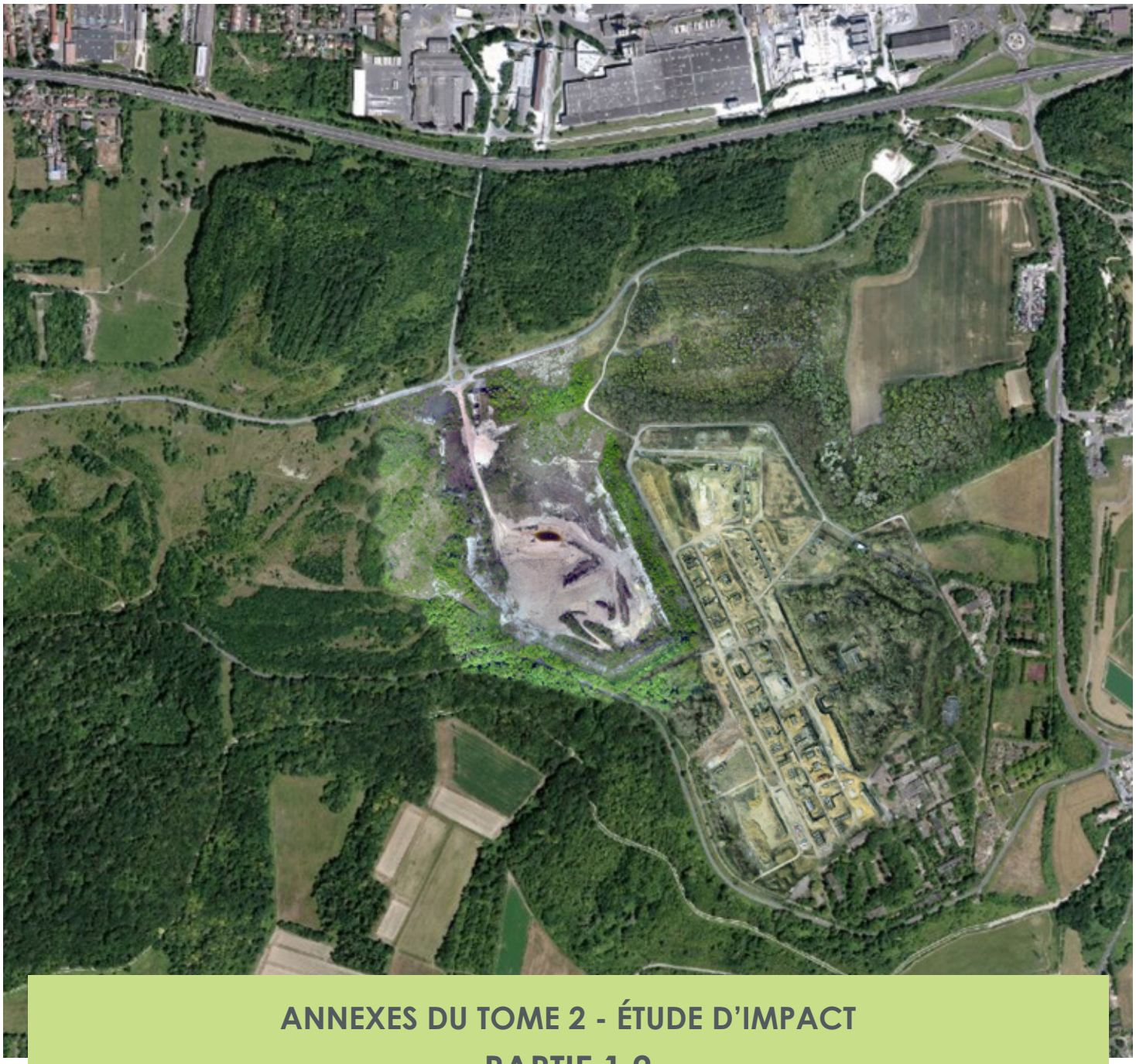
DOSSIER D'AUTORISATION ENVIRONNEMENTALE

Carrière de gypse de Vaujours - Guisy

sur les communes de Vaujours et de Coubron en Seine-Saint-Denis (93)



ANNEXES DU TOME 2 - ÉTUDE D'IMPACT

PARTIE 1.2

cabinet GREUZAT

Dossier 2015.0308

30 mars 2022

TABLE DES MATIÈRES
ANNEXES DE L'ÉTUDE D'IMPACT

ANNEXES PARTIE 1.1

ANNEXE 1 - Etudes de Stabilité LREP de 1984
ANNEXE 2 - Carrière de gypse de Montzaigle - Stabilité LREP - Phases 1 et 2
ANNEXE 3 - Recommandations pour la transformation des vieux cavages Nord (BG)
ANNEXE 4 - Avis sur la stabilitéd'un versant de la fosse d'Aiguisy (BRGM)
ANNEXE 5 - Stabilité du talus Sud-Ouest en aval de la RD129 (BG)
ANNEXE 6 - Etude de sécurisation des travaux de déremblaiement (BG)

ANNEXES PARTIE 1.2

ANNEXE 7 - Analyse des reconnaissances géotechniques et des mesures piézométriques (BG) 7
ANNEXE 8 - Analyse des conditions de stabilité du talus (BG) 40
ANNEXE 9 - Stabilité du profil type des talus de la fosse (BG) 72

ANNEXE PARTIE 2.1

ANNEXE 10 - Réhabilitation de l'ancien fort de Vaujours - Plan de gestion (Antea Group)

ANNEXE PARTIE 2.2

ANNEXE 11 - Réhabilitation de l'ancien fort de Vaujours - Plan de gestion - ANNEXES (Antea Group)

ANNEXES PARTIE 3.1

ANNEXE 12 - Réalisation d'une évaluation des expositions radiologiques - Terme source (GINGER DELEO)
ANNEXE 13 - Réalisation d'une évaluation des expositions radiologiques - Schéma conceptuel (GINGER DELEO)
ANNEXE 14 - Réalisation d'une évaluation des expositions radiologiques - Évaluation dosimétrique(GINGER DELEO)

ANNEXE PARTIES 3.2 et 3.3

ANNEXE 15 - Évaluation des risques sanitaires (GINGER BURGEAP)

ANNEXES PARTIE 4

ANNEXE 16 - Bilan des garants de la concertation
ANNEXE 17 - Étude acoustique prévisionnelle (Venathec)
ANNEXE 18 - Diagnostic sylvicole

ANNEXES PARTIE 5

ANNEXE 19 - Quantification des émissions de gaz à effet de serre (CITEPA)
ANNEXE 20 - étude d'impact sur le trafic (CDVIA)
ANNEXE 21 - Analyse des impacts vibratoires (EGIDE)

ANNEXE PARTIE 6

ANNEXE 22 - Étude d'impact hydrogéologique et hydraulique (ANTÉA)

ANNEXES PARTIE 7

ANNEXE 23 - étude hydrogéologique du remblaiement de la fosse d'Aiguisy (GINGER BURGEAP)
ANNEXE 24 - Synthèse hydrologique et hydrogéologique
ANNEXE 25 - Synthèse des campagnes de suivi des eaux souterraines et superficielles (ANTEA GROUP)

ANNEXES - PARTIE 1.2

- **Annexe 7 :** Analyse des reconnaissances géotechniques et des mesures piézométriques (BG)
- **Annexe 8 :** Analyse des conditions de stabilité du talus (BG)
- **Annexe 9 :** Stabilité du profil type des talus de la fosse (BG)

PLACOPLATRE
Annexes de l'étude d'impact
Vaujours, Coubron (93) et Courtry (77)
Mars 2022
Cabinet GREUZAT PARTIE 1.2

ANNEXE 7 - ANALYSE DES RECONNAISSANCES GÉOTECHNIQUES ET DES MESURES PIÉZOMÉTRIQUES (BG)

PLACOPLATRE – FOSSE D'AIGUISY

ANALYSE DES RECONNAISSANCES GÉOTECHNIQUES ET DES MESURES PIÉZOMÉTRIQUES

BG Ingénieurs Conseils SAS
114 Boulevard Wilson, BP 30233 - F-73102 Aix-les-Bains Cedex
Siège social: Immeuble METROSUD, 1, bd Hippolyte Marques - 94200 Ivry sur Seine - SAS au capital de 1 516 800 €
R.C.S Créteil 2007B04453 - SIRET 303 559 249 00196 - Code APE 7112B
T +33 4 79 35 05 36 **– F** +33 4 79 61 49 90 **–** aixlesbains@bg-21.com **–** www.bg-21.com
FR 493 035 592 49 TVA

■ INGENIOUS SOLUTIONS

VERSION	-	Version a
DOCUMENT	200030.26-RN001	200030.26-RN001a
DATE	18 mars 2021	02 avril 2021
ELABORATION	Magid RAMDANI	Magid RAMDANI
VISA	François LAIGLE	François LAIGLE
COLLABORATION		
DISTRIBUTION	Nicolas Petit, François Martin	Nicolas Petit, François Martin

TABLE DES MATIÈRES

		Page
1.	**Introduction**	**3**
2.	**Données d'entrées**	**3**
2.1	Implantation des sondages *in-situ* et piézomètres	4
2.1.1	Reconnaissances Hydrogéotechnique	4
2.1.2	Reconnaissances Terra Expertise - ANTEA	5
2.2	Essais de laboratoire	6
3.	**Stratigraphie**	**6**
3.1	Stratigraphie issue des sondages carottés	8
3.1.1	Sondages réalisés par Hydrogéotechnique :	8
3.1.2	Sondages issus du rapport ANTEA	8
4.	**Paramètres d'identification**	**9**
4.1	Paramètres d'identification des Argiles vertes	9
4.2	Paramètres d'identification des Marnes Blanches de Pantin	11
4.3	Paramètres d'identification des Marnes bleues d'Argenteuil	12
5.	**Détermination des caractéristiques mécaniques**	**13**
5.1	Caractéristiques mécaniques des Argiles vertes	13
5.1.1	Interprétation en conditions non-drainées	13
5.1.2	Interprétation en conditions drainées	15
5.2	Caractéristiques mécaniques des Marnes blanches de Pantin	15
5.2.1	Interprétation en conditions non-drainées	15
5.2.2	Interprétation en conditions drainées	16
5.3	Caractéristiques mécaniques des Marnes bleue d'Argenteuil	18
5.3.1	Interprétation en conditions non-drainées	18
5.3.2	Interprétation en conditions drainées	19
6.	**Synthèse des paramètres d'état et caractéristiques mécaniques**	**20**
7.	**Piézométrie**	**22**
7.1	Piézomètre "PLACO"	23
7.2	Piézomètre HG	25
8.	**Conclusions**	**27**

ANNEXES

1. Annexe 1 : Programme laboratoire 27

FIGURES

Figure 1 : Mesures piézométriques sur 3 piézomètres 4
Figure 2 : Localisation des sondages ANTEA....5
Figure 3 : Localisation des sondages Hydrogéotechnique et Terra Expertise-Antea....6
Figure 4 : Visualisation des différentes couches stratigraphiques 7
Figure 5 : Stratigraphie type de la région parisienne 7
Figure 6 : Argiles vertes – Diagramme de Casagrande 10
Figure 7 : Marnes de Pantin – Diagramme de Casagrande 11
Figure 8 : Marnes d'Argenteuil – Diagramme de Casagrande 12
Figure 9 : Argiles vertes – résistances maximales en conditions non drainées 13
Figure 10 : Argiles vertes – Résistances maximales en conditions non drainées sans les essais Hydrogéotechnique 14
Figure 11 : Argiles vertes – Résistances maximales en contraintes effectives sans les essais Hydrogéotechnique 15
Figure 12 : Marnes de Pantin – Résistances maximales en contraintes totales 16
Figure 13 : Marnes de Pantin – Résistances maximales en contraintes effectives 17
Figure 14 : Marnes de Pantin – Résistances maximales en contraintes effectives 17
Figure 15 : Marnes d'Argenteuil – Résistances maximales en contraintes totales 18
Figure 16 : Marnes d'Argenteuil – Résistances maximales en contraintes totales 19
Figure 17 : Marnes d'Argenteuil – Résistances maximales en contraintes effectives 20
Figure 18 : Marnes d'Argenteuil – Résistances maximales en contraintes effectives 20
Figure 19 : Coupe hydrogéologique simplifiée au droit du fort de Vaujours 22
Figure 20 : Localisation des piézomètres dans la zone du fort de Vaujours 23
Figure 21 : Horizon de marne gypseuse ou grumeleuse à la base des argiles à Cyrènes 26
Figure 22 : Horizon de marne gypseuse ou grumeleuse à la base des argiles à Cyrènes identifiée par les paramètres de forage 26
Figure 23 : Mesures des piézomètres PZ1 et PZ2 au cours des derniers mois 26

1. Introduction

Ce rapport présente une interprétation et une synthèse des essais de laboratoire réalisés dans le cadre de l'analyse et de la recherche des causes du glissement survenu en bordure de la fosse d'Aiguisy. Des reconnaissances ont été récemment réalisées à proximité immédiate de cette loupe de glissement (par la Société Hydrogéotechnique) et sur un périmètre plus large dans l'emprise du projet de carrière autour de la fosse d'Aiguisy (par la société ANTEA, sur la base de sondages réalisés par Terra Expertis).

Les essais de laboratoire sont analysés globalement, en s'intéressant aux 3 principaux faciès de terrains superficiels, qui pourraient être mobilisés par le glissement, à savoir les argiles vertes, les marnes blanches de Pantin et les marnes bleues d'Argenteuil.

Une première étude a été réalisée par BG en 2019 [1], consistant à fournir une étude de stabilité de l'ensemble de la fosse. Cette approche était basée sur des calculs de stabilité de cercles de glissement, à rebours, considérant des caractéristiques géotechniques pour les 3 matériaux potentiellement concernés issues de la littérature ou de documents d'archive.

Les nouveaux essais confirment les valeurs alors retenues pour les argiles vertes, les marnes de Pantin et les marnes d'Argenteuil, en ordre de grandeur. Les valeurs caractéristiques proposées dans le présent rapport, sont aussi confortées par une comparaison avec les propriétés très souvent rencontrées sur ces matériaux bien connus de la région parisienne.

Les mesures de niveaux d'eau sont aussi brièvement analysées, sur la base des piézomètres récemment installés dans le cadre de ces campagnes de reconnaissances et d'un réseau de piézomètres existants sur l'emprise du fort de Vaujours.

2. Données d'entrées

Liste des documents disponibles :

[1] Rapport BG – Placoplatre – fosse d'Aiguisy – Etude de la stabilité de la fosse – 200030.04 – RN001/mnae – Septembre 2019.

[2] Rapport Hydro géotechnique : C.20.30030_ind C_Carrière d'Aiguisy_VAUJOURS_G0_JBI

[3] Rapport ANTEA : Lab20229_Essais géomécaniques fosse d'Aiguisy_CENP200627_Rapport provisoire du 23.02

[4] Rapport Géocentre – Rapport factuel – Sondages carottés avec pose de piézomètres – GEHAR-000001.A0 – Novembre 2017

[5] Rapport BURGEAP – CEA/DAM – Le site CEA de Vaujours dans son environnement – Synthèse documentaire historique et hydrogéologique – R.3288b/A.8314/C.301073 – 06/09/2001

[6] Rapport LREP – Carrière Poliet et Chausson à Vaujours – Etude préliminaire d'impact sur les installations du centre d'étude de Vaujours – Juillet 1984

[7] Rapport LREP – Carrière Poliet et Chausson à Vaujours – Etude Complémentaire des talus de découverte – Septembre 1984

[8] Rapport LREP – Carrière Poliet et Chausson à Vaujours – Etude Complémentaire des talus de découverte – Novembre 1984

2.1 Implantation des sondages *in-situ* et piézomètres

2.1.1 Reconnaissances Hydrogéotechnique

Les reconnaissances Hydrogéotechnique [2] comprennent 1 sondage carotté avec mise en place d'un inclinomètre, ainsi que 2 sondages destructifs avec pose de piézomètres :

Sondages	RGF93 CC49		Cote (NGF)	Type	Prof. (m)	Équipement piezo	Équipement inclino
	X	Y	Z				
Incl1	1669987.26	8191824.09	121.21	Carotté + Inclinomètre	31	/	31
Pz2	1669985.24	8191823.89	121.08	Destructif + Pz	10.5	10.5	/
Pz3	1669989.37	8191824.11	121.16	Destructif + Pz	4.5	4.5	/

Les coordonnées (X ; Y) des points de sondage sont exprimées en coordonnées RGF93 - CC49. Le nivellement (Z) est exprimé en NGF - IGN69. Les coordonnées X, Y et Z des points de sondage ont été déterminées à l'aide d'un GPS de précision centimétrique.

Tableau 1 : tableau synthétique des sondages in-situ et équipements employés (extrait du rapport [2])

Tous ces sondages sont implantés au droit du talus d'Aiguisy à proximité immédiate de la loupe de glissement. Une vue aérienne permet de repérer les points de sondages avec équipements.

Sondage	Lambert CC49		NGF IGN69
	X	Y	Z
Incl1	1669987.26	8191824.09	121.21
PZ2	1669985.24	8191823.89	121.08
Pz3	1669989.37	8191824.11	121.16

Figure 1 : Mesures piézométriques sur 3 piézomètres

2.1.2 Reconnaissances Terra Expertise - ANTEA

Les sondages de reconnaissances ont été réalisés par Terra-Expertis avec une exploitation des matériaux prélevés en laboratoire par ANTEA [3]. Cette campagne comprenait 4 sondages carottés :

- SC-AIG-1 (environ 15 m de profondeur)
- SC-AIG-2 (environ 26 m de profondeur)
- SC-AIG-3 (environ 15 m de profondeur)
- SC-AIG-4 (environ 10 m de profondeur)

Une vue aérienne permet de repérer ces 4 points de sondages :

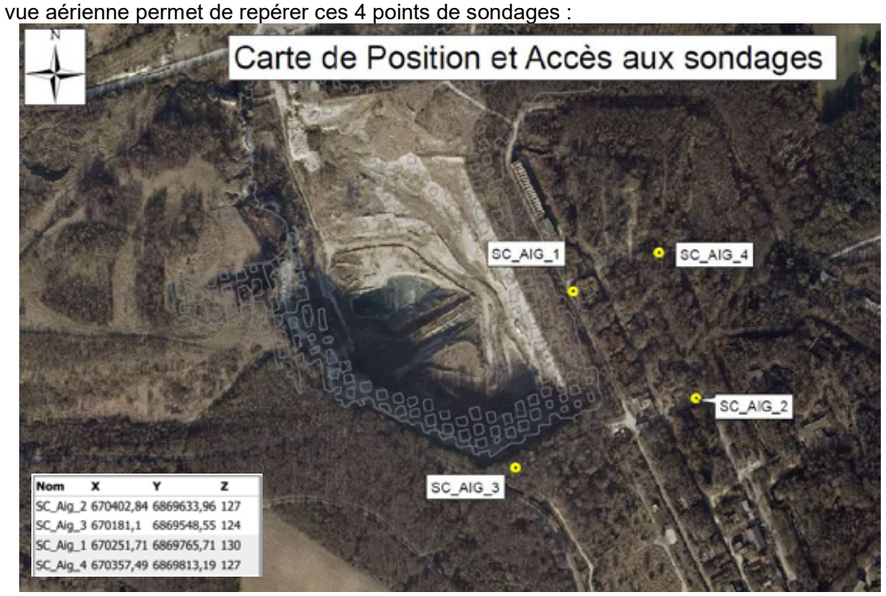


Figure 2 : Localisation des sondages ANTEA

On notera que les sondages sont répartis autour de la fosse et ne sont pas localisés au voisinage immédiat de l'instabilité.

