornez, 4
à 7000 MONS
INISMa
member of EMRA

Quelques caractéristiques d'identification des schlamms

Les deux échantillons de schlamms analysés par l'INISMa montrent des courbes granulométriques similaires à celles du FCR (moyenne) données par la littérature, avec davantage de fines

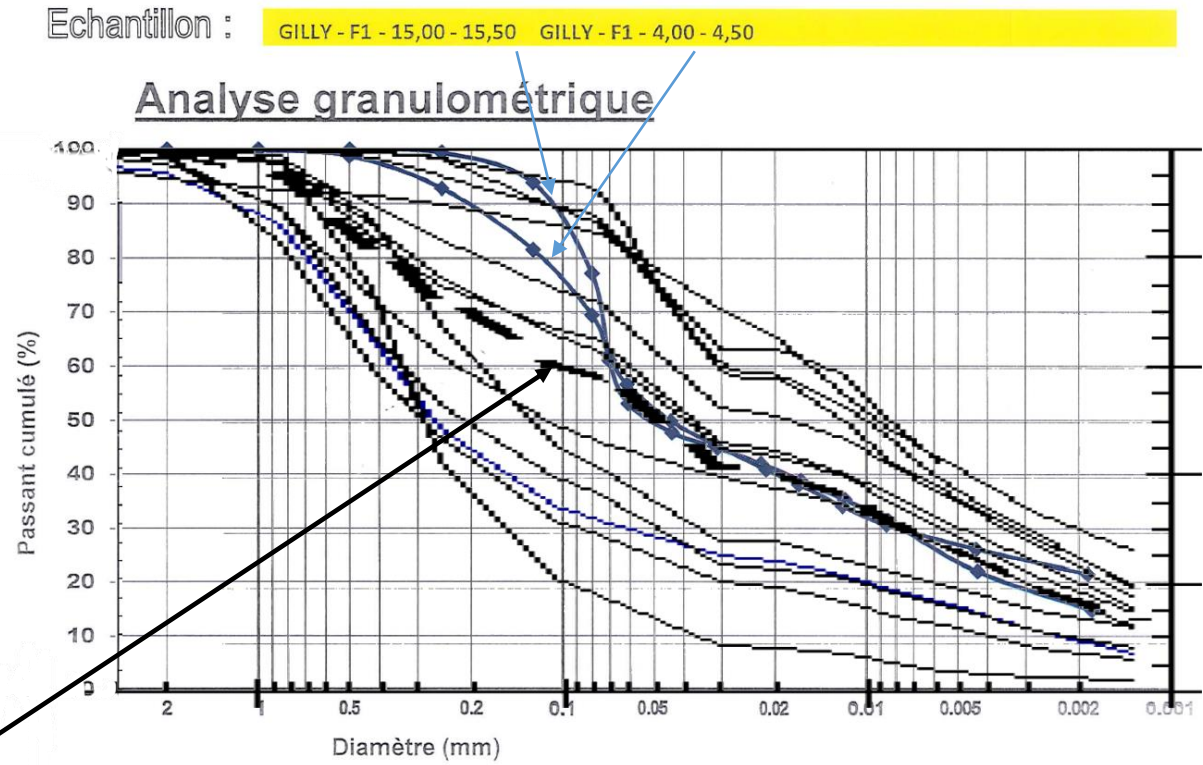
Pensylvanian **F**ine **C**oal **R**efuse

Table 4. Summary of FCR sieve analysis.

Particle size or % passing	Average
D_{10}	0.010 (mm)
D_{30}	0.037 (mm)
D_{50}	0.127 (mm)
D_{60}	0.196 (mm)
Passing sieve 200 (0.075 mm)	57.7 (%)

INISMa (2 mesures)

< 0.001 et 0.002 mm
0.007 et 0.008 mm
0.040 et 0.050 mm
0.070 et 0.070 mm



Y.A. Hegazy, A.G. Cushing, & C.J. Lewis 2004
Physical, mechanical, and hydraulic properties of coal refuse for slurry impoundment design

average

Table 1. Summary of FCR unit weight and specific gravity.

Property	Average	Standard deviation	Coefficient of variation
γ_T	13.0 (kN/m^3)	1.24	0.096
γ_D	9.0 (kN/m^3)	1.46	0.162
G_s	1.52	0.25	0.165

Table 3. Summary of FCR Atterberg limits and water content.

property	Average %	Standard deviation	Coefficient of variation
LL	31.2	5.2	0.17
PL	20.1	3.4	0.17
PI	11.2	3.1	0.28
w	33.0	11.5	0.35

Les poids volumiques des schlamms sont :

G_s = **1.52** (charbon) γ_s = **1.52** kN/m³

γ_d = 0.9 kN/m³

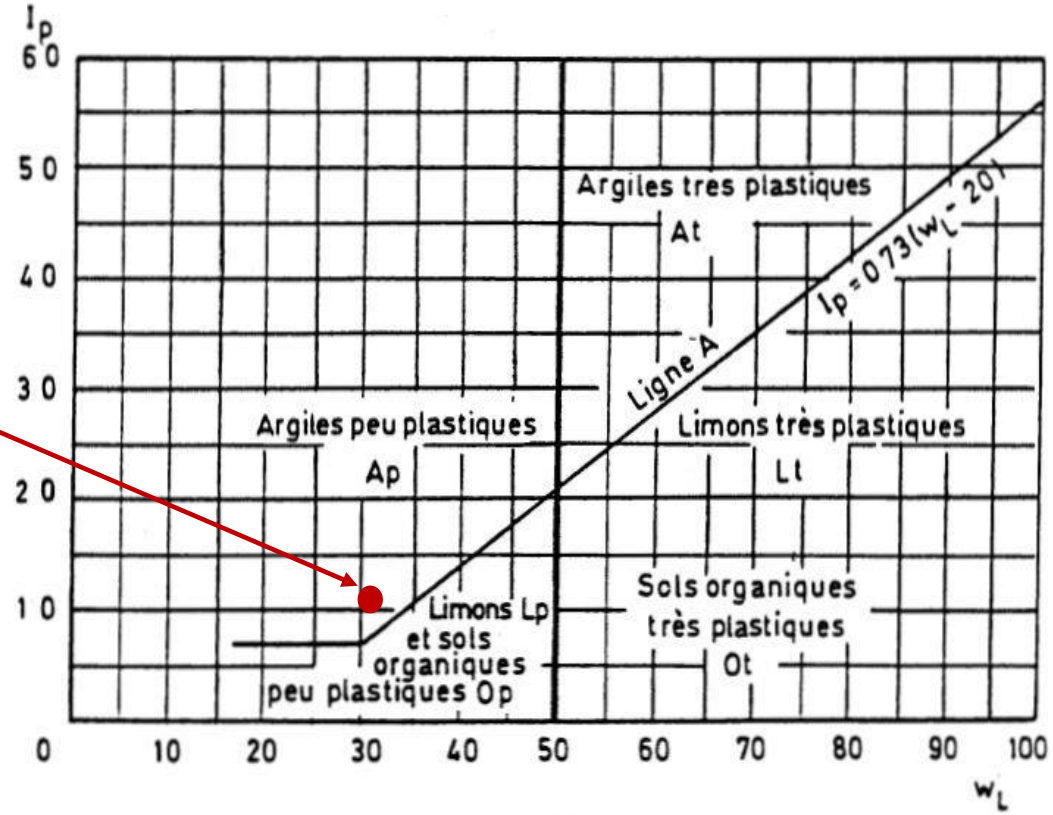
La teneur en eau est relativement élevée

w = 33 % (Gilly : 30.9 en moyenne)

et la perméabilité faible (10^{-8} à 10^{-7} m/s)