Étant plus espacés, ils permettent de confirmer la lithologie de la zone d'étude. Le point de sondage le plus près du talus étudié est le sondage SC-AIG-3.

Une vue aérienne est présentée ci-dessous permettant de faire apparaître les sondages Terra Expertise et Hydrogéotechnique sur une seul et même figure.

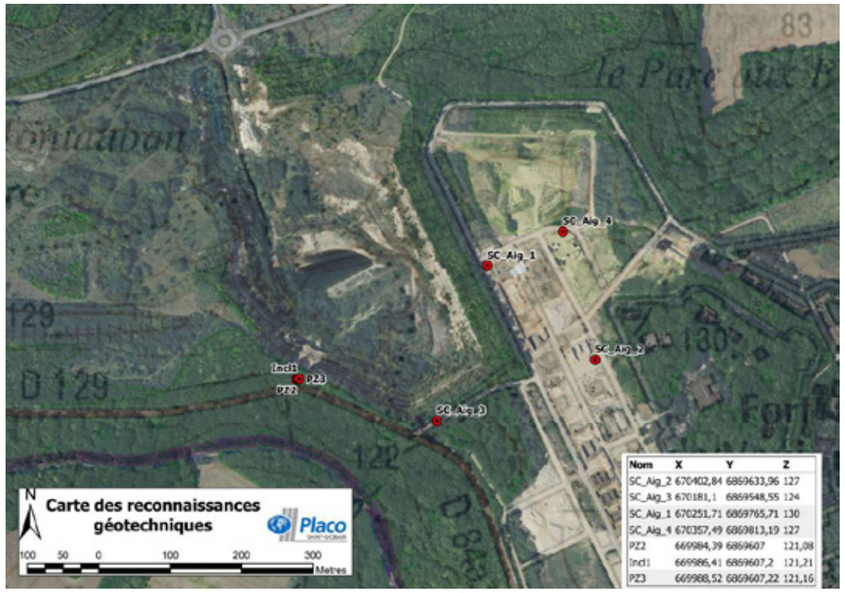


Figure 3 : Localisation des sondages Hydrogéotechnique et Terra Expertise-Antea

2.2 Essais de laboratoire

Les programmes d'essais de laboratoire et résultats numériques Hydrogéotechnique et ANTEA sont présentés en Annexe 1.

3. Stratigraphie

Au droit de la zone étudiée, et globalement sur l'ensemble du site, la stratigraphie (figures 4 et 5) est composée des couches suivantes :

- Formations récentes et Terre Végétale
- Calcaire de Brie, sur une épaisseur de l'ordre de 2m ;
- L'argile verte, d'une épaisseur de l'ordre de 6 à 8m.
- Les marnes "blanches" de Pantin (MP) et les marnes "bleues" d'Argenteuil (MA), qui se différentient essentiellement par leur couleur, mais qui présentent des caractéristiques géotechniques globalement similaires, avec une épaisseur globale sur site de l'ordre de 16m ;
- Les niveaux gypseux.

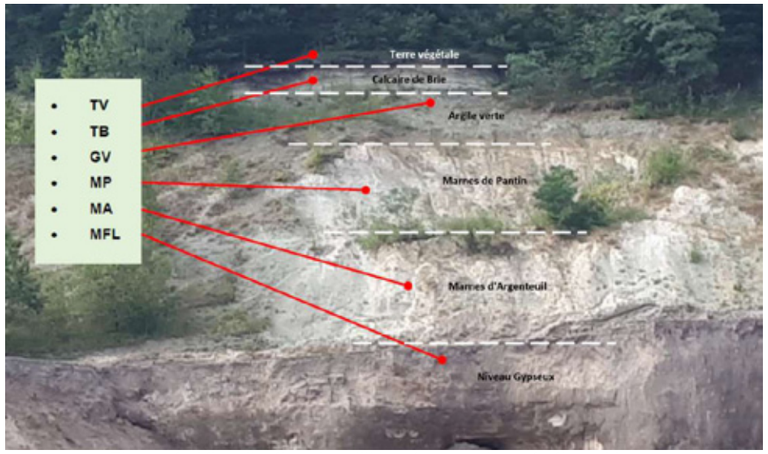


Figure 4 : Visualisation des différentes couches stratigraphiques

PERIODE	Age (Ma)	SERIE ou EPOQUE	ETAGE	Sous-étage ou équivalent	FORMATION géologique		Milieu de dépôt
	23	MIOCENE		Emersion et lacune du Miocène			
PALEOGENE		OLIGOCENE	CHATTIEN ?		Meulière de Montmorency		Laguno-lacustre à continental
			RUPELIEN (Stampien)	Stampien s.s.	Sables (et grès) de Fontainebeau		Marin
					Marnes à Huîtres		Laguno-marin
				Sannoisien	Calcaire de Brie		Laguno-marin
	34				Argile verte		Lagunaire
		EOCENE	PRIABONIEN	Ludien	Marnes de Pantin		Lacustre
					Marnes d'Argenteuil		Lagunaire à marin
					Masses et Marnes du Gypse / Marnes résiduelles / Calcaire de Champigny		Laguno-lacustre à continental ?
			BARTONIEN	Marinésien	Sables verts ou Sables de Monceau		Saumâtre - marin
					Calcaire de St-Ouen s.l.		Laguno-lacustre (à marin)
				Auversien	Sables de Beauchamp		Littoral (plage)
				Emersion			
			LUTETIEN	Lut. Sup. - Bartonien inf.	Marnes et Caillasses		Laguno-saumâtre
				Lutétien inf. à sup.	Calcaire grossier		Marin (laguno-lacustre pdt une courte période)
			YPRESIEN	Emersion et lacune (2 Ma)			
				Cuisien	Yprésien sablo-argileux	Sables de Cuise	Marin littoral
				Sparnacien		Sables supérieurs	Lagunaire (saumâtre)
						Fausses glaises	Laguno-continental
						Sables d'Auteuil	Littoral à continental
	56				Argile plastique		Fluvio-lacustre
		PALEOCENE	THANETIEN	Emersion et lacune du Thanétien au niveau de Paris			
			SELANDIEN	Dano-Montien	Calcaires et marnes de Meudon		Saumâtre (base) à lacustre/continental
	65		DANIEN				
				Emersion, altération, érosion et ravinement de la craie			
	84	CRETACE SUPERIEUR	CAMPANIEN		Craie à silex		Marin

Figure 5 : Stratigraphie type de la région parisienne

3.1 Stratigraphie issue des sondages carottés

Les stratigraphies identifiées au droit des sondages carottés, pour les 2 campagnes de reconnaissances, sont présentées ci-dessous.

3.1.1 Sondages réalisés par Hydrogéotechnique :

3.1.1.1 Sondages carottés

Les horizons rencontrés sur le sondage carotté HG sont présentés ci-dessous

Sondage	De (m)	A (m)	Épaisseur	Formation
Incl1	0	0.4	0.4	Un sol limono-argileux en surface, +/- organique, à radicelles et nombreux cailloux et cailloutis de calcaire,
Incl1	0.4	3.15	2.75	Une alternance de niveaux marneux blanchâtre et de niveaux argileux verdâtre (Altération du marno-calcaire de Brie supposé)
Incl1	3.15	6.85	3.7	Une argile / marne localement ? verdâtre à rares cailloutis (Glaises vertes supposées)
Incl1	6.85	8.75	1.9	Alternance de niveaux marneux / argileux marron verdâtre – marbrés (Marnes à Cyrènes supposés),
Incl1	8.75	15.4	6.65	Alternance de niveaux marneux blanchâtre-grisâtre verdâtre tendres, couronnés par un banc de marne gypseuse fragmentée (Gypse Marabet ?) (Marnes blanches de Pantin supposées)
Incl1	15.4	28.15	12.75	Alternance de niveaux argileux marneux gris-bleuté feuilletés. En deçà de 24.20m et jusqu'à la base de la formation, entrecoupement par des bancs gypseux (bancs de chiens) (Marnes bleues d'Argenteuil supposées)
Incl1	28.15	31	2.85	Bancs décimétriques de gypse grenu durs alternant avec des niveaux tendres (1ère masse de gypse supposée).

Tableau 2 : résultat du sondage Incl1

3.1.1.2 Sondages Destructifs

Du fait de leur proximité avec le sondage Incl1, les indications stratigraphiques de ce dernier ont été appliquées aux forages destructifs Pz2 et Pz3 réalisés à proximité.

3.1.2 Sondages issus du rapport ANTEA

Les horizons rencontrés sur les 4 points de sondage carotté ANTEA sont présentés dans les tableaux ci-dessous :

Sondage	De (m)	A (m)	Épaisseur	Formation
SC-AIG-1	0	2.12	2.12	Limons
SC-AIG-1	2.12	3.77	1.65	Calcaire de Brie
SC-AIG-1	3.77	4.95	1.18	Argile verte à litage, oxydé et compact, tendance plus fracturée
SC-AIG-1	4.95	8.3	3.35	Argile verte homogène, compacte, localement plus argileuse
SC-AIG-1	8.3	10.3	2	Argiles vertes laminées, à niveaux calcaires et riche en oxydes - Glaises à Cyrènes
SC-AIG-1	10.3	14.35	4.05	Marnes blanches de Pantin
SC-AIG-1	14.35	14.85	0.5	Marnes Bleues d'Argenteuil

Tableau 3 : résultat du sondage SC-AIG-1

Sondage	De (m)	A (m)	Épaisseur	Formation
SC-AIG-2	0	1.2	1.2	Limons
SC-AIG-2	1.2	4.68	3.48	Calcaire de Brie
SC-AIG-2	4.68	6.75	2.07	Argile verte à litage, oxydé et compact, tendance plus fracturée
SC-AIG-2	6.75	9.05	2.3	Argile verte homogène, compacte, localement plus argileuse
SC-AIG-2	9.05	12.65	3.6	Argile verte laminée, à niveaux calcaires et riche en oxydes - Glaises à Cyrènes
SC-AIG-2	12.65	16.52	3.87	Marnes blanches de Pantin
SC-AIG-2	16.52	25.6	9.08	Marnes Bleues d'Argenteuil

Tableau 4 : résultat du sondage SC-AIG-2

Sondage	De (m)	A (m)	Épaisseur	Formation
SC-AIG-3	0	1.4	1.4	Limons
SC-AIG-3	1.4	3.36	1.96	Calcaire de Brie
SC-AIG-3	3.36	4.83	1.47	Argile verte à litage, oxydé et compact, tendance plus fracturée
SC-AIG-3	4.83	8.4	3.57	Argile verte homogène, compacte, localement plus argileuse
SC-AIG-3	8.4	10.44	2.04	Argiles vertes laminées, à niveaux calcaires et riche en oxydes - Glaises à Cyrènes
SC-AIG-3	10.44	14.7	4.26	Marnes blanches de Pantin

Tableau 5 : résultat du sondage SC-AIG-3

Sondage	De (m)	A (m)	Épaisseur	Formation
SC-AIG-4	0	2.05	2.05	Limons
SC-AIG-4	2.05	3.42	1.37	Calcaire de Brie
SC-AIG-4	3.42	3.87	0.45	Argile verte à litage, oxydé et compact, tendance plus fracturée
SC-AIG-4	3.87	7.75	3.88	Argile verte homogène, compacte, localement plus argileuse
SC-AIG-4	7.75	9.51	1.76	Argiles vertes laminées, à niveaux calcaires et riche en oxydes - Glaises à Cyrènes
SC-AIG-4	9.51	10.29	0.78	Marnes blanches de Pantin

Tableau 6 : résultat du sondage SC-AIG-4

Le tableau 7 présente l'épaisseur moyenne des différentes formations observées sur les sondages ANTEA :

Épaisseur (m)	Formation
1.7	Limons
2.0	Calcaire de Brie
7.0	Argiles vertes
4.3*	Marnes blanches de Pantin
9.1**	Marnes Bleues d'Argenteuil

Tableau 7 : épaisseur moyenne des formations rencontrées sur les sondages ANTEA

* : épaisseur maximum rencontrée (SC-AIG-3)
** : épaisseur maximum rencontrée (SC-AIG-2)

4. Paramètres d'identification

4.1 Paramètres d'identification des Argiles vertes

Les argiles vertes se situent globalement entre 2m et 10 m de profondeur. Elles ont fait l'objet de 6 essais d'identification par ANTEA et de 2 essais par Hydrogéotechnique.

- La teneur en eau des échantillons est en moyenne de 30.4%, avec des valeurs extrêmes variant entre 27.6% et 31.6%. Seul un échantillon ANTEA (SC-AIG-2-9) présente une teneur en eau de 40.6%.
- La limite de liquidité WI est en moyenne de 76%, avec des valeurs comprises entre 75% et 83%.
- La limite de plasticité WP est en moyenne de 41%, avec des valeurs comprises entre 37% et 47%.
- L'indice de plasticité Ip est en moyenne de 38%, variant entre 33% et 46%.

Le diagramme suivant de Casagrande permet de caractériser ces argiles comme des argiles limoneuses très plastiques.

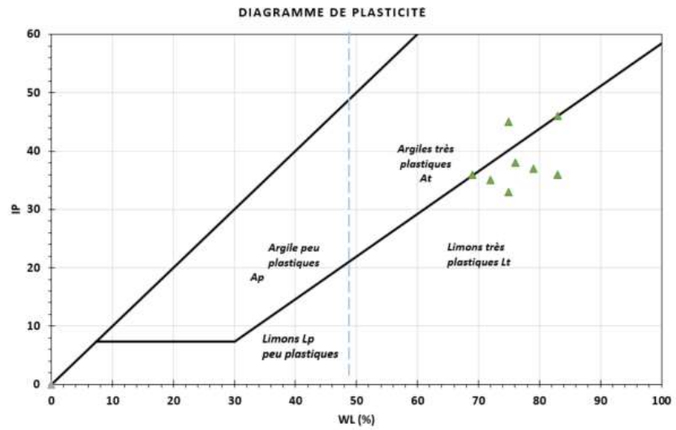


Figure 6 : Argiles vertes – Diagramme de Casagrande

L'indice de consistance Ic est en moyenne de 1.2, avec des valeurs variant entre 0.9 et 1.4. À noter que la valeur minimale de 0.9 correspond logiquement à l'échantillon ANTEA (SC-AIG-2-9), pour lequel la teneur en eau est très élevée. Il conviendrait de savoir si cette teneur en eau élevée correspond à un biais d'échantillonnage, ou si elle est représentative du sol en place. En effet, une augmentation de la teneur en eau de plusieurs points peut se traduire par une réduction significative de la résistance en cisaillement Cu. Cette valeur de forte teneur en eau (*et faible consistance*) est cependant unique et on ne peut, à ce stade, la généraliser au reste du site.

La densité sèche γ_d est en moyenne 14.4 kN/m³, avec là aussi une valeur anormalement basse pour l'échantillon ANTEA (*SC-AIG-2-9*).

On rappelle, à titre indicatif, quelques caractéristiques des argiles vertes que l'on peut retrouver dans la littérature :

- Teneur en eau naturelle : ≅ 25% à 32%
- Limite de Liquidité WI : ≅ 72% à 76%
- Limite de plasticité Wp: ≅ 37% à 39%
- Indice de Plasticité Ip : ≅ 34% à 37%
- Indice de Consistance Ic: ≅ 1.2 à 1.4

Ces valeurs sont assez cohérentes avec celles mesurées.

4.2 Paramètres d'identification des Marnes Blanches de Pantin

Les Marnes de Pantin se situent globalement entre 10 m et 18m de profondeur environ. Elles ont fait l'objet de 2 essais d'identification par ANTEA.

- La teneur en eau des échantillons est en moyenne de 27%, avec des valeurs extrêmes variant entre 24% et 29.5%.
- La limite de liquidité Wl est en moyenne de 48%.
- La limite de plasticité WP est en moyenne de 30%.
- L'indice de plasticité Ip serait en moyenne de 18%

Ces paramètres d'état sont reportés dans le diagramme de Casagrande.

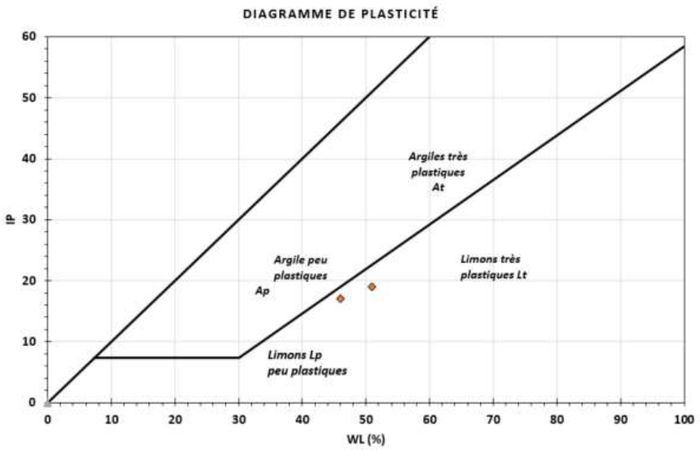


Figure 7 : Marnes de Pantin – Diagramme de Casagrande

L'indice de consistance Ic est en moyenne de 1.2.

La densité sèche γ_d est en moyenne 14.8 kN/m³.

On rappelle, à titre indicatif, quelques caractéristiques de ces marnes de Pantin que l'on peut retrouver dans la littérature :

- Teneur en eau naturelle : ≅ 21%
- Limite de Liquidité Wl : ≅ 52%
- Limite de Plasticité Wp: ≅ 20%
- Indice de Plasticité Ip : ≅ 32%
- Indice de Consistance Ic: ≅ 1

Ces valeurs sont relativement cohérentes avec celles mesurées sur les prélèvements réalisés, même si l'Indice de Plasticité est un peu plus faible que celui qui est généralement constaté.

4.3 Paramètres d'identification des Marnes bleues d'Argenteuil

Les Marnes d'Argenteuil se situent globalement entre 18 m et 26m de profondeur environ. Elles ont fait l'objet de 5 essais d'identification par ANTEA et Hydrogéotechnique.

- La teneur en eau des échantillons est en moyenne de 30%, avec des valeurs extrêmes variant entre 25% et 34%.
- La limite de liquidité Wl est en moyenne de 89%.
- La limite de plasticité Wp est en moyenne de 37%
- L'indice de plasticité Ip serait en moyenne de 52%

L'indice de consistance Ic est en moyenne de 1.15.

La densité sèche γ_d est en moyenne 14.3 kN/m³.

Ces valeurs sont reportées sur le diagramme de Casagrande et sont relativement cohérentes entre elles.

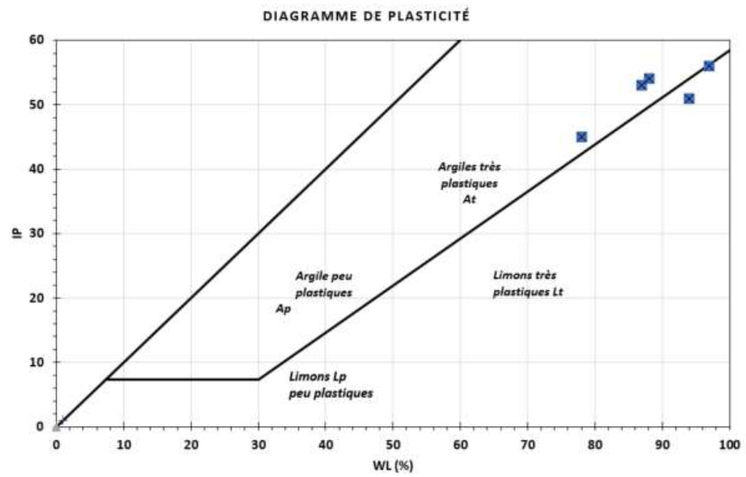


Figure 8 : Marnes d'Argenteuil – Diagramme de Casagrande

On rappelle, à titre indicatif, quelques caractéristiques de ces marnes d'Argenteuil que l'on peut retrouver dans la littérature :

- Teneur en eau naturelle : ≅ 29% à 37%
- Limite de Liquidité Wl : ≅ 86% à 96%
- Limite de plasticité Wp: ≅ 40 à 43%
- Indice de Plasticité Ip : ≅ 42% à 57%
- Indice de Consistance Ic: ≅ 1.2 à 1.4

Ces valeurs sont assez cohérentes avec celles mesurées.

5. Détermination des caractéristiques mécaniques

5.1 Caractéristiques mécaniques des Argiles vertes

Les essais sont réalisés en conditions CU+U.

Nous avons principalement interprété les essais réalisés par ANTEA qui s'avèrent *a priori*, et par comparaison avec les propriétés moyennes habituellement constatées sur cette argile, assez représentatifs et de bonne qualité, en comparaison de ceux réalisés par Hydrogéotechnique. Ces derniers fournissent des propriétés mécaniques très basses, jetant un doute sur leur représentativité.

5.1.1 Interprétation en conditions non-drainées

La première étape consiste à interpréter les résultats des essais en conditions non drainées.

Sur la figure suivante, sont reportés :

- En rouge, les points de mesure issus des essais d'ANTEA
- En bleu, les points de mesure issus des essais faits par Hydrogéotechnique
- En vert, des essais expérimentaux issus de la littérature.

Il est remarquable de constater une similitude entre les essais d'ANTEA et ceux issus de la littérature. Ceci semblerait confirmer la représentativité des essais réalisés par ANTEA et permet de compléter la base de données pour déterminer avec plus de pertinence les caractéristiques mécaniques.

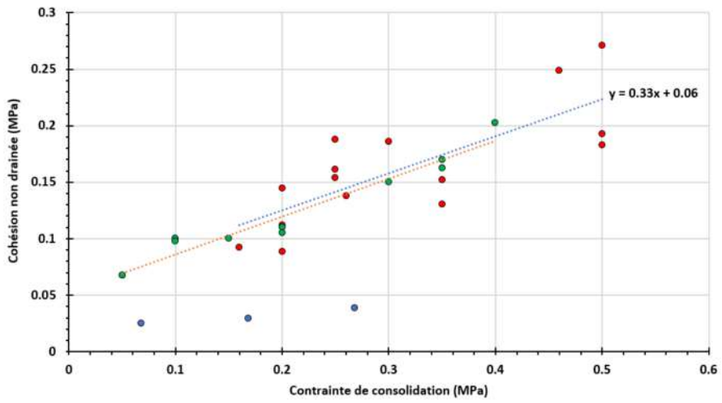


Figure 9 : Argiles vertes – résistances maximales en conditions non drainées

Les essais faits par Hydrogéotechnique sont écartés *a priori* de l'interprétation. Les raisons justifiant l'obtention de valeurs extrêmement basses ne sont pas clairement définies à ce stade de l'interprétation. Ce point sera débattu au stade ultérieur de l'expertise relative à la justification du glissement.

Dans le cas des sols homogènes et saturés, le critère de résistance maximal dans ce plan devrait présenter 2 domaines :

- Un domaine pour les faibles contraintes de confinement, dans lequel la cohésion devrait être constante ou très peu varier avec le confinement. Cette plage correspond alors au domaine dans lequel le matériau est surconsolidé. La contrainte de confinement est alors inférieure à la contrainte de préconsolidation subie antérieurement par le matériau.
- Un domaine pour les plus fortes contraintes de confinement, dans lequel la cohésion non-drainée augmente avec la pression de confinement. Le matériau est alors dans un état normalement consolidé et la contrainte de confinement appliquée est alors supérieure ou égale à la contrainte de préconsolidation.

La contrainte de préconsolidation est généralement estimée à partir d'un essai œdométrique. Le seul essai œdométrique disponible est celui réalisé par Hydrolégéotechnique, à très faible profondeur (*1.70m*). Il fournit une contrainte de préconsolidation de l'ordre de 90 kPa, ce qui parait anormalement bas dans ce type de matériau.

Pour les argiles vertes du bassin parisien, cette contrainte de préconsolidation est généralement estimée entre 450 et 550 kPa. Le matériau en place serait donc légèrement surconsolidé. Ceci est aussi justifié par un paramètre Af de Skempton de l'ordre de 0.18, représentatif d'une argile faiblement consolidée (*Valeur Af=0.14 issue de la littérature*).

En considérant donc une contrainte de préconsolidation de l'ordre de 450 à 550 kPa, il est possible d'avoir une estimation de la cohésion non-drainée à partir de la corrélation de Skempton:

$$C_u = \left(0.11 + 0.0037\, I_p\right).\sigma_p$$

L'indice de Plasticité moyen Ip pour l'argile verte est de l'ordre de 37%.

Il en découle que la cohésion non-drainée Cu pourrait varier entre 50 kPa et 60 kPa.

La régression linéaire entre la cohésion non-drainée et la pression de consolidation présente à l'origine une valeur de 60 kPa, conforme à ce qui est estimée par la corrélation précédente. Certes, on n'observe pas clairement le changement de comportement entre les fortes pressions de consolidation et les faibles contraintes, mais uniquement une pente moyenne correspondant à un angle ϕ_{cu}=18.3°. Cet angle n'a pas une valeur physique particulière, et traduit plus ou moins l'accroissement de la cohésion non-drainée en fonction de la contrainte de consolidation (*ou un effet du remaniement des échantillons par destructuration partielle ou dessaturation*).

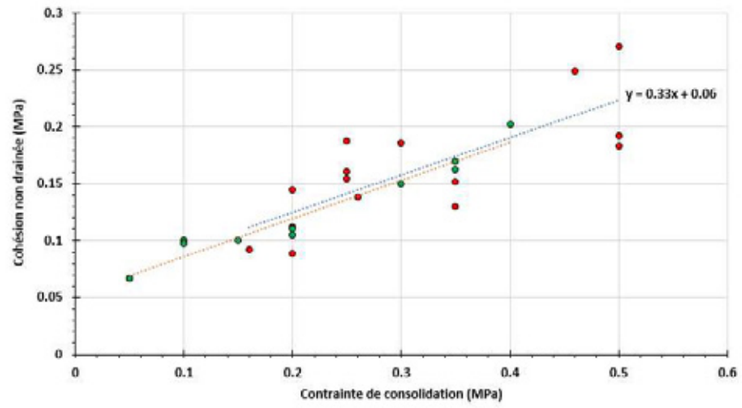


Figure 10 : Argiles vertes – Résistances maximales en conditions non drainées sans les essais Hydrogéotechnique

5.1.2 Interprétation en conditions drainées

Les évolutions des pressions interstitielles étant mesurées pendant le cisaillement des échantillons (CU+U), il est possible d'interpréter les essais en conditions de contraintes effectives. La figure suivante présente les points expérimentaux dans le plan de Lambe (s',t). Sur ce graphique, sont représentés les points expérimentaux issus des essais faits par ANTEA (en rouge) ainsi que les essais tirés de la littérature (en vert).

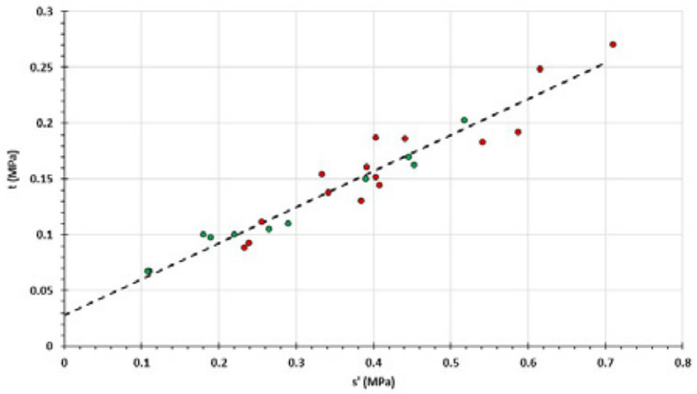


Figure 11 : Argiles vertes – Résistances maximales en contraintes effectives sans les essais Hydrogéotechnique

Les essais sont parfaitement cohérents entre eux, et conduisent à retenir un critère de résistance maximale dans le plan de Lambe, de la forme:

$$t(MPa) = 0.32\, s'(MPa) + 0.027$$

Cette expression correspond aux paramètres suivants :

- Angle de frottement en contraintes effectives : **ϕ'=19°**
- Cohésion effective :**C'=29 kPa**

5.2 Caractéristiques mécaniques des Marnes blanches de Pantin

Les essais sont réalisés en conditions CU+U.

À ce stade, 3 essais triaxiaux sont disponibles ; deux réalisés par ANTEA et un par Hydrogéotechnique. Comme pour les argiles vertes, ces essais sont successivement interprétés en conditions non-drainées puis en contraintes effectives.

5.2.1 Interprétation en conditions non-drainées

La figure suivante montre, pour l'ensemble des essais réalisés sur les marnes de Pantin, les résistances en cisaillement non-drainée Cu en fonction de la contrainte de consolidation.

Comme pour les argiles vertes, on constate une forte sous-estimation des résistances données par l'essai réalisé par Hydrogéotechnique. La justification de ces valeurs apparemment basses, qui se retrouvent sur l'ensemble des matériaux échantillonnés par Hydrogéotechniques, n'est pas clairement définie.

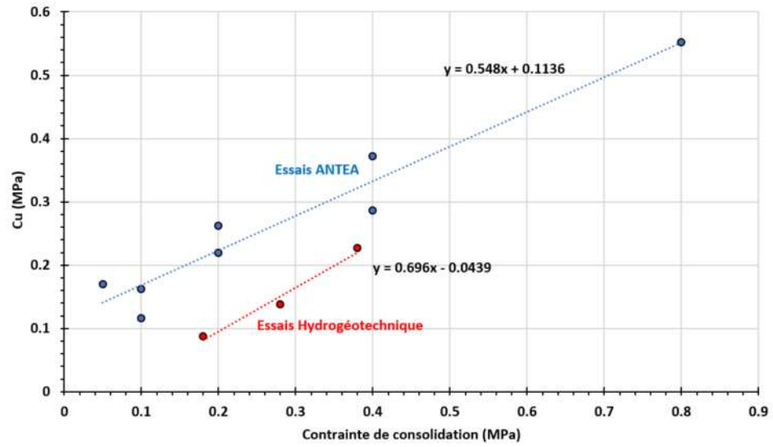


Figure 12 : Marnes de Pantin – Résistances maximales en contraintes totales

En interprétant uniquement les points de mesure ANTEA, on peut estimer une cohésion non-drainée apparente Cu=110 kPa environ. Il existe peu de données dans la littérature auxquelles se référer pour ce matériau, mais nous pouvons toutefois comparer cette estimation de la résistance à court terme à celles mesurées récemment dans le cadre du projet de la Société du Grand Paris.

Les valeurs retenues dans le cadre du projet de la ligne 15 Sud sont évaluées entre Cu=90 kPa à 140 kPa. Ces valeurs sont tout à fait similaires en ordre de grandeur à ce qui peut être estimé à partir des essais réalisés dans le cadre de cette étude.

Une valeur de Cu peut aussi être estimée à partir de la mesure de la pression limite pressiométrique qui serait de l'ordre de 1 MPa (*Mesures Ligne 15 Sud* – $P_l^* \epsilon [0.8\, MPa; 1.1 M\, Pa]$). La cohésion non-drainée sur un matériau argilo-marneux peut être évaluée à partir de la corrélation suivante proposée par Cassan (2005):

$$C_u(\mathrm{MPa}) \approx \frac{P_l^*}{35} + 0.085$$

La cohésion varierait entre 110 kPa et 116 kPa.

On peut donc retenir, en valeur représentative, une cohésion Cu non drainée égale à Cu=100 kPa.

5.2.2 Interprétation en conditions drainées

Les évolutions des pressions interstitielles étant mesurées pendant le cisaillement des échantillons (CU+U), il est possible d'interpréter les essais en conditions de contraintes effectives. La figure suivante présente les points expérimentaux dans le plan de Lambe (s',t). Sur ce graphique, sont représentés les points expérimentaux issus des essais faits par ANTEA (en bleu) ainsi que par Hydrogéotechnique en rouge). En prenant en compte les pressions interstitielles, il s'avère que la dispersion des mesures est moins importante, et il est alors éventuellement possible de prendre en compte tous les résultats expérimentaux.

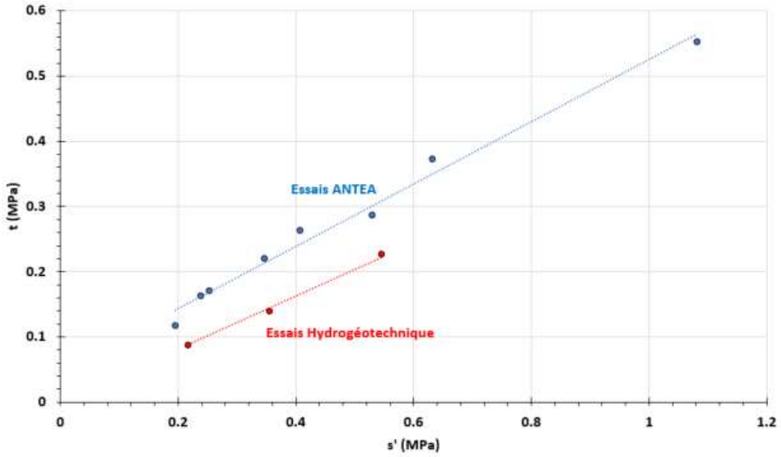


Figure 13 : Marnes de Pantin – Résistances maximales en contraintes effectives

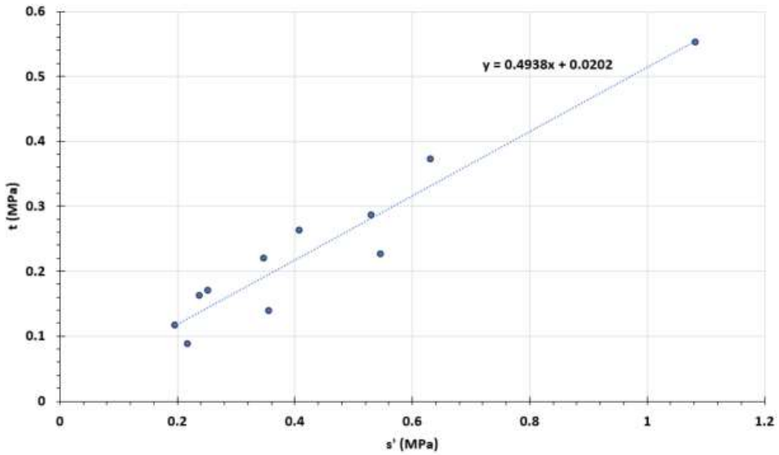


Figure 14 : Marnes de Pantin – Résistances maximales en contraintes effectives

Les critères exprimés dans le plan de Lambe s'expriment de la manière suivante :

- Essais ANTEA: $t(\mathrm{MPa}) = 0.48\, s'(\mathrm{MPa}) + 0.048$

  ϕ'=28.7° C'=54 kPa

- Essais Hydrogéotechnique: $t(\mathrm{MPa}) = 0.40\, s'(\mathrm{MPa})$

  ϕ'=23.6° C'=0 kPa

- Ensemble des mesures: $t(\mathrm{MPa}) = 0.49\, s'(\mathrm{MPa}) + 0.020$

  ϕ'=29.6° C'=23 kPa

Les essais réalisés par Hydrogéotechnique, considérés indépendamment des autres mesures, conduisent à des caractéristiques anormalement basses, avec une cohésion nulle qui n'est pas représentative des marnes.

Les valeurs retenues par ailleurs dans le cadre du projet de la SGP (*Ligne 15 Sud*) sont similaires, avec une cohésion variant entre C'=15 kPa à 21 kPa, et un angle de frottement ϕ'=25° à 31°.

Il est proposé de retenir les paramètres suivants :

- Angle de frottement en contraintes effectives : **ϕ'=29°**
- Cohésion effective :**C'=23 kPa**

5.3 Caractéristiques mécaniques des Marnes bleue d'Argenteuil

Les essais sont réalisés en conditions CU+U.