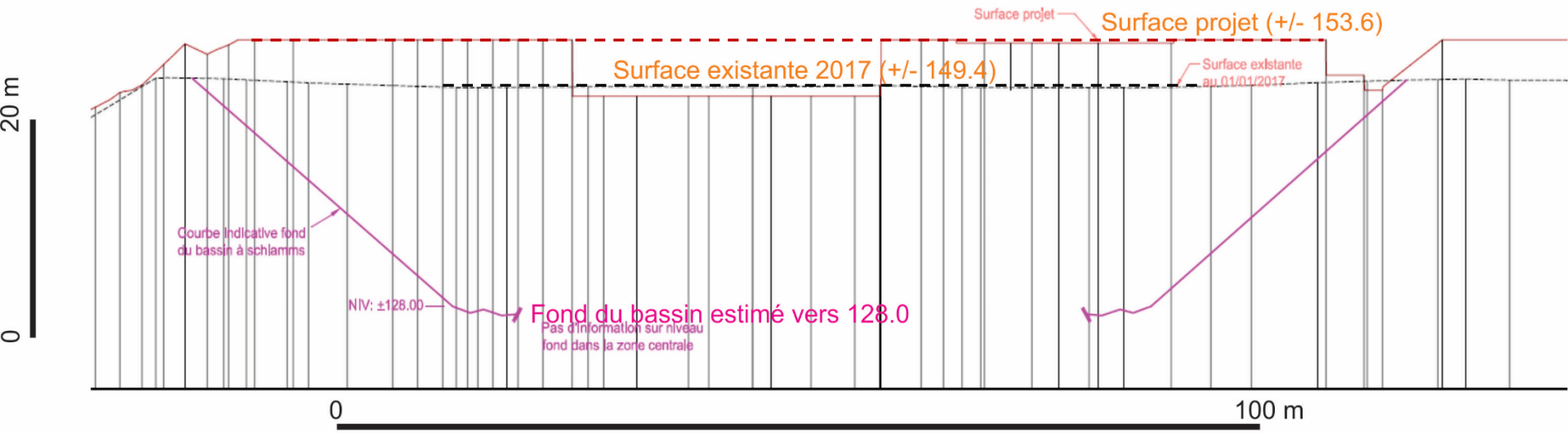
Dans le diagramme de Casagrande, les schlamms figurent dans la zone des argiles et limons peu plastiques.

Les schlamms ne sont pas organiques.

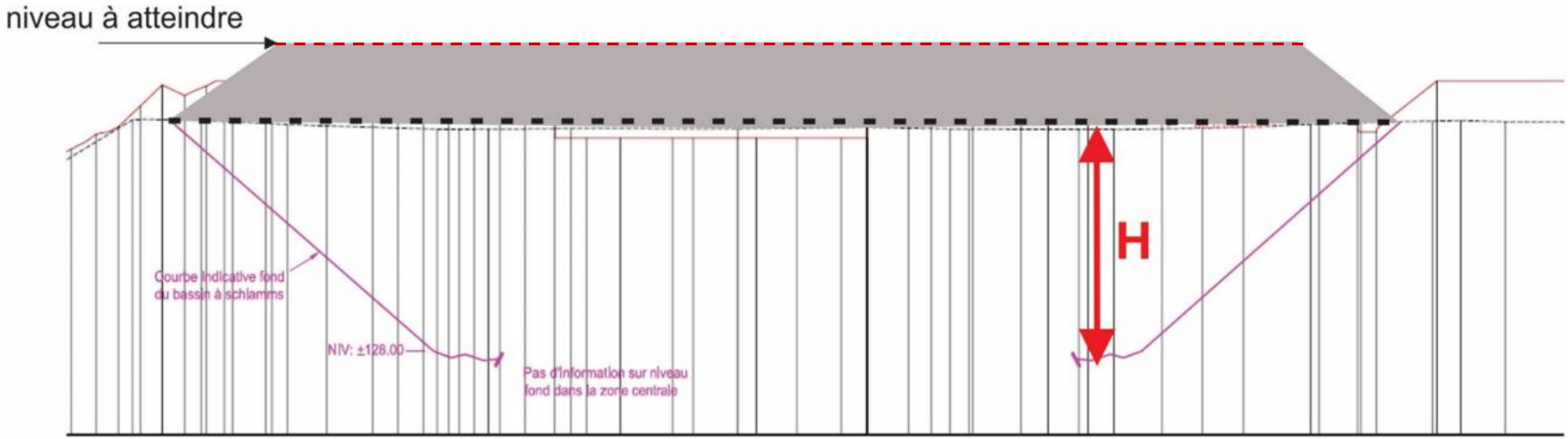


Quel est le problème *géotechnique* à résoudre ?

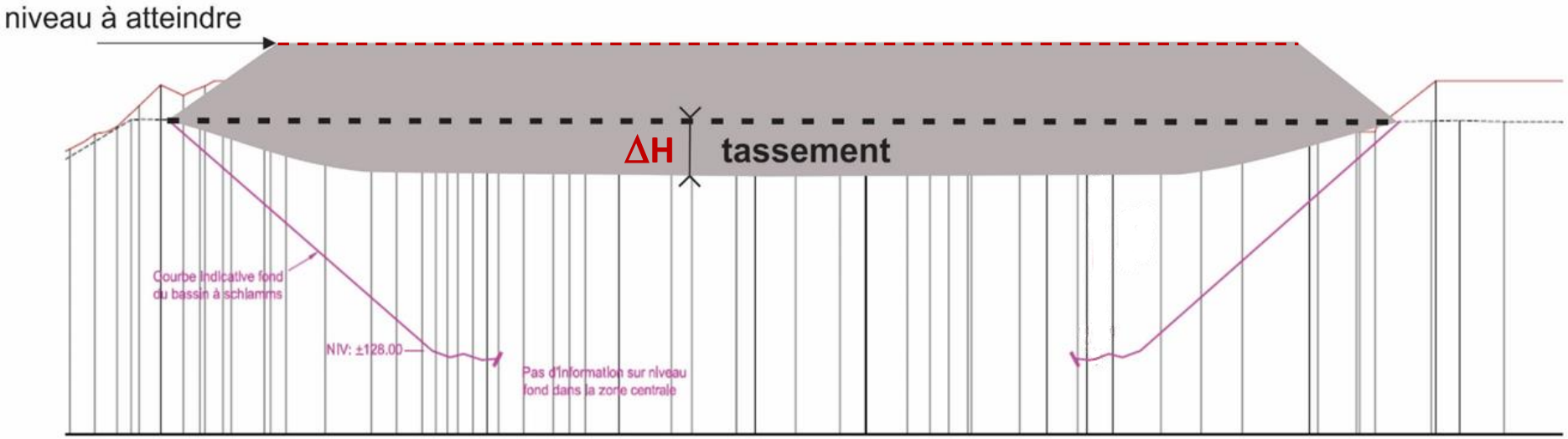
On a un bassin remplis de schlamms



Un remblai (+/- 5 m d'épaisseur) va charger la couche de schlamms (+/- 20 m d'épaisseur **H**)



Les schlamms sont compressibles et vont donc se compacter sous l'effet de la charge ("**consolidation**")



Il faut donc déterminer

- l'amplitude totale, **ΔH**, du tassement (supplément d'épaisseur de remblai à prévoir)
- la durée nécessaire pour que la "**consolidation**" soit terminée, en 1 an maximum

La **consolidation** est due uniquement à **l'expulsion de l'eau** contenue dans les schlamms.

Deux éléments sont à déterminer, pratiquement indépendamment l'un de l'autre :

- l'**amplitude** du tassement total ΔH de la couche d'épaisseur H.
  Dépend de la quantité d'eau présente, à évacuer, et de la raideur du squelette

  Paramètre caractéristique du sol (adimensionnel) :
  C_c: indice de compression (log)
  ou son équivalent
  C : constante de compressibilité (ln)

$$C = (H / \Delta H) * \mathbf{ln}\ (\sigma'_{final} / \sigma'_{initial})$$

- la **durée** nécessaire pour que la consolidation soit terminée.
  Dépend de la vitesse à laquelle l'eau peut être expulsée donc de la perméabilité du matériau et de la ***longueur du chemin de drainage*** (ici, a priori, drainage par le haut seul possible).
  L'évolution de la consolidation s'exprime par le **degré de consolidation**, U, variant de 0 à 1.