À ce stade, 3 essais triaxiaux sont disponibles ; un réalisé par ANTEA et deux par Hydrogéotechnique. Comme pour les argiles vertes et les marnes blanches de Pantin, ces essais sont successivement interprétés en conditions non-drainée et en contraintes effectives.

5.3.1 Interprétation en conditions non-drainées

La figure suivante montre, pour l'ensemble des essais *a priori* réalisés sur les marnes d'Argenteuil, les résistances en cisaillement non-drainée Cu en fonction de la contrainte de consolidation.

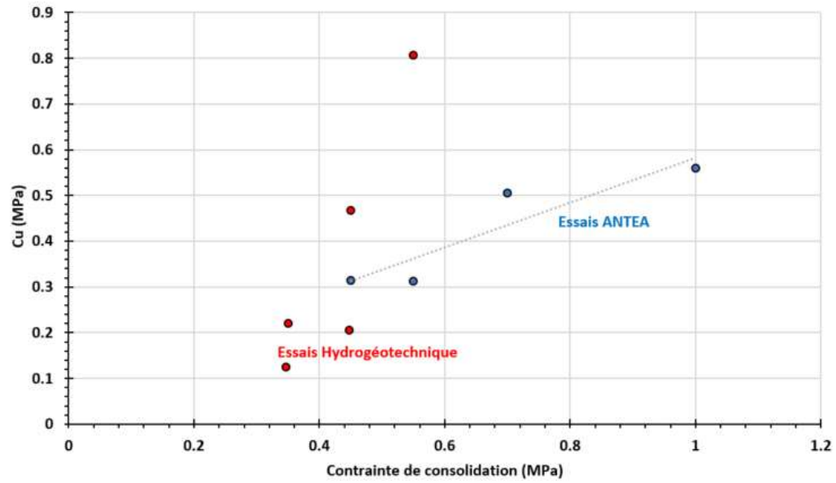


Figure 15 : Marnes d'Argenteuil – Résistances maximales en contraintes totales

On remarque qu'une éprouvette testée par Hydrogéotechnique présente une résistance très élevée. Son comportement rhéologique, à savoir les courbes contrainte/déformation axiale et pression interstitielle/déformation axiale, paraissent physiques, avec un comportement apparent qui est cependant plus fragile que pour les autres éprouvettes (*alors que la contrainte de confinement est plus élevée, ce qui devrait conduire à un comportement plus ductile*).

La description des éprouvettes fait référence à des "petits bancs de gypse", ce qui peut laisser penser que l'essai a été réalisé sur un échantillon plus induré et cohésif.

Pour la suite de l'interprétation, il est donc proposé d'écarter cette mesure.

La figure suivante présente l'ensemble des mesures exploitées (*ANTEA + Hydrogéotechnique*). Les estimations de la cohésion non-drainée CU sont alors les suivantes :

- Essais ANTEA: Cu=93 kPa
- Essais ANTEA + Hydrogéotechnique: Cu=27 kPa

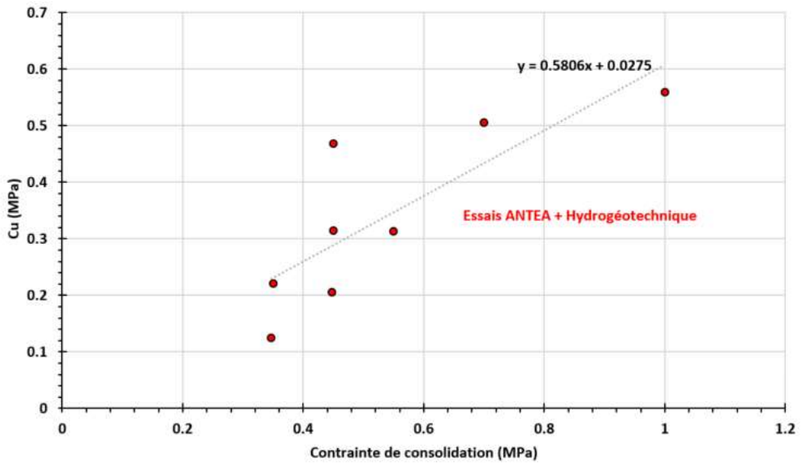


Figure 16 : Marnes d'Argenteuil – Résistances maximales en contraintes totales

Prendre la totalité des mesures conduit à une cohésion non-drainée relativement faible de 27 kPa. Cette valeur parait beaucoup plus faible que ce qui a pu être mesuré par ailleurs.

Une valeur plus représentative serait de l'ordre de 100 kPa, comme retenu dans le cadre des études de la ligne 15 Sud de la SGP. Cette cohésion serait cohérente avec les mesures pressiométriques interprétés sur la base de la corrélation proposée par Cassan.

Enfin, cet ordre de grandeur serait aussi en cohérence avec les essais ANTEA incitant à retenir une cohésion de l'ordre de 93 kPa.

En conclusion, nous proposons de retenir une valeur représentative Cu=93 kPa.

5.3.2 Interprétation en conditions drainées

Les évolutions des pressions interstitielles étant mesurées pendant le cisaillement des échantillons (CU+U), il est possible d'interpréter les essais en conditions de contraintes effectives. La figure suivante présente les points expérimentaux dans le plan de Lambe (s',t). Sur ce graphique, sont représentés les points expérimentaux issus des essais faits par ANTEA (en bleu) ainsi que par Hydrogéotechnique en rouge).

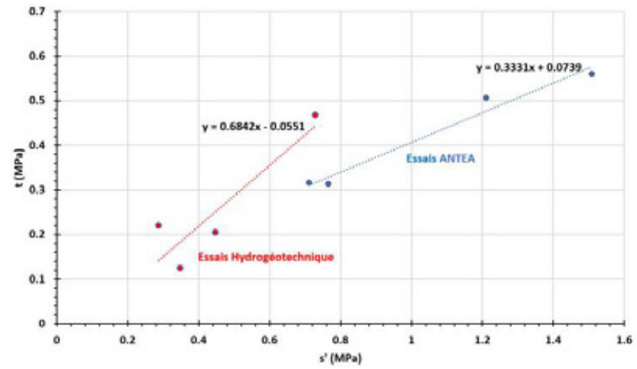


Figure 17 : Marnes d'Argenteuil – Résistances maximales en contraintes effectives

En considérant l'ensemble des mesures, en écartant cependant la mesure d'Hydrogéotechnique fournissant la résistance la plus élevée, le critère de résistance maximale dans le plan de Lambe peut s'écrire:

$$\mathrm{t(MPa)} = 0.34\, s'(\mathrm{MPa}) + 0.064$$

ϕ'=20° C'=68 kPa

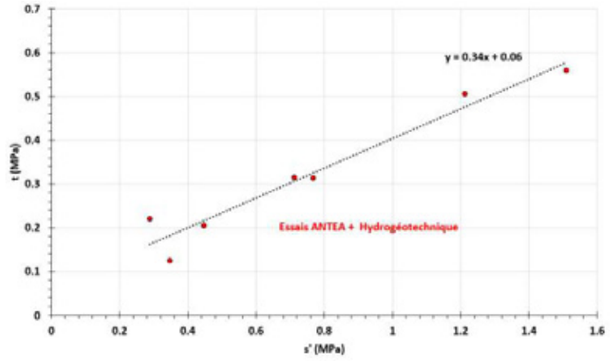


Figure 18 : Marnes d'Argenteuil – Résistances maximales en contraintes effectives

Les valeurs retrouvées par ailleurs fournissent les propriétés suivantes : ϕ'=20° et C'=15 kPa. La cohésion parait relativement faible, d'autant plus que certains essais fournissent des cohésion effectives C' de l'ordre de 40 kPa.

Nous proposons de garder comme estimation de la cohésion une valeur de 68 kPa.

6. Synthèse des paramètres d'état et caractéristiques mécaniques

Les paramètres d'état et d'identification, ainsi que les propriétés mécaniques, issus des campagnes de reconnaissances réalisées successivement par Hydrogéotechnique puis ANTEA, sont synthétisées dans le tableau 8 pour les Argiles vertes, les marnes de Pantin et les marnes bleues d'Argenteuil.

Ces valeurs découlent de l'interprétation des essais, pour lesquelles certaines valeurs ont été écartées. Ces valeurs sont aussi définies en cohérence avec les connaissances déjà disponibles sur ces matériaux.

Paramètres	Argile Verte GV	Marne Blanche de Pantin MP	Marne Bleue d'Argenteuil MA
Teneur en eau moyenne	30 %	27 %	30 %
Limite de Liquidité Wl	76 %	48 %	89 %
Limite de Plasticité Wp	41 %	30 %	37 %
Indice de Plasticité Ip	35 %	18 %	52 %
Indice de Consistance Ic	1.2	1.0	1.15
Densité sèche γd	14 kN/m^3	14.8 kN/m^3	14.3 kN/m^3
Cohésion non Drainée Cu	60 kPa	100 kPa	93 kPa
Angle ϕ_{cu}	18°	28°	26°
Cohésion effective C'	29 kPa	23 kPa	68 kPa
Angle de frottement ϕ'	19°	29°	20°

Tableau 8 : Valeurs caractéristiques proposées à partir de l'analyse des essais

Le tableau 9 fournit une comparaison des paramètres identifiés à partir des prélèvements récents réalisés sur site avec les données retenues dans le cadre de l'étude LREP de 1984 [8].

Pour les argiles vertes, les angles de frottement sont similaires, mais les cohésions obtenues sur la base de l'exploitation des essais ANTEA sont plus élevées que celles considérées antérieurement.

Concernant les marnes Blanches de Pantin, les valeurs mesurées sont similaires en ordre de grandeur, aussi bien pour les cohésions que pour les angles de frottement.

Pour les marnes Bleues d'Argenteuil, la cohésion mesurée est plus importante que celle considérée dans les études LREP de 1984. Il faut toutefois rappeler que cette valeur de 25 kPa retenue dans cette note de 1984 ne découlait pas d'essais géotechniques sur échantillons, mais du retour d'expérience de l'époque, à savoir que les talus étaient stables avec une pente de 1/1 dans les marnes supragypseuses, et donc que la cohésion était *a minima* supérieure à 25 kPa (valeur de cohésion fournissant dans les études d'alors un coefficient de sécurité de 1) [8].

Paramètres	Argile Verte GV		Marne Blanche de Pantin MP		Marne Bleue d'Argenteuil MA	
Teneur en eau moyenne	Essais 2020	LREP 84	Essais 2020	LREP 84	Essais 2020	LREP 84
Poids volumique saturé	23 kN/m^3	20 kN/m^3	24 kN/m^3	20 kN/m^3	24 kN/m^3	20 kN/m^3
Cohésion effective C'	29 kPa	10 kPa	23 kPa	25 kPa	68 kPa	25 kPa
Angle de frottement ϕ'	19°	18°	29°	30°	20°	26°

Tableau 9 : Comparaison des valeurs caractéristiques proposées avec celles utilisées en 1984

Le tableau 10 présente la comparaison entre les valeurs issues des récents essais de laboratoire et les caractéristiques découlant de la rétro-analyse sur le glissement observé, par BG en 2019 [Ref: 1].

Paramètres	Argile Verte GV		Marne Blanche de Pantin MP		Marne Bleue d'Argenteuil MA	
Teneur en eau moyenne	Essais 2020	BG 2019	Essais 2020	BG 2019	Essais 2020	BG 2019
Poids volumique saturé	23 kN/m^3	20 kN/m^3	24 kN/m^3	20 kN/m^3	24 kN/m^3	20 kN/m^3
Cohésion effective C'	29 kPa	2 kPa	23 kPa	5 kPa	68 kPa	55 kPa
Angle de frottement ϕ'	19°	18°	29°	30°	20°	26°

Tableau 10 : Comparaison des valeurs caractéristiques proposées avec découlant de l'étude BG2019 [Ref 1]

Les différences les plus notables portent sur les valeurs des cohésions retenues pour les argiles vertes et pour les marnes de Pantin.

Ces comparaisons illustrent parfaitement que la plus forte incertitude porte sur les valeurs à retenir pour la cohésion. A noter que la valeur de la cohésion est généralement fortement influencée dans ces matériaux argileux par la teneur en eau et donc la dessaturation, les phénomènes de dégradation météorique et en particulier les cycles hydriques, les mouvements pouvant s'initier… Ceci est particulièrement significatif dans le cas des argiles vertes très sensibles à la présence d'eau.

7. Piézométrie

D'après la synthèse BURGEAP [5], il existe une nappe dans le calcaire de Brie (figure 18) situé dans la zone du fort de Vaujours. Des relevés piézomètriques peuvent nous permettre de vérifier cela.

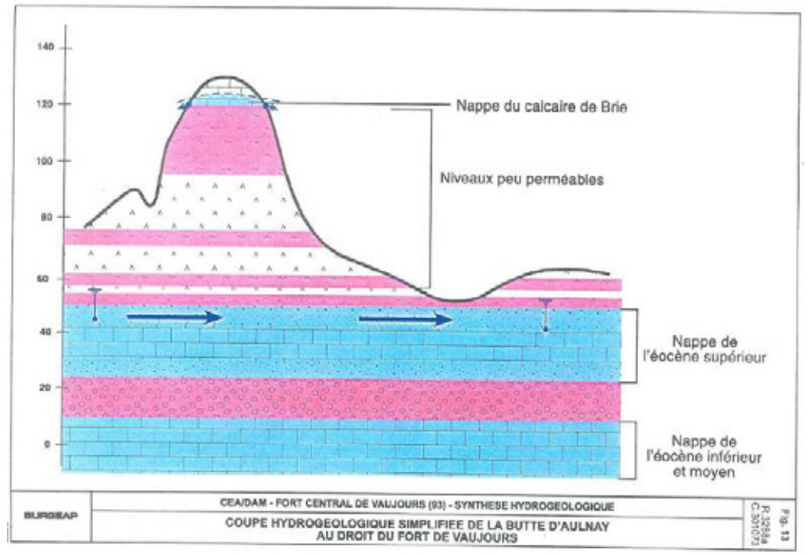


Figure 19 : Coupe hydrogéologique simplifiée au droit du fort de Vaujours

7.1 Piézomètre "PLACO"

Un plan de repérage des piézomètres dans la zone est présenté ci-dessous [4] :

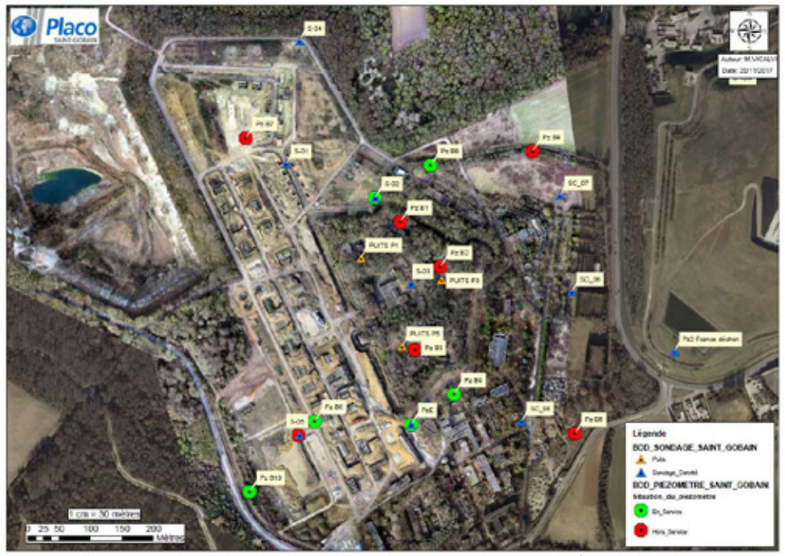


Figure 20 : Localisation des piézomètres dans la zone du fort de Vaujours

Les seules données disponibles qui s'étendent sur la période 2016-2019 sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Année	Date	niveau (m)			
		PzB6 (AE792)	PZB8	PZB9 (AE723)	PZB10 (AE871)
2016	28/04/2016	4.95			
	20/10/2016	5.70			
2017	25/04/2017	5.4			
	24/05/2017	5.5			
	08/06/2017	5.55			
	juil-17	5.45			
	août-17	5.7			
	sept-17	5.47			
	oct-17	5.56			
	nov-17	5.44			
	déc-17	Mesure Diver: 5,38	Pas d'eau	Mesure Diver: 7,25	Mesure Diver: 3,3
2018	janv-18	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	févr-18	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	mars-18	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	avr-18	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	mai-18	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	juin-18	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	juil-18	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	août-18	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	sept-18	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	oct-18	5.7	Pas d'eau	7.55	4.3
	nov-18	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	déc-18	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
2019	janv-19	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	févr-19	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	mars-19	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	avr-19	5.05	Pas d'eau	6.63	3.9
	mai-19	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	juin-19	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	juil-19	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	août-19	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	sept-19	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	oct-19	5.78	Pas d'eau	7.61	Mesure Diver
	nov-19	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Pas d'eau
	déc-19	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
2020	janv-20	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	févr-20	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	mars-20	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	juil-20	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	août-20	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	sept-20	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	oct-20	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	nov-20	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver
	déc-20	Mesure Diver	Pas d'eau	Mesure Diver	Mesure Diver

Tableau 11 : Mesures piézométriques dans la zone du fort de Vaujours

Les piézomètres PzB6, PzB9 et PzB10 indiquent la présence d'eau à quelques mètres de profondeur, la synthétisation de ces informations conduit au tableau suivant :

	PzB6	**PzB9**	**PzB10**
Profondeur / TN	[4.95 m ; 5.78 m]	[6.63 m ; 7.61 m]	[3.9 m ; 4.3 m]
Profondeur moyenne / TN	5.5 m	7.3 m	4.1 m
Écart type	0.25 m	0.55 m	0.28 m
Nombre de mesures	14	4	3

Tableau 12: Relevés des piézomètres PzB6, PzB9 et PzB10

Ces informations nous permettent d'appréhender le contexte hydrogéologique de la zone, toutefois, les données sont anciennes et ne sont pas au droit ou à proximité immédiate du talus. La détermination d'une nappe peut être fiabilisée éventuellement à l'aide des piézomètres Hydrogéotechnique.

7.2 Piézomètre HG

Pour rappel, deux piézomètres Hydrogéotechnique ont été installées au droit du talus étudié, le tableau ci-dessous indique les caractéristiques de ces piézomètres, notamment sur leurs longueurs :

Sondages	RGF93 CC49		Cote (NGF)	Type	Prof. (m)	Équipement piezo	Équipement inclino
	X	Y	Z				
Incl1	1669987.26	8191824.09	121.21	Carotté + Inclinomètre	31	/	31
Pz2	1669985.24	8191823.89	121.08	Destructif + Pz	10.5	10.5	/
Pz3	1669989.37	8191824.11	121.16	Destructif + Pz	4.5	4.5	/

Les coordonnées (X ; Y) des points de sondage sont exprimées en coordonnées RGF93 - CC49. Le nivellement (Z) est exprimé en NGF - IGN69. Les coordonnées X, Y et Z des points de sondage ont été déterminées à l'aide d'un GPS de précision centimétrique.

Tableau 13 : caractéristiques des piézomètres HG installés (extrait du rapport [2])

Ces piézomètres constituent un grand intérêt du fait de leurs positions. Ces derniers sont équipés de capteurs de pression, le principe est de convertir les mesures électriques (mA) en kPa. S'agissant d'un capteur relatif auto-compensé, à l'atmosphère il indique 0.00 kPa soit pour 1 kPa = 10 cm de colonne d'eau.

- Le PZ 2 est un piézomètre long ancré de 2.05 m dans les marnes blanches, il traverse donc les argiles vertes. Il est crépiné entre 6.8 et 9.8, en tête des marnes blanche de Pantin, à l'interface avec les argiles vertes.
- Le PZ3 (ou PZ1 dans le cadre des mesures actuelles) est un piézomètre court ancré dans les argiles vertes, et crépiné entre 3.50m et 4.50m.

Le piézomètre PZ1 est positionné dans les argiles vertes qui sont par nature, si elles ne sont pas altérées, très imperméables, avec des perméabilités de l'ordre de 10^{-9} m/s. Si ces argiles sont très probablement saturées, elles ne sont pas le siège d'une nappe phréatique dans leur masse qui peut varier dans ce niveau, sauf au droit d'horizons potentiellement plus perméables. Le niveau piézométrique dans ce matériau est alors imposé par la nappe de surface qui pourrait baigner dans le calcaire de Brie. Si le piézomètre est correctement réalisé et étanché, ce qui semble être le cas, il est normal que ce piézomètre ouvert ne mesure aucun niveau d'eau.

Le piézomètre PZ2 est beaucoup plus intéressant. Il a été positionné à la base des argiles vertes, au droit d'une zone qui paraissait moins argileuse, plus graveleuse ou grumeleuse. Le log du sondeur identifie cette couche de 40cm d'épaisseur environ comme "*une marne blanche crème grumeleuse à cailloux et cailloutis de calcaire (Marabet?)*".

Ce niveau pourrait effectivement correspondre à un lit de gypse cristallisé sous forme de prismes tronqué, qui est bien identifié dans la zone de Vaujours par la carte géologique du BRGM pour la région de Lagny. On retrouve aussi ce type de faciès à ces profondeurs, à l'interface entre la base des argiles vertes, correspondant à ce qui est appelé "les glaises à Cyrène" (*argile feuilletée, légèrement sableuse, verdâtre à blanchatre ou rousse, avec quelques éléments de gypse*) et les marnes de Pantin, sur un autre sondage d'ANTEA, le SC-AIG-3, à environ 10m de profondeur.

La figure suivante montre cette couche de matériau qui serait *a priori* plus perméable que les argiles vertes et à Cyrène, mais aussi que les marnes de Pantin. On notera aussi que la présence de cette

couche spécifique est visible sur les enregistrements de forage du sondage destructif du PZ2 (figure 21).

Figure 21 : Horizon de marne gypseuse ou grumeleuse à la base des argiles à Cyrènes

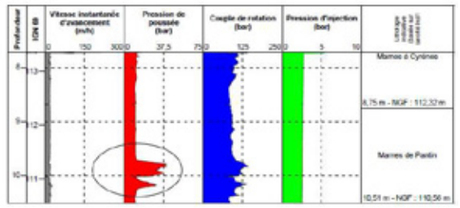


Figure 22 : Horizon de marne gypseuse ou grumeleuse à la base des argiles à Cyrènes identifiée par les paramètres de forage

Il s'avère effectivement que sur les derniers mois, seul le piézomètre PZ2 a réagi, comme le montrent les enregistrements présentés en figure 22.

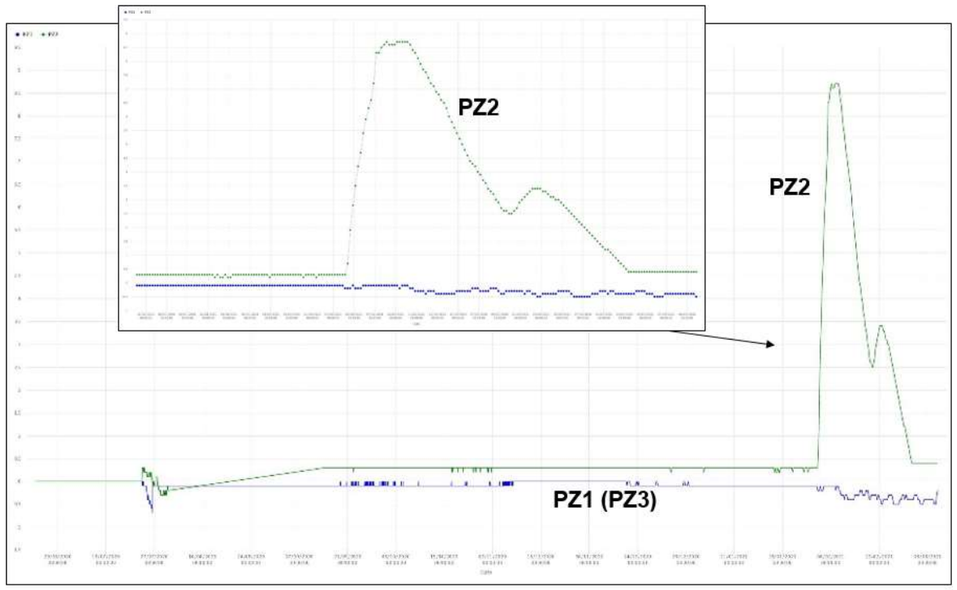


Figure 23 : Mesures des piézomètres PZ1 et PZ2 au cours des derniers mois

Il a présenté une hausse d'environ 9 kPa entre le 3 et 5 février, ce qui correspond à 90 cm d'eau puis un retour progressif tout au long du mois de mars vers une hauteur de 5 cm d'eau.

Une hypothèse est que cette observation peut éventuellement être corrélée avec la pluviométrie de la zone. Il a effectivement beaucoup plu sur la région parisienne dans les derniers jours de janvier 2021

et les premiers jours de février 2021 (*environ 75mm entre le 28 janvier et le 6 février*). Toutefois, ces pluies ne sont pas exceptionnelles et de tels niveaux avaient été atteints en octobre 2020 ou encore en décembre 2020, sans que le piézomètre ne réagisse.

Il sera intéressant de suivre les fluctuations du piézomètre PZ2 au cours des prochains mois et lors des épisodes pluvieux qui pourraient survenir.

L'origine de ces infiltrations n'est pas identifiée à ce stade. On notera toutefois que des documents du BRGM (Annexe carte géologique de la zone) font effectivement référence à la présence de petites nappes suspendues au sein ou à la base des argiles vertes pouvant entrainer des phénomènes de glissement ou de fluage des couches sus-jacentes.

8. Conclusions

L'objectif principal de ce document était de faire une analyse et une synthèse des données géotechniques et piézométriques, basées sur les récentes investigations réalisées au voisinage de la fosse d'Aiguisy.

Les résultats de ces reconnaissances et des essais de laboratoire réalisés sur les 3 principaux faciès géologiques potentiellement concernés par le mécanisme d'instabilité observé, sont détaillées et interprétés. Les valeurs caractéristiques identifiées pour les résistances mécaniques de ces 3 terrains sont ensuite comparées aux paramètres initialement retenus dans l'étude antérieure réalisée par BG [1]. Les valeurs alors considérées étaient justifiées à partir de données bibliographiques et n'étaient pas basées sur des essais effectués sur des matériaux prélevés sur ce site.

Il s'avère que les paramètres issus des récentes investigations sont cohérents avec les paramètres retenus dans l'étude [1]. Cette comparaison est reportée dans le tableau 9. On observe, en particulier pour les argiles vertes et pour les marnes Blanches de Pantin

- Des valeurs similaires pour les angles de frottement exprimés en contraintes effectives. Cet angle serait de l'ordre de 19° pour les argiles vertes et de 30° pour les marnes de Pantin.
- La cohésion est par contre différente entre celle issue des récentes reconnaissances et celles retenue initialement pour les argiles vertes; 29 kPa pour les dernières investigations et 10 kPa pour les études antérieures.

Il n'est pas surprenant, pour ces argiles qui sont sensibles à l'eau et au remaniement lors du prélèvement et de la procédure d'essai, de trouver des différences sur les cohésions. La cohésion, sur ce type de matériau, est très fortement influencée par l'état de l'argile, sa microfissuration pouvant découler du prélèvement ou d'une dessaturation partielle, et donc par sa teneur en eau.

Annexe 1 : programme laboratoire

Programme laboratoire HYDROGEOTECHNIQUE :

ESSAIS D'IDENTIFICATION			Stratigraphie	Classification	Teneur en eau	Teneur en eau	Valeur au bleu	Densité (T/m³)		Granulométrie par tamisage								Sédimentométrie	Limites d'Atterberg		
			-	11-300	94-050	94-050	94-068	94-053Sols		94-056								94-057	94-051		
										% de passant											
Sondages	Prof (m)	Nature	RA	GTR	W% (0/D)	W% (0/20)	VBS	rh	rd	Dmax (mm)	50 mm	20 mm	5 mm	2 mm	400 µm	80 µm	2 µm	wL %	IP	IC
INCL1	1,5-1,8	Argile ocre-brun à cailloux et cailloutis de silex	Alt Brie ?	A4	26,2	28,2	-	1,89	1,46	-	100	93	68	64	61	58	29,6	77	47	-
INCL1	4,5-5,25	Argile verte à morceaux de racines, cailloux et cailloutis	Argile verte	A3m	27,6	27,7	-	1,95	1,50	-	100	99	99	99	99	98,3	60,6	69	36	1,14
INCL1	7,50-8,75	Argile verte-marron	Marnes à Cyrènes	A4	27,7	27,7	-	1,87	1,49	-	100	100	100	100	100	99,5	56,9	75	45	1,06
INCL1	8,75-9,00	Marne beige	Marnes blanches	A1	29,4	29,4	0,29	1,87	1,49	-	100	100	100	100	100	95,5	-	-	-	-
INCL1	12,25-13,00	Marne argileuse gris-beige à cailloux et cailloutis calcaires	Marnes blanches	A4	25,6	25,7	-	1,98	1,53	-	100	100	99	99	98	96,3	43,5	78	45	1,16
INCL1	18,00-18,90	Argile verte-gris	Marnes d'Argenteuil	A4	34,5	34,5	-	1,88	1,39	-	100	100	100	100	100	99,7	66,0	87	53	1
INCL1	19,5-21,0	Marne gris-bleu	-	A4	28,0	28,0	-	1,88	1,47	-	100	100	100	100	100	99,7	66,0	88	54	1,11
INCL1	27,6-28,0	Marne beige	Marnes d'Argenteuil	A2	34,0	34,0	3,27	1,86	1,38	-	100	100	100	100	100	99,8	-	-	-	-

ESSAIS D'IDENTIFICATION			Stratigraphie	Classification	Essai de compressibilité à l'oedomètre		Essai consolidé non drainé CU + u à l'appareil triaxial		Essai de cisaillement rectiligne à la boite	
			-	11-300	94-090-1		94-074		94-071-1	
Sondages	Prof (m)	Nature	RA	GTR	Cs	Cc	C' (kPa)	φ' (°)	C' (kPa)	φ' (°)
INCL1	1,5-1,8	Argile ocre-brun à cailloux et cailloutis de silex	Alt Brie ?	A4	0,02	0,114	-	-	-	-
INCL1	4,5-5,25	Argile verte à morceaux de racines, cailloux et cailloutis	Argile verte	A3m	-	-	17	5,2	-	-
INCL1	7,50-8,75	Argile verte-marron	Marnes à Cyrènes	A4	-	-	-	-	10	20,6
INCL1	14,50	Marne grise-bleue	Marnes blanches	-			0	24,6		
INCL1	19,5-21,0	Marne gris-bleu	Marnes d'Argenteuil	A4	-	-	-	-	17	26,8
INCL1	27,50	Marne beige à petits bancs de gypse	Marnes d'Argenteuil	-	-	-	74	33,2		

Programme laboratoire ANTEA (actualisé au 23/02/21) :

Code		S 1014	S 102	S 103	S 105				S 602			
	Intitulé	Photographie d'échantillon	Teneur en eau pondérale NF P94-050	Masse volumique sèche du sol NF P94-053	Limite d'Atterberg (liquidité et plasticité) NF P94-051				Triaxial CU+U avec D = 35 mm NF P94-074/NF P94-070			
	Symbole	Photo	W_n	ρd	W_L	W_P	IP	IC	C'	φ'	λ_{CU}	Cu_{50}
Référence de l'échantillon / nature	Unité	(-)	(%)	(Mg/m³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(kPa)	(°)		(kPa)
SC-AIG-1_1 de 0.00 à 1.90 m		Oui										
SC-AIG-1_2 de 1.90 à 3.40 m		Oui										
SC-AIG-1_3 de 3.40 à 4.85 m		Oui										
SC-AIG-1_4 de 4.85 à 6.30 m		Oui										
SC-AIG-1_5 de 6.30 à 7.60 m		Oui										
SC-AIG-1_6 de 7.60 à 8.95 m [H+0.00 à 0.30 m] Argile verte ferme à plastique. Présence de marbrures ocre à orangées.		Oui	28.8	1.50	75	42	33	1.4	48	15	0.24	66
SC-AIG-1_7 de 8.95 à 10.40 m		Oui										
SC-AIG-1_8 de 10.40 à 11.20 m		Oui										
SC-AIG-1_8b de 11.20 à 11.70 m [H+0.00 à 0.30 m] Marne argileuse ferme peu plastique, blanchâtre.		Oui	27.3	1.47	46	29	17	1.1	(*)	(*)	(*)	(*)
SC-AIG-1_9 de 11.70 à 12.90 m		Oui										
SC-AIG-1_10 de 12.90 à 14.40 m		Oui	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
SC-AIG-1_11 de 14.40 à 14.85 m		Oui										
SC-AIG-2_1 de 0.00 à 1.00 m		Oui										
SC-AIG-2_2 de 1.00 à 2.00 m		Oui										
SC-AIG-2_3 de 2.00 à 3.05 m		Oui										
SC-AIG-2_4 de 3.05 à 3.55 m		Oui										
SC-AIG-2_5 de 3.55 à 4.20 m		Oui										
SC-AIG-2_6 de 4.20 à 4.95 m		Oui										
SC-AIG-2_7 de 4.95 à 6.40 m		Oui										
SC-AIG-2_8 de 6.40 à 6.65 m		Oui										
SC-AIG-2_9 de 6.65 à 8.05 m [H+0.10 à 0.40 m] Argile plastique verdâtre à marbrures kakis.		Oui	40.6	1.27	83	37	46	0.9	5	23	0.53	5
SC-AIG-2_10 de 8.05 à 9.60 m		Oui										
SC-AIG-2_11 de 9.60 à 11.00 m		Oui										
SC-AIG-2_12 de 11.00 à 12.45 m		Oui										
SC-AIG-2_13 de 12.45 à 13.95 m		Oui										
SC-AIG-2_14 de 13.95 à 14.85 m		Oui										
SC-AIG-2_15 de 14.85 à 16.35 m		Oui										
SC-AIG-2_16 de 16.35 à 17.25 m		Oui										
SC-AIG-2_17 de 17.25 à 18.70 m		Oui										
SC-AIG-2_18 de 18.70 à 20.20 m		Oui										
SC-AIG-2_19 de 20.20 à 21.40 m [H+0.75 à 1.05 m] Marne argileuse litée, ferme et cassante, grisâtre.		Oui	30.0	1.44	94	43	51	1.3	82	19	0.49	93
SC-AIG-2_20 de 21.40 à 22.80 m		Oui										
SC-AIG-2_21 de 22.80 à 24.30 m [H+0.70 à 1.00 m] Marne argileuse litée, ferme et cassante, grisâtre.		Oui	31.8	1.39	97	41	56	1.2	(*)	(*)	(*)	(*)
SC-AIG-2_22 de 24.30 à 25.60 m		Oui										
SC-AIG-3_1 de 0.00 à 1.20 m		Oui										
SC-AIG-3_2 de 1.20 à 2.05 m		Oui										
SC-AIG-3_3 de 2.05 à 2.60 m		Oui										
SC-AIG-3_4 de 2.60 à 3.50 m		Oui										
SC-AIG-3_5 de 3.50 à 4.70 m		Oui										
SC-AIG-3_6 de 4.70 à 6.15 m [H+0.90 à 1.20 m] Argile verte ferme à plastique.		Oui	28.8	1.47	79	42	37	1.4	21	17	0.37	16
SC-AIG-3_7 de 6.15 à 7.40 m		Oui										
SC-AIG-3_8 de 7.40 à 8.90 m		Oui										
SC-AIG-3_9 de 8.90 à 10.35 m [H+1.05 à 1.35 m] Alternance de lits d'argile marneux centimétrique très peu plastique, beige grisâtre, et de lits millimétrique de sable fin carbonaté, jaunâtre.		Oui	29.5	1.41	76	38	38	1.2	(*)	(*)	(*)	(*)
SC-AIG-3_10 de 10.35 à 10.65 m		Oui										
SC-AIG-3_11 de 10.65 à 12.10 m [H+0.35 à 0.60 m] Marne ferme peu plastique, blanchâtre.		Oui	24.0	1.48	51	32	19	1.4	(*)	(*)	(*)	(*)
SC-AIG-3_12 de 12.10 à 13.45 m		Oui										
SC-AIG-3_13 de 13.45 à 14.70 m		Oui										
SC-AIG-4_1 de 0.00 à 2.00 m		Oui										

SC-AIG-4_2 de 2.00 à 3.27 m	Oui											
SC-AIG-4_3 de 3.27 à 4.58 m [H+0.60 à 0.90 m] Argile ferme à plastique, verte à marbrures ocre.	Oui	31.6	1.44	83	47	36	1.4	40	19	0.39	74
SC-AIG-4_4 de 4.58 à 6.15 m	Oui										
SC-AIG-4_5 de 6.15 à 7.38 m	Oui										
SC-AIG-4_6 de 7.38 à 8.85 m	Oui										
SC-AIG-4_7 de 8.85 à 10.29 m [H+0.40 à 0.65 m] Alternance de lits de marne argileuse centimétriques peu plastique et cassante, beige, et de lits de sable carbonaté inframillimétrique.	Oui	28.5	1.48	72	37	35	1.2	(*)	(*)	(*)	(*)

(*) : Essai non réalisable compte tenu de l'état de fracturation de l'échantillon ou de la forte hétérogénéité de la lithologie.
(*) : Essai en cours.
Résultats communiqués à titre provisoire, essai interprété sur 3 éprouvettes. Une éprouvette supplémentaire est cours d'essai.