Paramètre caractéristique du sol :
c_v : coefficient de consolidation (m²/s)

Le degré de consolidation U au temps t est déduit du facteur temps T_v calculé à partir de c_v

$$U = \left(\frac{T_v^3}{T_v^3 + 0{,}5} \right)^{1/6}$$

$$T_v = \frac{c_v t}{H^2_{dr}}$$

!! ***H*** est le chemin *le plus court* pour la sortie de l'eau. Dans le cas d'un drainage par une seule face, H = épaisseur de la couche ; si drainage par les deux faces, H = épaisseur / 2 !!

Pour déterminer ces deux paramètres :

- essais in situ (CPT) et essais de labo (oedomètres)
- campagnes INISMa (2011 et 2017) et OREx (2016)

Valeurs de C à partir des CPT

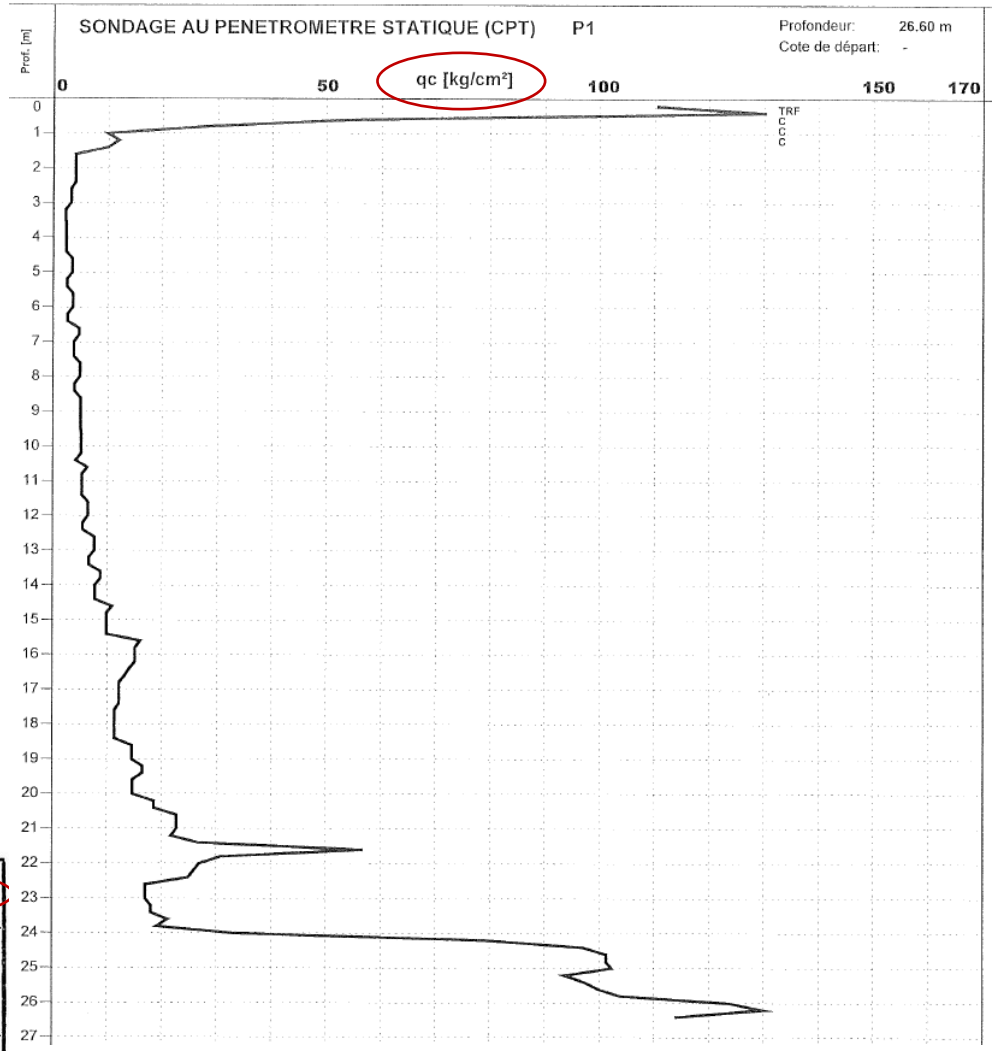
Les 2 essais CPT réalisés par l'INISMa dans les schlamms ont permis de déterminer la valeur de C via la formule de Buisman/Sanglerat

$$C = \alpha \frac{q_c}{\sigma'_0}$$

q_c : résistance à la pointe
σ'_0 : contrainte effective,
due au poids propre,
à la profondeur où est mesurée q_c.

α varie de 1 à 8 en fonction de q_c (r_p) pour des "argiles peu plastiques" (CL), auxquelles, selon la littérature, les schlamms peuvent être assimilés pour la plasticité.

argile peu plastique - CL	$r_p < 7$ bars $7 < r_p < 20$ bars $r_p > 20$ bars	$q_c < 7$ bars α = 5.5 $q_c < 20$ bars α = 3.5 $q_c >= 20$ bars α = 1.5	$3 < \alpha < 8$ $2 < \alpha < 5$ $1 < \alpha < 2$
Limon peu plastique — ML	$r_p < 20$ bars $r_p > 20$ bars		$3 < \alpha < 6$ $1 < \alpha < 3$
Argile très plastique — CH Limon très plastique — MH	$r_p < 20$ bars		$2 < \alpha < 6$
Limon fortement organique — OL	$r_p < 12$ bars		$2 < \alpha < 8$
Tourbe et argile fortement organique T OH	$r_p < 7$ bars	$50\% < w < 100\%$ $100\% < w < 200\%$ $w > 200\%$	$1,5 < \alpha < 4$ $1 < \alpha < 1,5$ $0,4 < \alpha < 1$
Craie	$20 < r_p < 30$ bars $r_p > 30$ bars		$2 < \alpha < 4$ $1,5 < \alpha < 3$
Sable	$r_p < 50$ bars $r_p > 100$ bars		$\alpha = 2$ $\alpha = 1,5$



La valeur de C a été déduite tous les 20 cm, avec adaptation de α en fonction de q_c et σ'_0 .

Pour le calcul du tassement total, un C moyen est pris pour chaque mètre de terrain.

Valeurs de C mètre par mètre

(exemple des valeurs de 0.2 à 6.2 m)

	Niveau d'application	C moyen par mètre	
Profondeur	valeurs	CPT1	CPT2
0.2	0.5	1708.3	572.0
0.4			
0.6			
0.8			
1.0			
1.2	1.5	107.8	156.4
1.4			
1.6			
1.8			
2.0			
2.2	2.5	42.5	56.3
2.4			
2.6			
2.8			
3.0			
3.2	3.5	19.4	29.6
3.4			
3.6			
3.8			
4.0			
4.2	4.5	19.9	24.3
4.4			
4.6			
4.8			
5.0			
5.2	5.5	17.1	20.5
5.4			
5.6			
5.8			
6.0			
6.2	6.5	17.0	18.9

Valeurs de C utilisées pour le calcul de ΔH (0 - 26 m)

Niveau d'application	C moyen des CPT 1 et 2	C moyen par mètre			C moyen des CPT 1 et 2
	pour calcul de ΔH	CPT1	CPT2		pour calcul de ΔH
	valeurs				calcul
0.5	1140.1	1708.3	572.0		1140.1
1.5	132.1	107.8	156.4		132.1
2.5	49.4	42.5	56.3		49.4
3.5	24.5	19.4	29.6		24.5
4.5	22.1	19.9	24.3		22.1
5.5	18.8	17.1	20.5		18.8
6.5	17.9	17.0	18.9		17.9
7.5	17.4	17.7	17.0		17.4
8.5	16.0	16.2	15.7		16.0
9.5	17.8	16.2	19.4		17.8
10.5	16.2	15.1	17.4		16.2
11.5	15.4	15.7	15.0		15.4
12.5	12.8	12.3	13.3		12.8
13.5	12.0	13.1	10.9		12.0
14.5	12.0	12.2	11.7		12.0
15.5	15.1	16.3	13.9		15.1
16.5	14.9	15.6	14.1		14.9
17.5	13.9	12.8	15.0		13.9
18.5	14.7	13.7	15.6		14.7
19.5	16.1	15.2	16.9		16.1
20.5	12.2	12.6	11.8		12.2
21.5	12.6	12.6	12.7		12.6
22.5	12.6	12.5	12.7		12.6
23.5	11.8	12.9	10.7		11.8
24.5	26.6	32.6	20.7		26.6
25.5	28.5	33.7	23.3		28.5
26.2	47.6	38.6	56.7		47.6

Détermination de C et c_v en laboratoire

4 essais oedométriques (de 4 à 16 m) réalisés par l'INISMa

C moyen pour σ' max : 23
c_v moyen : 5.5 10^{-7} m²/s

INISMa
member of EMRA
Géotechnique et Environnement!
www.bcrc.be

GILLY	Dossier :	31,760
Essais de laboratoire	Date :	août-17

ESSAI OEDOMETRIQUE

Basé sur norme NBN CEN ISO/TS 17892-5

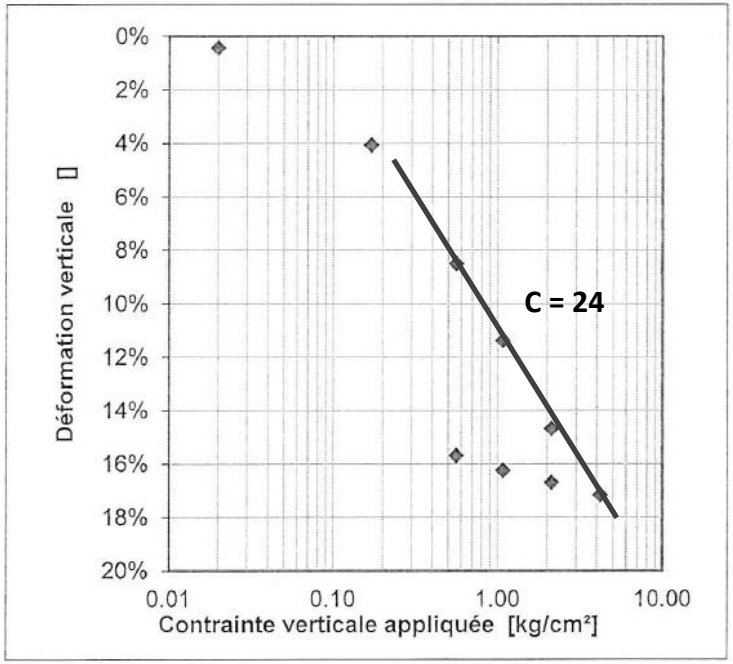
ECH : F1 - 4,00 - 4,50

Nature : Schlamm

Eprouvette (avant essai)	
Ø [mm]	70
H [mm]	19

w [%]	32.2	γ [kg/m³]	1618
γ_s [kg/m³]	2213.8	γ_d [kg/m³]	1223

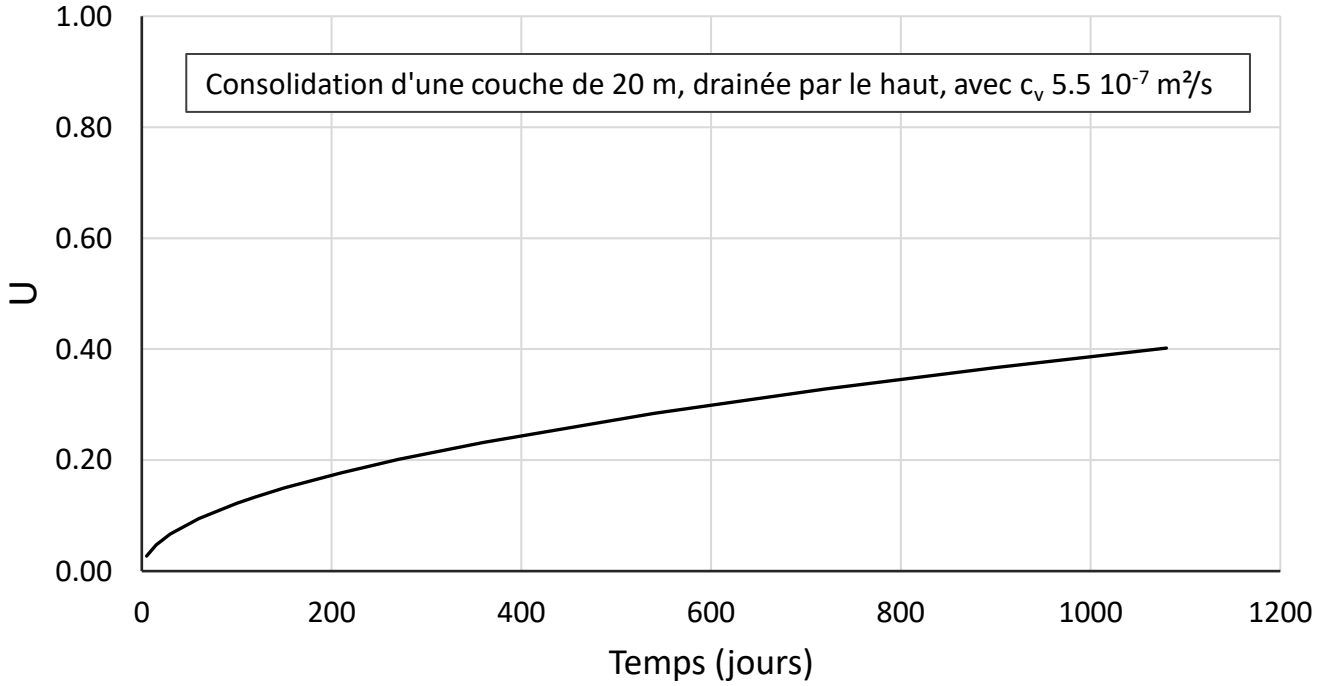
σ_v [kg/cm²]	/ [kPa]	ΔH / H [%]	e []	C - A []	Cc - Cs []	E_{oedo} [kPa]	Cv (*) [m²/s]	k (*) [m/s]
0.00	0	0.00%	0.81	-	-	-	-	-
0.02	2	0.42%	0.80	59	0.07	404		
0.17	17	4.06%	0.74	27	0.16	862		
0.56	56	8.50%	0.66	23	0.18	1778		
1.08	108	11.37%	0.60	20	0.20	3087		
2.12	212	14.67%	0.54	27	0.15	8196		
4.20	420	17.16%	0.50	148	0.03	44056		
2.12	212	16.70%	0.51	149	0.03	22540		
1.08	108	16.25%	0.52	117	0.04	9101		
0.56	56	15.69%	0.53					



Avec ces valeurs de C, le calcul du tassement total de 20 m de schlamms sous l'effet d'un remblai de 5 m d'épaisseur et de poids volumique 18 kN/m^3 est de l'ordre de 0.6 m, voire du mètre, compte tenu des incertitudes dues à l'estimation du coefficient α, du poids du remblai... et de l'épaisseur de la couche de schlamms...

Ce tassement implique **l'expulsion de quelques 6000 m³** d'eau interstitielle.

En ce qui concerne la durée du tassement, en supposant un drainage par le haut, on constate qu'au bout de 3 ans, on n'a encore que 40 % de consolidation (U = 0.40).



Il faut donc accélérer la consolidation ⟶ drains verticaux (Ménard)*.

* Exposé Hubert Godin

Consolidation radiale (horizontale)

Dans le cas de drains verticaux, le chemin de drainage principal est horizontal (radial) (et s'ajoute au drainage vertical).