PLACOPLATRE
Annexes de l'étude d'impact
Vaujours, Coubron (93) et Courtry (77)
Mars 2022
Cabinet GREUZAT PARTIE 1.2

ANNEXE 8 - ANALYSE DES CONDITIONS DE STABILITÉ DU TALUS (BG)

BG

200030.26_RN002.b

Placo SAINT-GOBAIN

PLACOPLATRE – FOSSE D'AIGUISY

ANALYSE DES CONDITIONS DE STABILITÉ DU TALUS

BG Ingénieurs Conseils SAS
114 Boulevard Wilson, BP 30233 - F-73102 Aix-les-Bains Cedex
Siège social: Immeuble METROSUD, 1, bd Hippolyte Marques - 94200 Ivry sur Seine - SAS au capital de 1 516 800 €
R.C.S Créteil 2007B04453 - SIRET 303 559 249 00196 - Code APE 7112B
T +33 4 79 35 05 36 **– F** +33 4 79 61 49 90 **–** aixlesbains@bg-21.com **–** www.bg-21.com
FR 493 035 592 49 TVA

■ INGENIOUS SOLUTIONS

VERSION	-	Version a	Version b
DOCUMENT	200030.26-RN002	200030.26-RN002a	200030.26-RN002b
DATE	07 mai 2021	20 mai 2021	28 mai 2021
ELABORATION	François LAIGLE -Magid RAMDANI	François LAIGLE -Magid RAMDANI	François LAIGLE -Magid RAMDANI
VISA	Nathalie MONIN	Nathalie MONIN	Nathalie MONIN
COLLABORATION			
DISTRIBUTION	Nicolas Petit, François Martin	Nicolas Petit, François Martin	Nicolas Petit, François Martin

TABLE DES MATIÈRES

		Page
1.	**Introduction**	**3**
2.	**Rappel du contexte**	**3**
3.	**Modèle géologique et géotechnique**	**4**
4.	**Rappel des caractéristiques géomécaniques**	**5**
4.1	Paramètres d'état et caractéristiques mécaniques de l'argile verte	5
4.1.1	Caractéristiques des argiles vertes	5
4.1.2	Paramètres de gonflement des argiles vertes	5
4.2	Paramètres d'état et caractéristiques mécaniques des marnes de Pantin et d'Argenteuil	6
4.3	Caractéristiques mécaniques du calcaire de Brie	7
5.	**Étude des conditions de stabilité**	**7**
5.1	Modèle géométrique et lithologique	7
5.2	Paramètres géotechniques	8
5.3	Hypothèses de calcul	8
5.4	Calculs en contraintes totales	9
5.4.1	Évolution du Coefficient de sécurité	10
5.5	Calculs en contraintes effectives	10
5.5.1	Conditions de stabilité sans nappe phréatique	10
5.5.2	Influence de la piézométrie sur les conditions de stabilité	11
5.5.3	Influence des propriétés mécaniques sur les conditions de stabilité	13
5.6	Conclusions relatives aux calculs de glissement	14
6.	**Analyse des causes de l'instabilité locale**	**15**
6.1	Phénomène d'altération progressive des Argiles Vertes	16
6.2	Mécanisme de ravinement de surface des argiles vertes	19
6.3	Mécanisme d'instabilité par glissement des argiles vertes	20
6.3.1	Réduction des propriétés	20
6.3.2	Cinétique d'évolution de la dégradation de l'argile verte	20
6.3.3	Influence d'une piézométrie locale	21
6.3.4	Existence de niveaux aquifères au sein des Argiles Vertes	22
6.4	Origines possibles des venues d'eau	23

7.	**Conclusions**	**25**
8.	**Références**	**26**

1. Introduction

Ce rapport constitue la deuxième phase de l'étude réalisée par BG Ingénieurs Conseils pour analyser, comprendre et justifier de développement d'une instabilité locale au droit de la fosse d'Aiguisy.

Des rapports de Tierce-Expertises réalisées par INERIS [1; 2] préconisaient :

1. D'appuyer ces analyses sur des caractéristiques de terrains issues de reconnaissances géotechniques et d'essais de laboratoire, et non pas uniquement sur des données bibliographiques.
2. De réaliser un diagnostic de ce glissement sur la base de calculs n'intégrant pas de coefficients de sécurité partiels sur les propriétés retenus et justifiées à partir des essais.
3. De prendre en compte la présence d'eau dans les terrains, correspondant à la présence de la nappe phréatique de surface dans le travertin de Brie et éventuellement en profondeur au droit d'horizons particuliers.
4. De justifier la résistance en cisaillement fortement dégradée des argiles vertes qu'il serait nécessaire d'introduire dans les calculs pour retrouver l'instabilité observée.

Suite à ces rapports d'expertise de l'INERIS, des investigations géotechniques ont été réalisées en 2020 et 2021, comprenant des sondages carottés, des sondages destructifs pour l'installation de piézomètres et des essais de laboratoire. Ces investigations ont tout d'abord été réalisées par Hydrogéotechnique [3], puis par ANTEA [4] sur la base de prélèvements effectués en sondages par l'entreprise Terra-Expertise.

Cette campagne de reconnaissances a été analysée et interprétée par BG dans une note précédente [5] diffusée en avril 2021. Ce rapport avait comme objectif de répondre au point 1 des commentaires de l'INERIS, consistant à définir des propriétés géotechniques représentatives du site d'Aiguisy. Les conclusions de cette note constituent une partie des données d'entrée de ce 2eme rapport.

Le présent document a donc pour objectif de répondre aux 3 autres items soulevés par la Tierce-Expertise, à savoir :

- Reprendre les calculs d'équilibre limite du versant en l'absence de toute pondération des paramètres et/ou sollicitations.
- Analyser l'effet d'une nappe phréatique sur les conditions de stabilité de ce talus.
- Proposer une justification de l'instabilité observée spécifiquement dans cette zone.

2. Rappel du contexte

En octobre 2018, une loupe de glissement a été observée à l'angle Sud des talus de découverte de la fosse d'Aiguisy, qui n'est plus exploitée depuis 2004. Cette loupe se situe à proximité de la route RD 129, qui est localisée à environ 22m en arrière de la crête du talus, dans cette zone. Elle affecte la moitié supérieure du talus, au niveau de la couche des Argiles Vertes. Haut d'une quinzaine de mètres, ce glissement évoluait alors en période hivernale, sur une largeur d'environ 40m.

En 2019, un bâchage de la loupe de glissement a été réalisé de manière à réduire le phénomène d'érosion de surface qui est susceptible de provoquer une dégradation rapide de l'argile verte. Cette bâche est actuellement en place et visible sur la photo aérienne suivante.

Figure 1: Vue de la fosse d'Aiguisy et localisation de la loupe de glissement

3. Modèle géologique et géotechnique

Au droit de la zone étudiée, et globalement sur l'ensemble du site, la stratigraphie (figure 2) est composée des couches suivantes :

- Formations récentes et Terre Végétale
- Calcaire de Brie, sur une épaisseur de l'ordre de 2m ;
- L'argile verte, d'une épaisseur de l'ordre de 6 à 8m.
- Les marnes "blanches" de Pantin (MP) et les marnes "bleues" d'Argenteuil (MA), qui se différentient essentiellement par leur couleur, mais qui présentent des caractéristiques géotechniques globalement similaires, avec une épaisseur globale sur site de l'ordre de 16m ;
- Les niveaux gypseux.

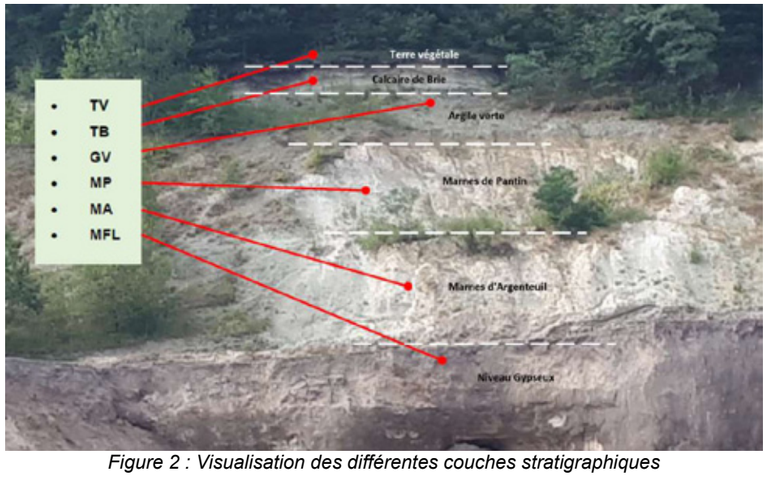


Figure 2 : Visualisation des différentes couches stratigraphiques

4. Rappel des caractéristiques géomécaniques

Les propriétés géotechniques retenues pour les calculs sont résumées ci-dessous. Elles concernent essentiellement les argiles vertes, les marnes de Pantin, et pour mémoire les marnes d'Argenteuil ; Ces dernières n'étant pas mobilisées par le glissement. Pour le calcaire de Brie, qui n'a pas été davantage investigué lors de la campagne d'essais en raison de sa position superficielle, les propriétés retenues correspondront à celles considérées dans les études antérieures.

Ces données sont extraites du rapport BG [5].

4.1 Paramètres d'état et caractéristiques mécaniques de l'argile verte

4.1.1 Caractéristiques des argiles vertes

Les paramètres d'état et de résistance mesurés pour les argiles vertes issues de la dernière campagne de reconnaissances, sont rappelés dans le tableau ci-dessous extrait de la note BG [5].

Le diagramme de Casagrande montre qu'il s'agit d'une argile très plastique.

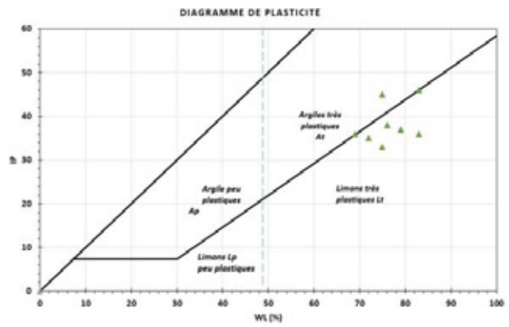


Figure 3 : Positionnement des argiles vertes sur le diagramme de Casagrande

Paramètres	Argile Verte GV
Teneur en eau moyenne	30 %
Limite de Liquidité Wl	76 %
Limite de Plasticité Wp	41 %
Indice de Plasticité Ip	35 %
Indice de Consistance Ic	1.2
Densité sèche γd	14 kN/m^3
Cohésion non Drainée Cu	60 kPa
Angle ϕ_{cu}	18°
Cohésion effective C'	29 kPa
Angle de frottement ϕ'	19°

Tableau 1 : Caractéristiques retenues pour les argiles vertes

Les argiles vertes sont une argile tertiaire formée par sédimentation. Elle a été recouverte par des formations calcaires (*Calcaire de Brie*) et par d'autres matériaux en fonction de leur localisation, comme les marnes à huitres ou les sables de Fontainebleau. Ces couches sont totalement ou partiellement érodées maintenant, alors que la couverture a pu atteindre 80 à 90m en milieu aquifère. Cette argile est donc surconsolidée, avec une contrainte de préconsolidation de l'ordre de 450 à 500 kPa. Elle peut en théorie être plus élevée, pour atteindre 800 kPa à 900 kPa.

4.1.2 Paramètres de gonflement des argiles vertes

Les argiles vertes sont réputées pour être une argile gonflante, de par leur composition minéralogique. De manière générale, pour les argiles vertes du bassin parisien, celle-ci sont composées de minéraux de Kaolinite et d'illite, de manière classique, mais aussi de plans interstratifiés d'illite/smectite, ce qui leur confère un caractère gonflant.

Le potentiel de gonflement est avéré et bien connu pour ces argiles, qui sont identifiées à risque vis-à-vis des dégradations de l'habitat par gonflement et retrait.

La figure suivante permet d'évaluer la tendance au gonflement de ces matériaux en fonction de la Limite de Liquidité et de l'Indice de Plasticité. On notera que les marnes d'Argenteuil présentent aussi un fort potentiel de gonflement, mais qui est partiellement annihilé ou limité par un taux de carbonates plus élevé que dans les Argiles Vertes. Le taux de carbonates des Argiles Vertes est généralement de l'ordre de 10 à 20%, pour une teneur de 40 à 50% pour les marnes bleues (*d'où leur définition de marne*). On notera aussi que les marnes à Cyrènes, disposées à la base des Argiles Vertes, ont des taux de 30 à 40%, ce qui les rends moins sensibles à l'eau. En effet, la présence de carbonate constitue un squelette rigide, pouvant être facilement détruit par le remaniement, mais qui à l'état naturel a tendance à "stabiliser" le matériau.

La pression de gonflement des argiles vertes est de l'ordre de 300 MPa.

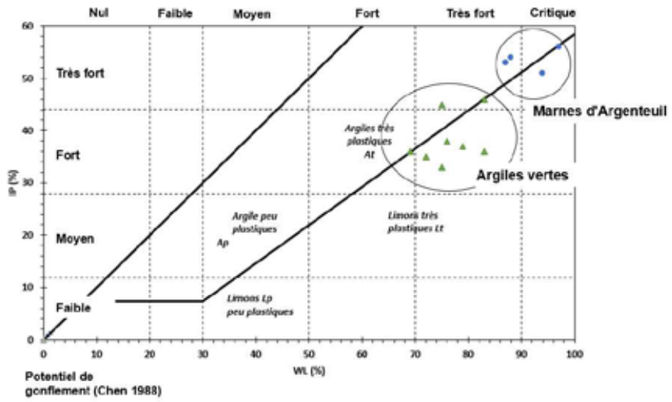


Figure 4 : Potentiel de gonflement des argiles vertes et marne d'Argenteuil selon [6] et [7]

4.2 Paramètres d'état et caractéristiques mécaniques des marnes de Pantin et d'Argenteuil

Les caractéristiques géotechniques retenues pour les marnes de Pantin et d'Argenteuil sont rappelées dans le tableau suivant extrait du rapport [5].

Paramètres	Marne Blanche de Pantin MP	Marne Bleue d'Argenteuil MA
Teneur en eau moyenne	27 %	30 %
Limite de Liquidité Wl	48 %	89 %
Limite de Plasticité Wp	30 %	37 %
Indice de Plasticité Ip	18 %	52 %
Indice de Consistance Ic	1.0	1.15
Densité sèche γd	14.8 kN/m^3	14.3 kN/m^3
Cohésion non Drainée Cu	100 kPa	93 kPa
Angle ϕ_{cu}	28°	26°
Cohésion effective C'	23 kPa	68 kPa
Angle de frottement ϕ'	29°	20°

Tableau 2 : Caractéristiques retenues pour les marnes de Pantin et d'Argenteuil

4.3 Caractéristiques mécaniques du calcaire de Brie

Les propriétés mécaniques retenues pour le calcaire de Brie sont résumées dans le tableau suivant.

Les valeurs retenues sont celles déjà proposées dans les études antérieures. Elles n'ont pas été modifiées suite aux récentes reconnaissances.

Paramètres	Calcaire de Brie
γ_h	20 kN/m^3
C'	10 kPa
ϕ'	30°

Tableau 3 : Caractéristiques retenues pour le Calcaire de Brie

5. Étude des conditions de stabilité

5.1 Modèle géométrique et lithologique

Les données topographiques à disposition permettent d'avoir un aperçu du profil du talus avant et après la loupe de glissement de 2018.

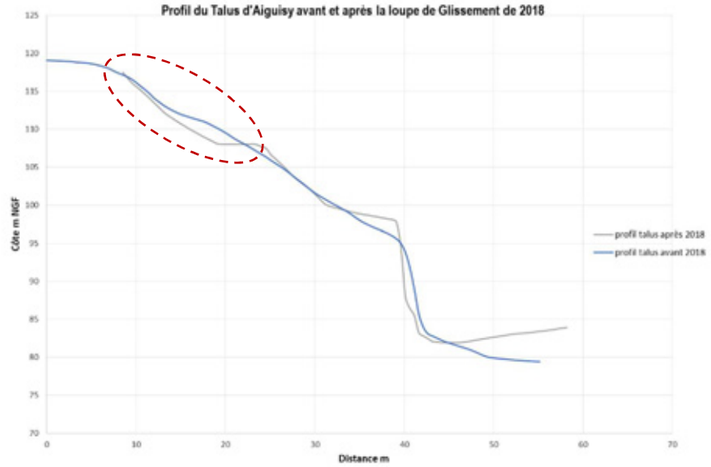


Figure 5 : Topographie avant et après glissement

L'ampleur de la loupe de glissement s'observe par le décalage entre les 2 profils, zone repérée en rouge. Avec la précision de ces données qui restent toutefois inhérentes à la méthode de relevé topographique, cette instabilité de surface aurait une hauteur de 9m environ par rapport au TN, pris égal à 119.1 m NGF. La base du glissement se situerait sensiblement à l'interface entre les Argiles Vertes (*ou Glaises à Cyrènes*) et les marnes de Pantin.

L'épaisseur maximale de terrain concerné et ayant glissé serait comprise entre 2 et 3 m, ce qui confirme qu'il s'agit effectivement d'un mouvement surfacique des Argiles Vertes, sur une épaisseur limitée, et non pas d'un mouvement de grande ampleur mobilisant un volume important de terrain. Ce mécanisme

d'instabilité surfacique des Argiles Vertes est connu pour ces matériaux altérables à l'eau et sensibles aux conditions météorologiques.

La lithologie considérée est conforme au sondage carotté réalisé par Hydrogéotechnique au droit du talus. Elle est résumée dans le tableau ci-dessous :

Formation		De (m)	A (m)	Épaisseur
TV	Terre Végétale	0	0.4	-
TB	Travertin de Brie	0.4	3.15	3.15
GV	Argiles Vertes	3.15	6.85	3.7
GC	Glaises à Cyrènes	6.85	8.75	1.9
MP	Marnes de Pantin	8.75	15.4	6.65
MA	Marnes d'Argenteuil	15.4	28.15	12.75
MFL	Niveaux Gypseux	28.15	31	-

Tableau 4 : Couches géologiques retenues dans les études de stabilité

La distinction entre les Marnes à Cyrènes (GC) et les Argiles vertes (GV) n'est pas forcement évidente. Il ne sera pas fait de distinction entre ces deux formations qui seront assimilées aux Argiles Vertes.