La longueur de drainage horizontal tient compte de :

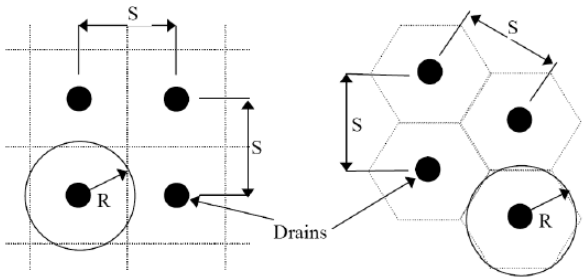
- diamètre du drain lui-même : $d = 2\ r_w$
- diamètre effectif (diamètre d'influence) du drain
  $D = d_e = 2\ R$

Le paramètre c_v est remplacé ici par le coefficient de consolidation horizontal **c_h** (ou c_r)
(on prend souvent $c_h = 1.5$ à $2\ c_v$)
qui permet de calculer le Facteur temps horizontal **T_h** au temps t et d'en déduire le degré de consolidation horizontale U_h à ce temps t.

$R = d_e\ /2$ **D = 1.13 S (S) ou 1.05 S (T)**

$R = 0.546\ S$ for drains installed in a square pattern

$R = 0.525\ S$ for drains installed in a triangular pattern



R=0.546S
Square pattern

R=0.525S
Triangular pattern

In fine, le degré de consolidation dû aux deux drainages vaut **$U_{v,r}$** :

$$U_{v,r} = 1 - (1 - U_r)(1 - U_v)$$

Exposé Hubert Godin

Suivi des tassements - calage du modèle

Un modèle (feuille de calcul basée sur les équations ci-contre) simule l'évolution du tassement en fonction du temps.

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2-1}\ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2}, \text{et} \ldots n = \frac{D}{d}$$

$$Tv = \frac{Cv * t}{H^2}$$

$$Uv = \left(1 + \frac{1}{2\,Tv^3}\right)^{\frac{-1}{6}}$$

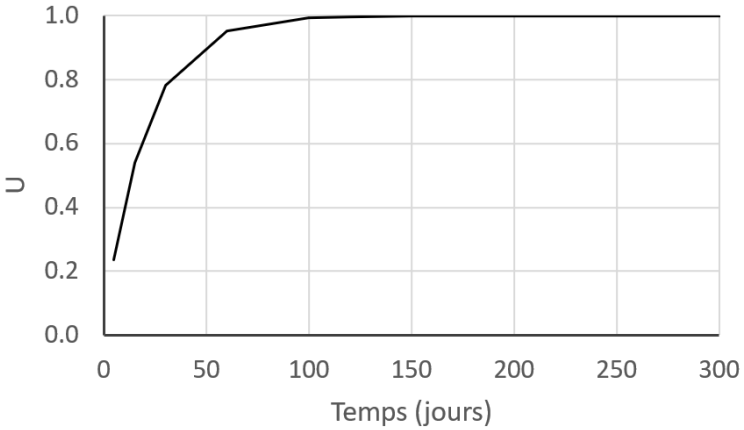
$$Ur = 1 - e^{\left(\frac{-8\,Cr * t}{D^2 F(n)}\right)}$$

n = R/d
rayon d'influence/rayon du drain

Les optimisations faites par Ménard conduisent à une solution basée sur (e.a.) les paramètres suivants :

- maille des drains verticaux = 2 m x 2 m
- coefficients de consolidation :
  $c_v = 5.57\ 10^{-7}\ m^2/s \quad c_r = 2\ c_v = 1.1\ 10^{-6}\ m/s^2$

Avec ces hypothèses, le degré de consolidation, U atteint la valeur 1 au bout de 4 mois (120 jours).



L'estimation est faite à partir de données assez peu nombreuses, même si les ordres de grandeurs sont vraisemblablement corrects, mais il reste à confirmer et affiner les paramètres, surtout c_v .

L'évolution des valeurs permettant le calage, est faite par mesures profilométriques périodiques, réalisées par l'INISma.

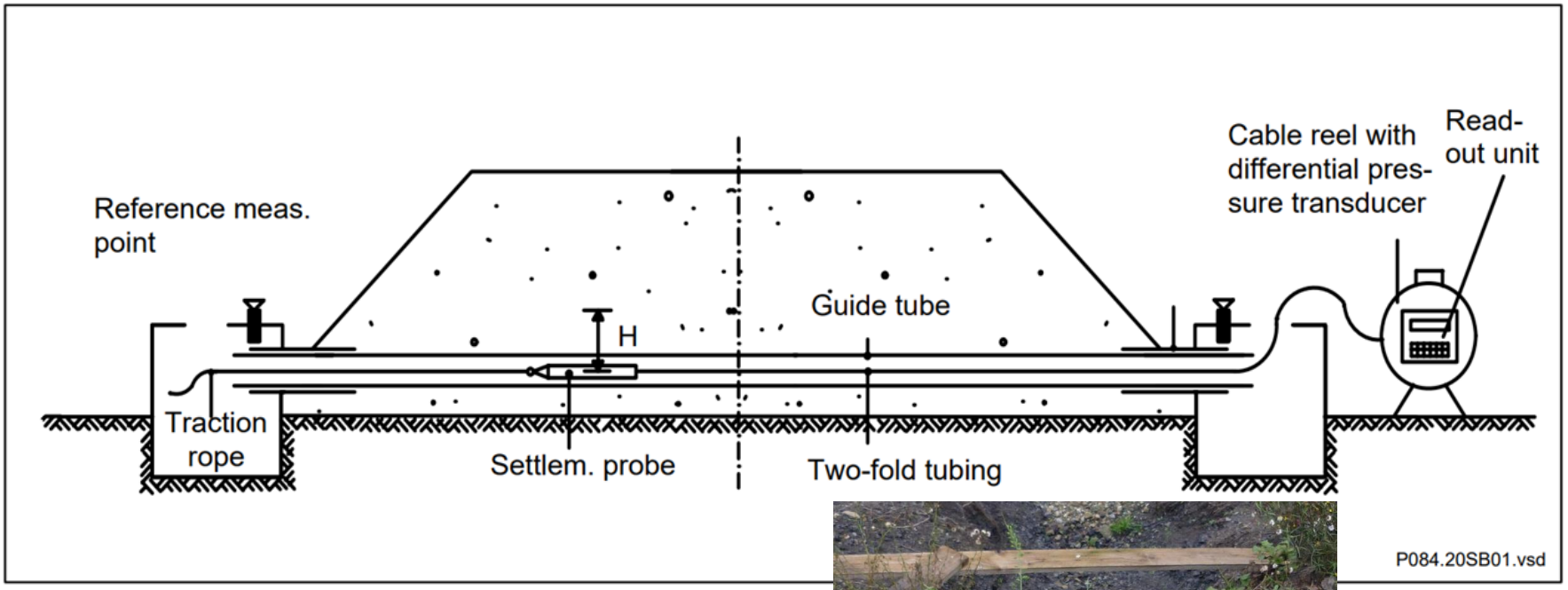
Mesures profilométriques : Profilométrie hydrostatique

Transducteur différentiel et câble de mesure avec sonde.