La terre végétale affichant une très faible épaisseur, nous considérerons cette dernière et le calcaire de Brie (TB) comme un seul et même ensemble géo-mécanique ayant les paramètres du Travertin de Brie.

5.2 Paramètres géotechniques

Les caractéristiques mécaniques retenues pour les calculs et déjà rappelées précédemment sont synthétisées dans le tableau suivant

Paramètres		γ_h	c'	ϕ'	C_u	ϕ_{cu}
Formations		kN/m³	kPa	(°)	kPa	(°)
TB	Travertin de Brie	20	10	30	10	30
GV	Argiles Vertes	18	29	19	60	18
GC	Glaises à Cyrènes	18	29	19	60	18
MP	Marnes de Pantin	19	23	29	100	28
MA	Marnes d'Argenteuil	19	68	20	93	26
MFL	Niveaux Gypseux	22	650	35	650	35

Tableau 5 : Propriétés mécaniques retenues pour les différentes couches de terrain

Par manque de données, les valeurs de Cu et φ_u pour le TB et le MFL seront prises égales aux valeurs en contraintes effectives. Ces faciès ne sont pas ou très peu mobilisés par le glissement, et les propriétés retenues n'ont pas d'impact sur les conditions de stabilité de la partie haute de la fosse.

5.3 Hypothèses de calcul

Les calculs sont réalisés selon la méthode de Bishop qui s'applique à des surfaces de rupture circulaires, au moyen du logiciel TALREN V.5.

L'objectif étant de retrouver un cercle de glissement superficiel cohérent avec la loupe de 2018, les calculs sont réalisés en ne considérant aucune pondération des paramètres ou des chargements. Les paramètres retenus sont donc les valeurs caractéristiques, considérées comme représentatives des

propriétés des terrains. L'instabilité de la loupe de glissement est alors identifiée pour un coefficient de sécurité égal à 1.

Les calculs sont réalisés successivement :

- En contraintes totales
- En contraintes effectives avec prise en compte de la pression interstitielle imposée par la nappe phréatique.

Les argiles vertes présentant une perméabilité très faible, il est apparu opportun de faire une analyse en contraintes totales, en considérant que la résistance est régie par la cohésion non-drainée. Dans ce cas, la pression interstitielle n'est pas explicitement prise en compte.

Pour le calcul en contraintes effectives, il est par contre nécessaire de prendre en compte la pression interstitielle. Celle-ci est supposée imposée par la nappe phréatique régnant dans le calcaire de Brie. Le niveau de la nappe est fixé à -2 m/TN, approximativement à mi-hauteur de l'épaisseur du calcaire de Brie. En dessous de ce niveau, la nappe est affleurante, ce qui implique que toutes les formations sous-jacentes sont saturées en eau.

Une surcharge de 20 kPa simulant le trafic routier à une distance de 22 m de la tête du talus et s'étendant sur 10m linéaire est considérée.

La figure suivante montre le modèle géotechnique retenu et la géométrie de la loupe d'instabilité recherchée.

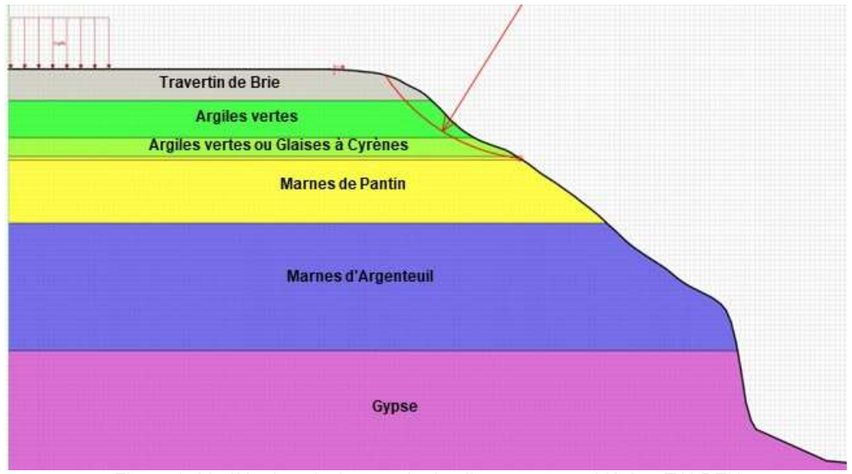


Figure 6: Modèle de calcul et cercle de glissement considérés - TALREN

5.4 Calculs en contraintes totales

Une première série de calculs est réalisée en considérant une approche en contraintes totales. Les propriétés des matériaux, et en particulier des Argiles Vertes, correspondent donc à la cohésion non-drainée CU et l'angle ϕ_{cu} caractérisant la variation de la cohésion avec la contrainte de consolidation. Dans le cas présent, par conservatisme, cet angle est considéré comme nul et seule la cohésion non-drainée est prise en compte.

5.4.1 Évolution du Coefficient de sécurité

La figure suivante présente l'évolution du coefficient de sécurité en fonction de la valeur de la cohésion non-drainée. On observe que l'instabilité ne serait justifiée que si la cohésion devient très faible, de l'ordre de 2 kPa.

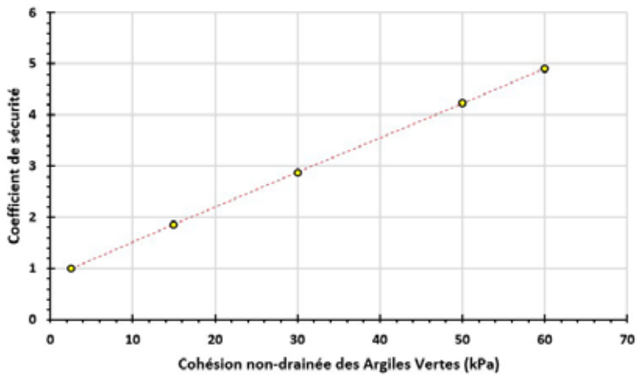


Figure 7: Evolution du coefficient de sécurité en fonction de la cohésion non-drainée

5.5 Calculs en contraintes effectives

L'analyse en contraintes effectives est décrite ci-dessous. Elle consiste successivement :

- A évaluer le coefficient de sécurité avec les valeurs caractéristiques issues de l'analyse des récentes reconnaissances, similaires en ordre de grandeur à celles généralement retrouvées pour les Argiles Vertes de la région parisienne, en l'absence de nappe phréatique.
- A évaluer l'influence d'une nappe phréatique sur l'évolution de ce coefficient de sécurité.
- A évaluer l'influence des paramètres de résistance des Argiles Vertes sur les conditions de stabilité du talus.

5.5.1 Conditions de stabilité sans nappe phréatique

Comme précisé, le premier calcul consiste à évaluer le coefficient de sécurité global en considérant les valeurs caractéristiques des paramètres mécaniques, et en l'absence de toute piézométrie. Sous ces conditions, le coefficient de sécurité serait de l'ordre de 2.9. Il ne serait pas représentatif d'une instabilité potentielle de ce talus. La figure suivante montre la loupe de glissement obtenue.

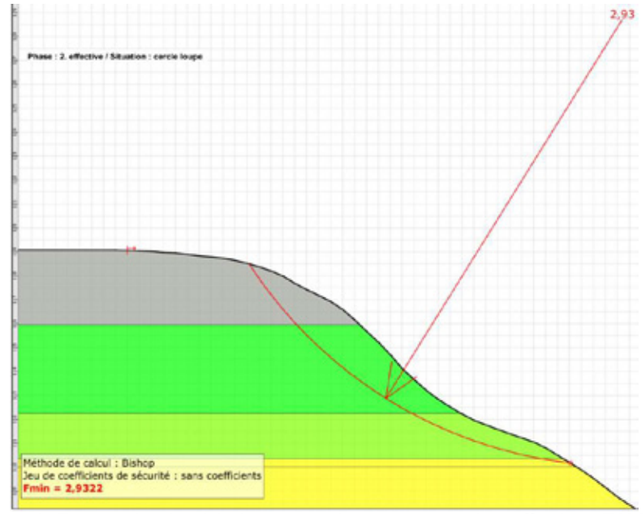


Figure 8: Facteur de sécurité obtenu pour le cas en contrainte effective - TALREN

5.5.2 Influence de la piézométrie sur les conditions de stabilité

Réaliser le calcul en contraintes effectives, sans imposer une pression interstitielle, revient à considérer que le terrain, et en particulier la couche d'Argiles Vertes, est totalement déssaturée, ce qui ne parait pas réaliste. Une piézométrie est donc imposée dans l'ensemble du massif, et en particulier dans la couche d'argiles, par la prise en compte d'une nappe phréatique libre dans le Travertin de Brie. L'influence de cette nappe a été analysée pour 3 configurations :

- un niveau d'eau "haut" avec une nappe quasi en surface (*-0.30m sous le TN*).
- un niveau d'eau "médian", avec une nappe à -2.00m sous le TN.
- un niveau d'eau "bas", avec une nappe à -3.10m sous le TN, soit au toit des Argiles Vertes.

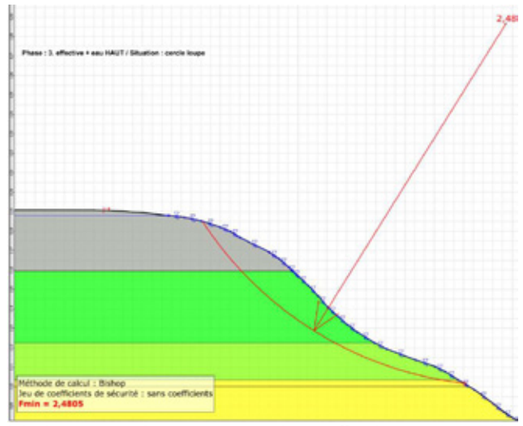


Figure 9: Facteur de sécurité obtenu pour le cas en contraintes effectives avec un niveau d'eau haut dans le Brie

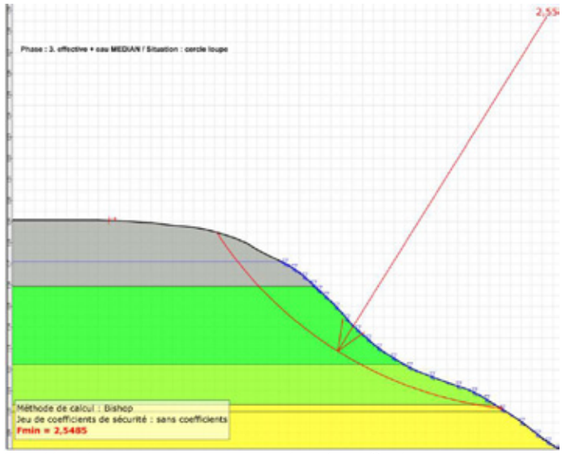


Figure 10: Facteur de sécurité obtenu pour le cas en contraintes effectives avec un niveau d'eau médian dans le Brie

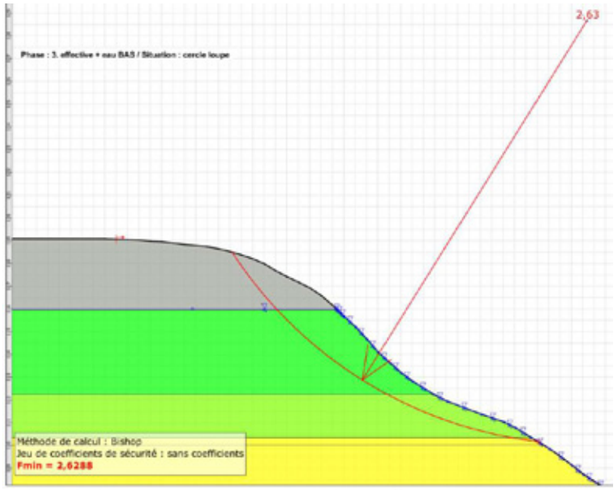


Figure 11: Facteur de sécurité obtenu pour le cas en contraintes effectives avec un niveau d'eau bas dans le Brie

Les valeurs des coefficients de sécurité obtenus sont présentées dans le tableau suivant.

Cas	Niveau m/TN	F
Haut	- 0.3	2.48
Médian	- 2	2.55
Bas	- 3.1	2.63

Tableau 6 : Evolution des coefficients de sécurité en fonction du niveau de la nappe phréatique dans le calcaire de Brie

En fixant dans les calculs une piézométrie, le coefficient de sécurité diminue et passe de 2.9 à 2.6. Ce coefficient reste très supérieur à 1 et ne permet pas de justifier l'instabilité observée.

Une variation de la nappe phréatique dans l'épaisseur du Travertin de Brie, ce qui peut être possible en fonction de la pluviométrie et des fluctuations saisonnières, n'a que peu d'influence sur le facteur de sécurité, qui serait de l'ordre de 2.5 pour une nappe affleurante en surface. Ce résultat n'est pas surprenant pour un cercle de glissement qui est proche de la surface.

La prise en compte de pression interstitielle pour le talus et dans les Argiles Vertes, en conditions de contraintes effectives, ne permet donc pas de justifier le développement de la loupe de glissement constatée.

5.5.3 Influence des propriétés mécaniques sur les conditions de stabilité

Les calculs précédents montrent que si la prise en compte de la nappe phréatique conduit à réduire la marge de sécurité du talus d'Argiles Vertes, cela n'est pas suffisant pour justifier l'instabilité observée sur site.

Afin de pouvoir justifier le développement de ce glissement, en intégrant la présence de la nappe phréatique, il apparaît nécessaire de réduire la résistance en cisaillement des Argiles Vertes (*en n'identifiant pas spécifiquement une couche de glaise à Cyrène*). Pour des raisons exposées par la suite, seule la cohésion C' est progressivement réduite, et non pas l'angle de frottement.

Le tableau suivant montre la réduction du coefficient de sécurité en fonction de cette réduction de la cohésion C'(*avec une nappe phréatique dans le Travertin de Brie à -2m de profondeur*).

Cohésion C'	Coefficient de sécurité
29 kPa	2.5
20 kPa	1.9
15 kPa	1.6
7 kPa	1.0
3 kPa	0.7
0 kPa	0.5

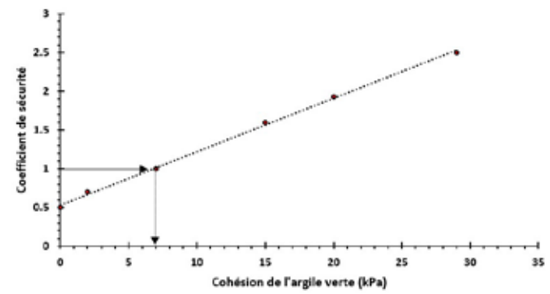


Tableau 7 : Evolution des coefficients de sécurité en fonction de la valeur de la cohésion dans les argiles vertes

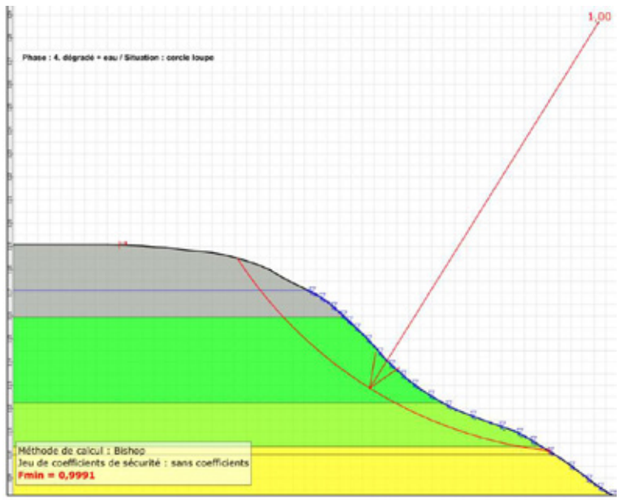


Figure 12: Visualisation du cercle de glissement pour une cohésion de 7kPa dans les argiles vertes

Afin de justifier par le calcul l'occurrence d'un glissement, caractérisé par une valeur de 1 pour le coefficient de sécurité, en considérant la présence de la nappe phréatique, il s'avère nécessaire de réduire la résistance en cisaillement. Cette résistance est réduite au travers de la cohésion, en considérant que cette perte de résistance est essentiellement liée à une dégradation structurelle (*fissuration*) de l'argile verte, comme ceci sera développé par la suite.

Il s'avère donc que la cohésion apparente effective devrait être réduite de 75% environ, passant de 29 kPa à environ 7 kPa, pour pouvoir justifier le développement de cette loupe de glissement en surface.

5.6 Conclusions relatives aux calculs de glissement

En conclusion, sur la base de ces calculs d'équilibre limite, il est possible d'avancer les conclusions suivantes :

- Les calculs réalisés avec les paramètres mécaniques caractéristiques des Argiles Vertes, ne permettent pas de justifier l'instabilité de surface observée en bordure de la fosse ; ceci aussi bien au travers d'une approche en contraintes totales que par une approche en contraintes effectives intégrant explicitement la présence d'une nappe phréatique au-dessus de la couche d'Argiles Vertes, dans l'épaisseur du Travertin de Brie.
- La prise en compte de la nappe phréatique a un effet relativement limité sur le coefficient de sécurité, ne réduisant que très peu ce dernier. La prise en compte de cette nappe et des pressions interstitielles associées dans l'ensemble du massif ne permet pas de justifier l'instabilité observée.
- Afin de justifier, par le calcul, le développement de la loupe de glissement, il est indispensable de réduire la résistance en cisaillement des Argiles Vertes, et en particulier la cohésion apparente.
- Selon l'approche en contraintes effectives, en considérant une nappe phréatique à -2m sous le TN, il faudrait réduire la cohésion de l'ordre de 75% ; avec une valeur de l'ordre de C'=7 kPa et un angle de frottement ϕ'=19°.

En se basant sur ces conclusions partielles, la suite du document justifie la baisse des caractéristiques mécaniques et avance des hypothèses pour expliquer le développement de cette instabilité dans cette zone spécifique de la fosse d'Aiguisy.

6. Analyse des causes de l'instabilité locale

Le processus d'instabilité du talus sur la hauteur de la couche d'Argiles Vertes peut découler de 2 processus physiques légèrement différents, associés dans les 2 cas à une destructuration progressive de cette argile sous l'effet des conditions météorologiques et en particulier d'une alternance de cycles hydriques, d'humidification essentiellement en automne/hiver et de dessication/séchage en été.