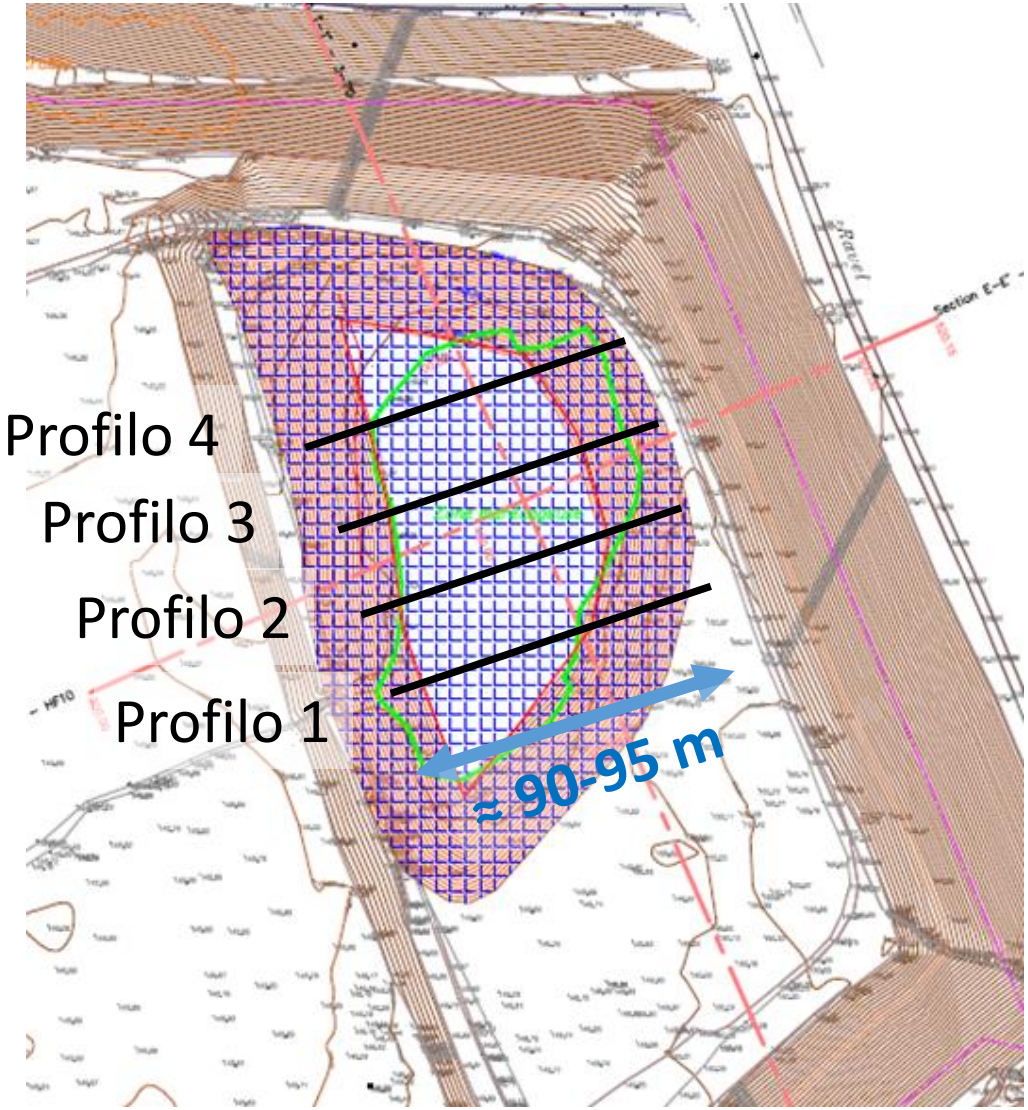
Le câble de mesure contient un tube double de polyamide gainé de polyéthylène et est marqué à chaque mètre et étiquetés tous les 5 mètres.

L'un de ces tubes est rempli d'eau, l'autre d'air comprimé à 1-1,5 bars. Une interface de diaphragme en caoutchouc est installée dans la sonde à l'extrémité du câble reliant les deux systèmes.

Le changement de la pression d'eau hydrostatique - correspondant à la différence de hauteur entre la sonde et le repère de référence – est enregistré par le capteur de pression différentielle et est affiché directement en mètres.


Reference meas.
point
Cable reel with
differential pres-
sure transducer
Read-
out unit
Guide tube
H
Traction
rope
Settlem. probe
Two-fold tubing
P084.20SB01.vsd

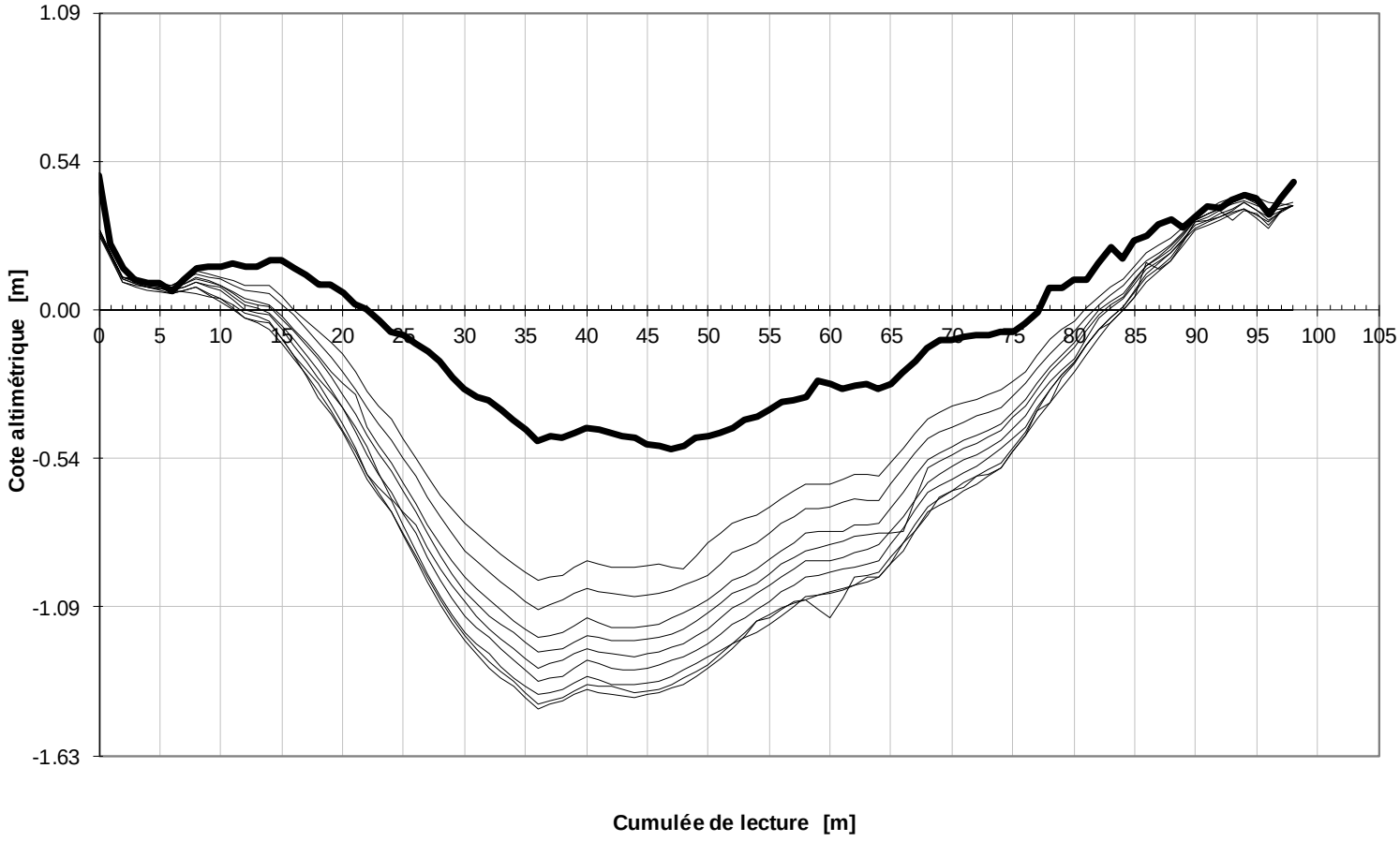
Implantation des profilomètres



DOSSIER N° : 33,257

GILLY - Bassin à Schlams
Profilomètre n°2
MESURES PROFILOMETRIQUES

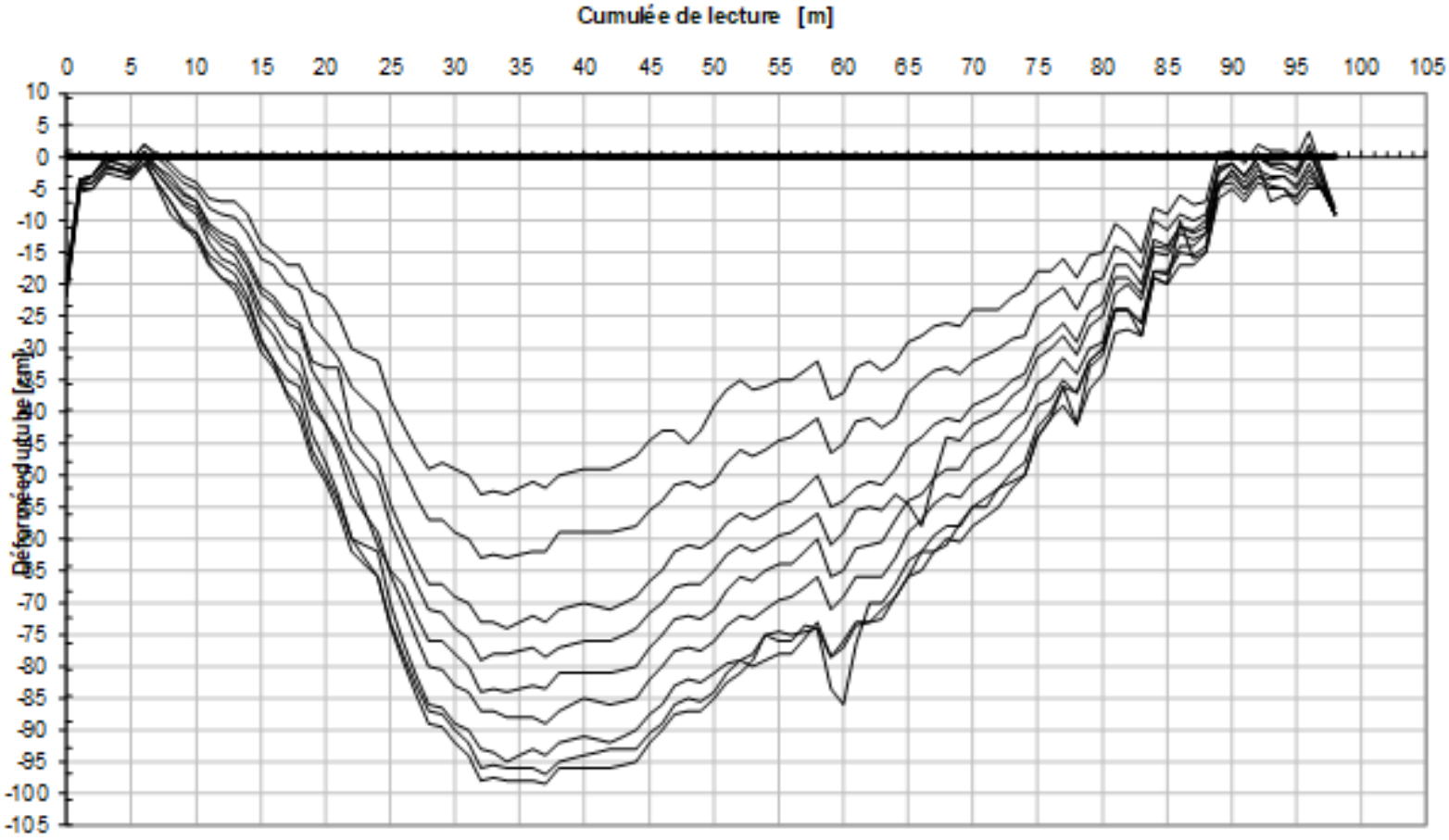
Dernière mesure : M09 , prise le 07-11-18

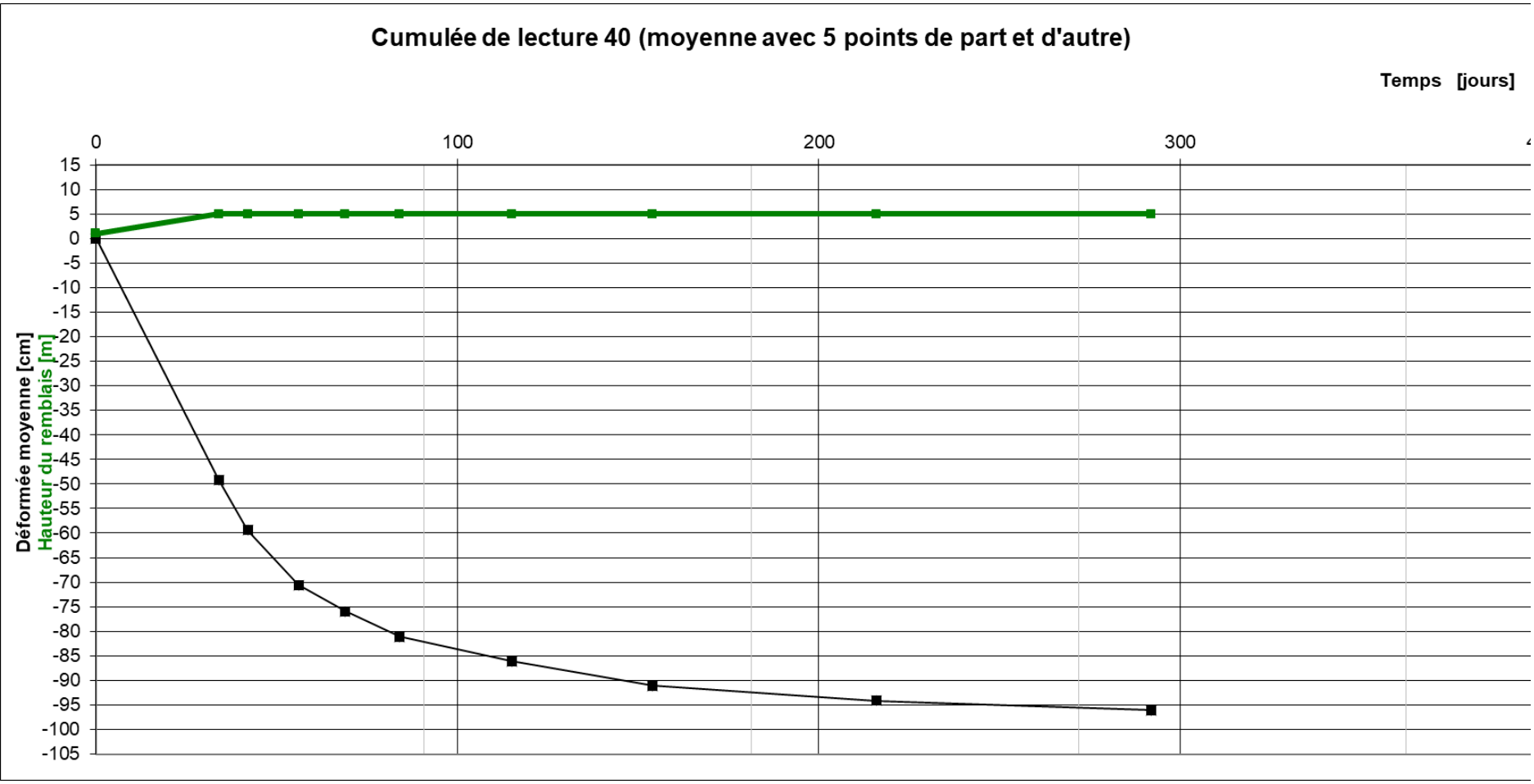


DOSSIER N° : 33.257

GILLY - Bassin à schlams
Profilomètre 2
MESURES PROFILOMETRIQUES

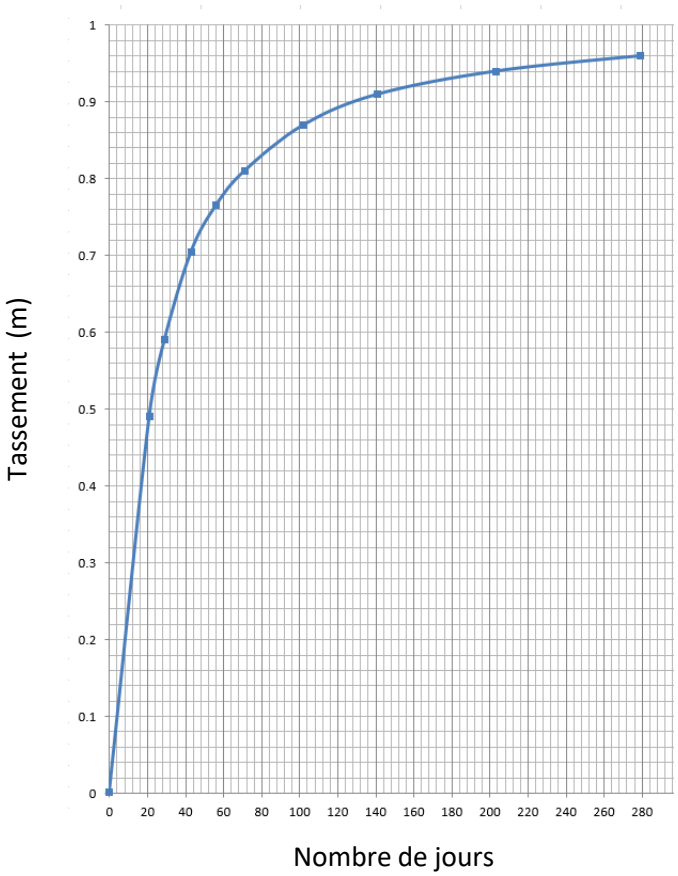
Dernière mesure : M09 , prise le 07-11-18




Cumulée de lecture 40 (moyenne avec 5 points de part et d'autre)
Temps [jours]
0
100
200
300
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
-30
-35
-40
-45
-50
-55
-60
-65
-70
-75
-80
-85
-90
-95
-100
-105
Déformée moyenne [cm]
Hauteur du remblais [m]

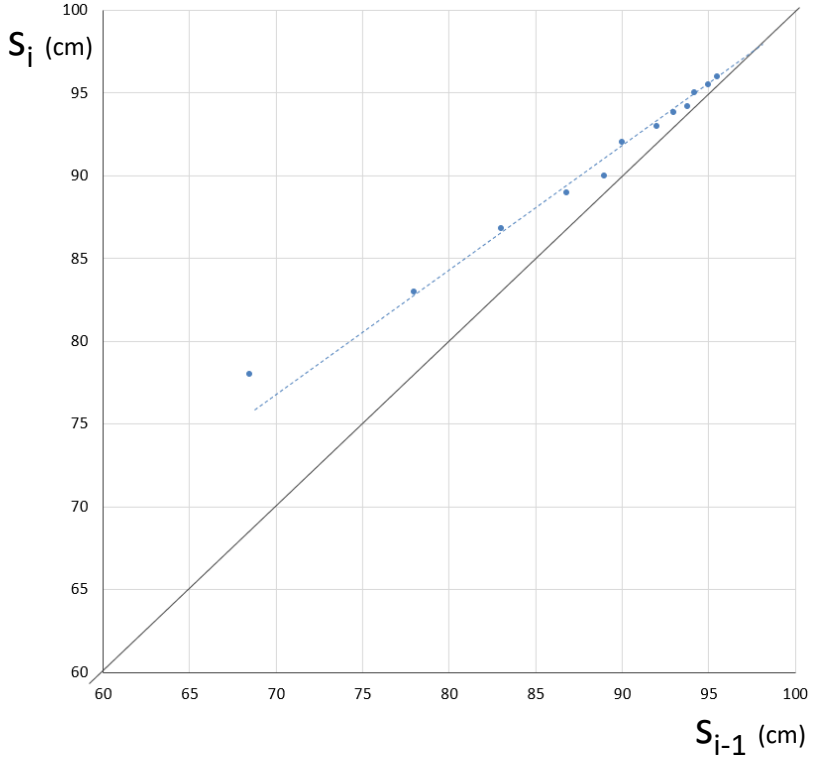
Suivi des tassements - prévisions - calage du modèle

Evolution du tassement en P2



Prévision du tassement final (98 cm pour P2) par le méthode d'Asaoka

Ajustement manuel (Bézier) - vérifié Baguelin



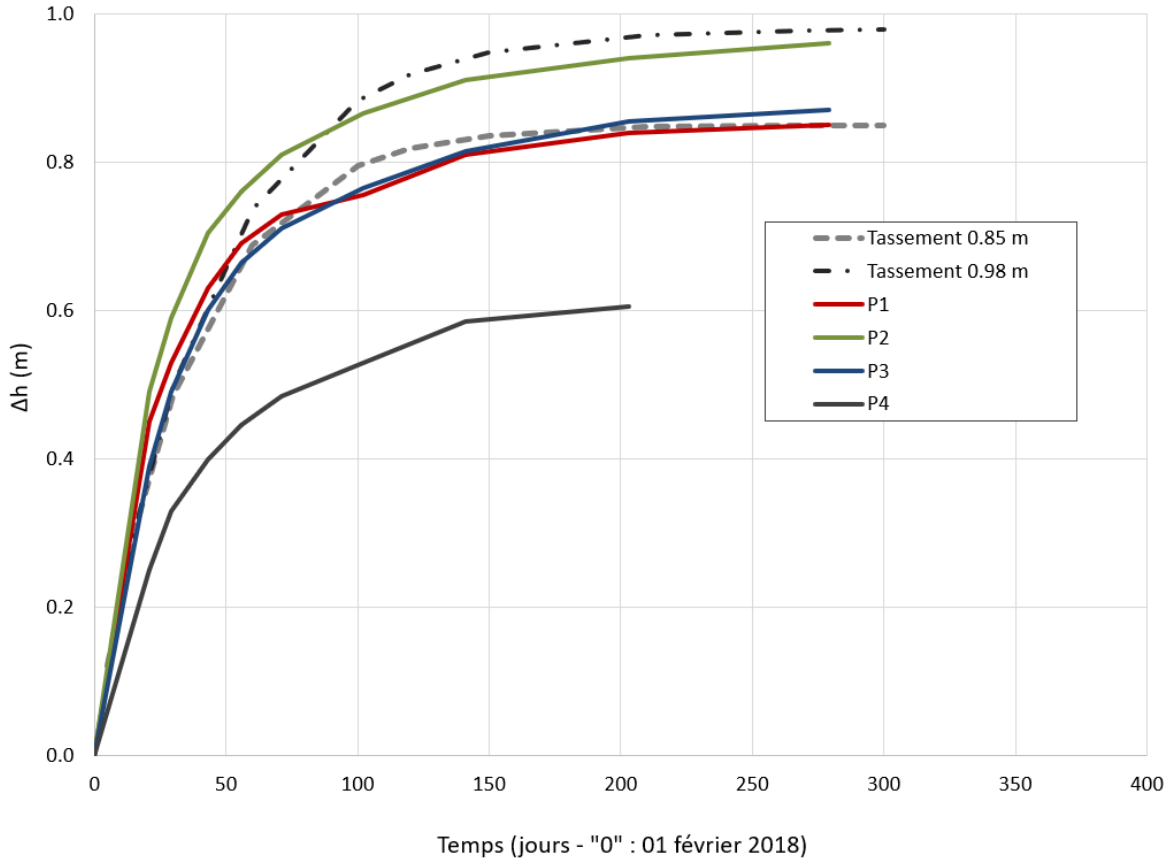
difficulté : évaluation de l'instant "0"

Calage final

Calculs avec
- Maille 2 m
- $c_v = 3.0\ 10^{-7}\ m^2/s$
- $c_h = 5.0\ 10^{-7}\ m^2/s$

Modèles avec tassement final
- 0.85 m
- 0.98 m

$c_v = 5.6\ 10^{-7}\ m^2/s$ $c_h = 1.1\ 10^{-6}\ m/s^2$



Conclusions

Le tassement d'une couche de 20 m de schlamms sous la charge d'un remblai de 5 m d'épaisseur devait être terminé en un an au maximum.

La faible perméabilité du matériau (10^{-7} à 10^{-8} m/s) et l'épaisseur de la couche ne permettaient pas une consolidation complète en moins d'une dizaine d'années.

Un réseau de drains verticaux à maille de 2 m, poussés jusqu'à la roche sous-jacente a permis d'atteindre l'objectif fixé.

Le suivi du tassement a montré que les paramètres de calcul déterminés par les campagnes géotechniques étaient bien adaptés et que les valeurs du tassement et de la durée de consolidation étaient correctement estimées.

Par souci de sécurité et pour tenir compte d'uns éventuelle consolidation secondaire (peu probable vu la faible teneur en MO des schlamms), une surhauteur de 0.8 m de remblai a été mise en place, à décaisser en phase finale.