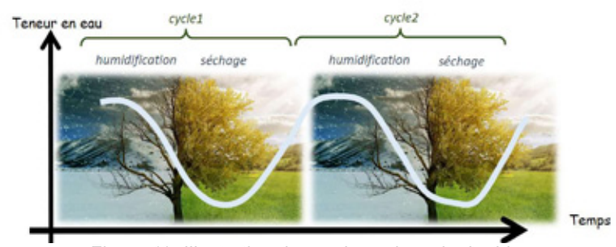


Figure 13: Illustration des cycles saisonnier hydriques

Les Argiles Vertes étant des argiles très plastiques et extrêmement sensibles aux variations de teneur en eau, elles ont tendance à progressivement se déstructurer lorsqu'elles sont exposées aux conditions climatiques ou plus généralement, à des variations de teneur en eau.

Cette destructuration est bien sûr plus intense en surface, et se propage en s'atténuant en profondeur. On peut estimer, de par le retour d'expérience, que cette zone d'influence s'étend sur quelques mètres, entre 2 et 4 m environ. Ceci dépend bien entendu des caractéristiques de l'argile et surtout de l'intensité des sollicitations hydriques (*plus importantes en pays et climat très secs*).

Les deux processus d'instabilité considérés sont :

- Une érosion de surface par ravinement.
- Une instabilité mécanique par glissement.

L'argile pouvant être totalement destructurée en surface, avec perte totale de sa cohésion, celle-ci peut être ravinée par les écoulements de surface, et en particulier les fortes pluies. Ce phénomène reste très progressif, circonscrit à une faible épaisseur en surface, et peut être ralenti en protégeant la surface de l'argile ou en limitant les ruissellements de surface.

Le deuxième mécanisme correspond à une instabilité mécanique d'une loupe de terrain, telle qu'étudiée précédemment, en considérant que les Argiles Vertes ont perdu tout ou partie de leurs caractéristiques de résistance en cisaillement. Dans ce cas précis, la piézométrie régnant dans l'argile peut avoir une influence, relativement faible dans le cas présent comme ceci a été démontré précédemment. La piézométrie pouvant avoir une influence, les conditions de stabilité peuvent aussi être influencées par la présence éventuelle de nappes perchées.

L'origine commune à ces 2 mécanismes est la sensibilité à l'eau des Argiles Vertes. Quelques éléments sont décrits ci-dessous pour expliquer le processus de dégradation.

6.1 Phénomène d'altération progressive des Argiles Vertes

Les Argiles Vertes sont supposées être instables en versant. On peut rappeler les propos reportés dans le livre de G.Filliat [6], qui décrit ces matériaux comme étant "*très plastiques, gonflantes, sensibles aux agents atmosphériques, et instables sur les pentes*".

Cette instabilité n'est pas nécessairement liée à une évolution de la piézométrie locale, mais à une dégradation progressive de ses caractéristiques structurelles, par développement d'une micro-fissuration, voire macro-fissuration, induite par une altération météorique. Cette altération progressive trouve son origine dans les cycles saisonniers hydriques de dessication et ressaturation et les phénomènes de retrait/gonflement associés. Ce phénomène a été quantifié et étudié dans différents travaux de recherche, comme dans la thèse de Yigzaw [7].

Les photos suivantes illustrent ce phénomène de dégradation des Argiles Vertes exposées aux actions météoriques ainsi que l'exemple d'une loupe de glissement en surface associée à la dégradation progressive de ce matériau.

Figure 14: Exemple de dégradation et d'instabilité d'un talus d'Argiles Vertes

Les photographies suivantes montrent aussi la destructuration d'un échantillon d'Argile Verte au cours de cycles hydriques reproduits en laboratoire, après 7 cycles de séchage/réhydratation.

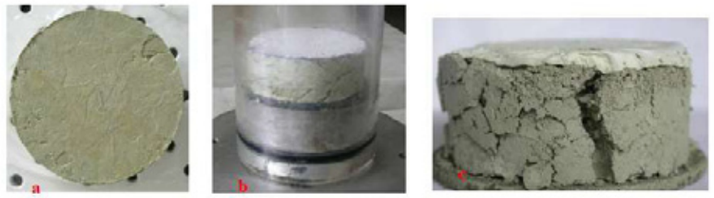


Figure 15: Exemple de dégradation d'un échantillon d'argile verte sous l'effet de cycles hydriques reproduits en laboratoire

Au cours de chacun des cycles, l'amplitude du gonflement est plus importante que celle du retrait. Le phénomène n'est donc pas réversible, et l'enchainement de ces cycles se traduit donc par une augmentation progressive de la fissuration, donc du volume des vides, et par voie de conséquence de la teneur en eau. Dans le cas de ces échantillons, la teneur en eau initialement de 25%, augmente pour atteindre 49% après 5 cycles, ce qui s'accompagne d'une réduction progressive des propriétés mécaniques apparentes du matériau.

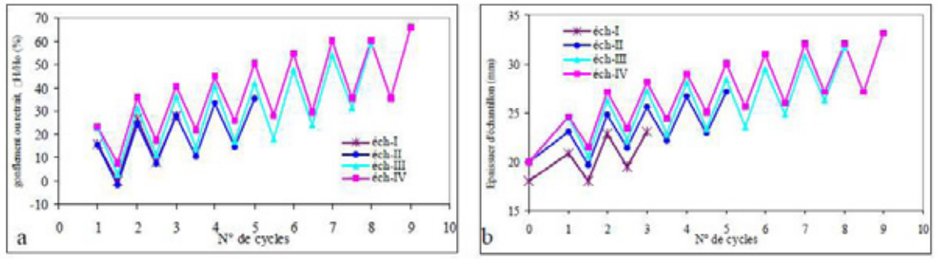


Figure 16: Augmentation progressive du volume d'un échantillon avec les cycles hydriques. Illustration de l'aspect irréversible du comportement.

La cinétique de ce phénomène est fonction des conditions hydriques auxquelles est exposé le matériau. La limite de retrait en teneur en eau peut être estimée autour de 15%, ce qui correspondrait à une pression d'entrée d'air (*succion*) de l'ordre de 7 MPa. Dans le cas des climats tempérés, les succions appliquées en périodes estivales peuvent être de quelques centaines de kPa, jusqu'à 1 MPa, voire un peu plus en fonction des conditions climatiques et de l'exposition. Dans le cas présent, il est peu probable que la limite de retrait soit dépassée, ce qui laisse penser que <u>le phénomène de dégradation est progressif et relativement lent à se développer</u>. Ainsi, rester en deça de la limite de retrait n'annule pas le phénomène de dégradation, mais le ralentit seulement.

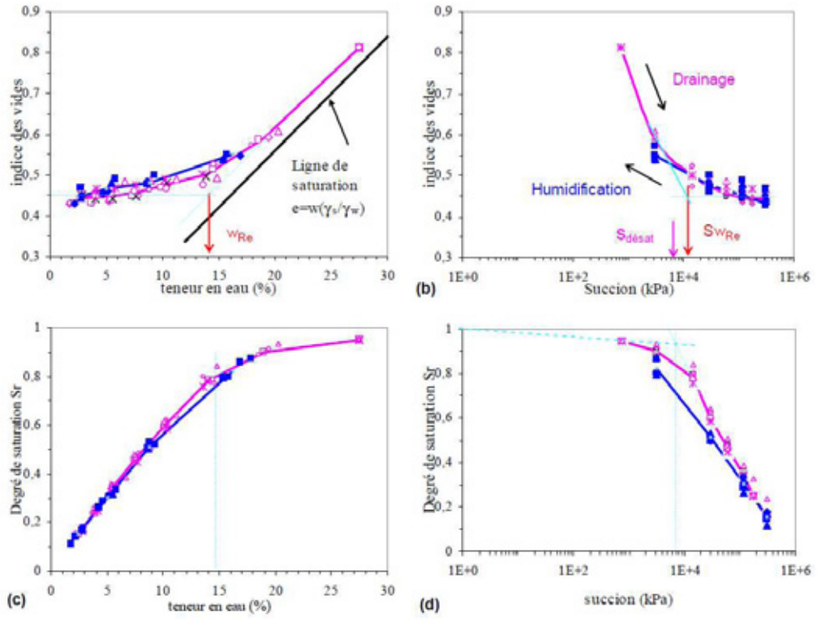


Figure 17: Exemple de courbes hydriques pour les argiles vertes

Ainsi, exposée aux conditions météorologiques et donc à des variations saisonnières d'humidité et de sécheresse, les premiers mètres du massif d'Argiles Vertes en versant, non recouverts, vont progressivement se dégrader. L'épaisseur concernée est difficile à identifier, mais elle reste *a priori*

limitée à quelques mètres. Les études réalisées sur des barrages en argiles dans le cadre du projet ANR Terredurable [8], semblent montrer que les variations de teneur en eau, et donc potentiellement la fissuration, de sols fins (*compactés dans le cas présent*) est de l'ordre de 2 à 4m, en France ou en Grande-Bretagne, donc sous des climats tempérés.

Dans le cas présent, la profondeur de la loupe de glissement a été estimée à environ 3m, ce qui est cohérent avec cet ordre de grandeur.

L'argile se déstructure et se fissure. On notera par ailleurs que la fissuration a tendance à se développer le long d'anciennes surfaces de micro-cisaillement ou "*slickensides*" réactivés. La présence de ces défauts originels est liée aussi à l'histoire géologique du matériau et à son état surconsolidé.

Cette destructuration progressive s'accompagne d'une dégradation des propriétés mécaniques apparente du matériau. Il n'a pas été retrouvé de travaux sur les Argiles Vertes du bassin parisien permettant de quantifier cette évolution de la résistance en cisaillement de ce matériau en fonction de ces cycles hydriques.

Medjnoun et al [9] a étudié la variation des propriétés mécaniques d'une argile relativement similaire aux Argiles Vertes, en fonction des cycles hydriques. Cette argile a un indice de plasticité de l'ordre de 30% et une limite de liquidité de 60 à 70%, donc assez similaires aux paramètres des Argiles Vertes de la région parisienne. Sa contrainte de préconsolidation varierait entre 420 et 900 kPa, ce qui est assez proche de celle des Argiles Vertes.

Un des échantillons testés avait les propriétés suivantes avant gonflement :

- Teneur en eau : 15.4%
- Degré de saturation: 75%
- Cohésion C': 58 kPa
- Angle de frottement: 44.5°

Après gonflement (*la procédure n'est pas précisée*) les caractéristiques suivantes sont obtenues :

- Teneur en eau : 23.9%
- Degré de saturation: 100%
- Cohésion C': 14 kPa
- Angle de frottement: 13.5°

Une réduction de 75% de la cohésion est observée dans ce cas précis, et de 70% sur l'angle de frottement.

On peut rapporter aussi certains travaux expérimentaux ou bibliographiques tels que ceux de Ashrafuzzaman [10] ou Kayyal et al [11] qui montrent que la dégradation de l'argile sous l'effet d'une destructuration hydrique se traduit mécaniquement par une réduction, voire une annulation de la cohésion. L'angle de frottement évoluant vers l'angle d'état critique de l'argile. Les 2 figures suivantes, issues de Kayyal [11], sur 2 argiles gonflantes, illustre cette évolution de la cohésion, et son annulation progressive.

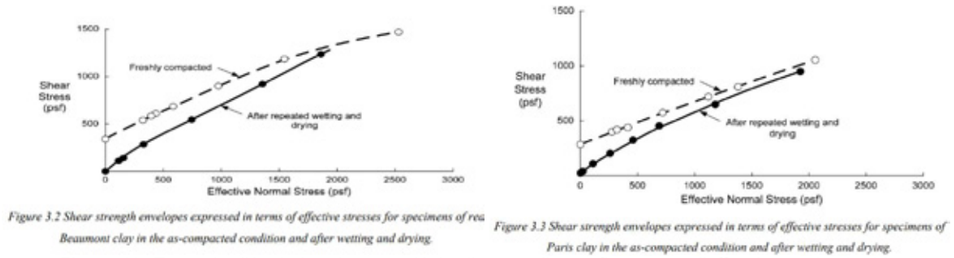


Figure 3.2 Shear strength envelopes expressed in terms of effective stresses for specimens of rea Beaumont clay in the as-compacted condition and after wetting and drying.

Figure 3.3 Shear strength envelopes expressed in terms of effective stresses for specimens of Paris clay in the as-compacted condition and after wetting and drying.

Figure 18: Exemple d'évolution des propriétés d'une argile gonflante sous l'effet des cycles hydriques

Cette analyse bibliographique montre donc que :

- Les Argiles Vertes sont sensibles à l'eau et présentent une forte capacité de retrait/gonflement.
- Les cycles hydriques saisonniers sont susceptibles d'avoir un effet sur une épaisseur de quelques mètres.
- Ces cycles retrait/gonflement engendrent une dégradation irréversible du matériau par fissuration puis macro-fissuration de l'argile.
- Le développement de cette fissuration a pour conséquence directe une baisse progressive des propriétés mécaniques apparentes, et en particulier de la cohésion.

6.2 Mécanisme de ravinement de surface des argiles vertes

La destructuration de surface des Argiles Vertes les rendent particulièrement sensibles au phénomène de ravinement de surface, lors d'évènements pluvieux. Les couches de surface sont entrainées en fonction des zones de ruissellement, et en particulier si ces écoulements se concentrent en des endroits particuliers compte tenu de la topographie. La photo suivante représente la zone du glissement avant apparition de celui-ci, un jour de fortes pluies. Il est ainsi possible d'observer ces chéneaux de ruissellement, qui peuvent aussi avoir comme conséquence, par érosion externe, de raidir localement la pente et donc de déstabiliser progressivement le talus.

Figure 19: Vue de la zone du glissement avant apparition de l'instabilité

On constate aussi l'absence de végétation au droit de la future zone de glissement, ce qui peut être révélateur d'un ravinement plus important dans cette zone. Cette absence de végétation accroit aussi l'instabilité des couches de surface.

La topographie de la crête de la fosse ne permet pas de justifier clairement l'importance du ravinement dans cette zone, par comparaison avec le talus sur la gauche de la photographie. Ce ne sont donc peut-être pas les ruissellements de surface sur le plateau au-dessus de la fosse qui généraient ces écoulements sur le talus, mais éventuellement une charge plus importante de la nappe dans le calcaire de Brie. Un niveau piézométrique plus haut localement dans le Travertin, de par une alimentation d'eau plus importante en amont, pourrait justifier cela.

Quelle que soit la raison de ce ravinement de surface plus significatif dans cette zone, un tel phénomène reste très progressif, avec une évolution clairement visible donc aisée à inspecter et suivre. Il ne concerne par ailleurs que les premiers décimètres de terrain de surface et ne remet pas en cause la stabilité générale du versant de la fosse.

6.3 Mécanisme d'instabilité par glissement des argiles vertes

Ce deuxième mécanisme est celui qui est à l'origine du glissement, et qui est reproduit par la méthode de calcul aux "cercles" de glissement, présentée précédemment.

Dans ce cas, il ne s'agit pas d'un phénomène d'érosion externe, mais d'un déséquilibre entre les charges motrices (*Poids propre des terrains et/ou charges externes*) et les résultantes de résistance du sol (*résistance en cisaillement le long de la surface de glissement*).

Ce mécanisme dépend donc :

- De la résistance du terrain et des éventuelles évolutions de celle-ci dans le temps.
- Des évolutions des charges motrices (*surcharge éventuelle en tête*)
- De l'évolution de la piézométrie dans le terrain.

Ces aspects sont développés ci-dessous.

6.3.1 Réduction des propriétés

Les cycles saisonniers hydriques génèrent, comme cela a été développé précédemment, une dégradation structurelle progressive des Argiles Vertes. Cette dégradation structurelle est, bien entendu, associée à une baisse de la résistance en cisaillement, et en particulier de la cohésion. On peut donc admettre que l'argile va progressivement se dégrader, pour évoluer vers un stade ultime caractérisé par sa résistance résiduelle en cisaillement, sans cohésion.

L'intensité de cette dégradation, si elle est d'origine météorique, dépend de la profondeur. En surface, l'argile peut être totalement destructurée, comme on l'observe sur la figure 14, sur quelques décimètres. Mais en dessous, bien que l'argile soit dégradée, celle-ci peut garder une certaine cohésion.

On peut considérer en première estimation, que la profondeur concernée par ce phénomène est probablement de quelques mètres (2 à 4m).

6.3.2 Cinétique d'évolution de la dégradation de l'argile verte

La cinétique de dégradation de l'argile sous l'effet de cycles hydriques, dépend de l'intensité de ces cycles, et donc des conditions météorologiques. Une succion, fonction de ces conditions extérieures,

est appliquée avec une valeur maximale par temps sec et *a priori* en été. L'intensité de cette succion, dans la région parisienne, reste limitée et inférieure à 1 MPa. Cette valeur est beaucoup plus faible que la pression d'entrée d'air de l'argile (*de l'ordre de 7 MPa*), ce qui conduit à limiter l'ampleur du phénomène et donc sa cinétique. En effet, même si la succion appliquée aux Argiles Vertes reste relativement faible, les cycles hydriques de saturation/dessaturation génèrent toutefois un endommagement progressif du matériau, et donc une baisse de ses caractéristiques mécaniques.

Sous ce climat et avec une orientation du versant vers le Nord, le phénomène de dégradation des Argiles Vertes est donc très lent et limité en amplitude. Il serait plus important sur un versant exposé au Sud.

6.3.3 Influence d'une piézométrie locale

Le mécanisme de dégradation de l'argile sous l'effet des conditions climatiques est connu et permet d'expliquer l'érosion progressive de ces talus dans le temps. Toutefois, il convient de s'interroger sur les raisons pour lesquelles un seul glissement de ce type s'est enclenché sur le pourtour de la fosse d'Aiguisy, alors que d'autres talus sont davantage exposés aux aléas climatiques et en particulier à l'ensoleillement, sans toutefois présenter de tels signes d'instabilité.

Il a été souligné précédemment que la zone ayant glissé paraissait être le siège de ruissellements plus importants ; ruissellements qui proviendraient de la nappe régnant dans le Travertin de Brie, et qui pourrait être plus puissante dans cette zone, de par une alimentation plus importante. Ces ruissellements pourraient raviner en surface les Argiles Vertes, mais aussi accroitre sa ressaturation en profondeur leur de fortes pluies.

Les mesures piézométriques décrites dans la note BG [5] montrent la présence d'une nappe perchée temporaire à la base des Argiles Vertes/"Glaises à Cyrènes" et des marnes de Pantin. En effet, un horizon apparemment plus grumeleux, moins plastique, et plus perméable, d'une quarantaine de centimètres d'épaisseur, a été observé sur le sondage de l'inclinomètre réalisé par Hydrogéotechnique. Le piézomètre PZ2 a été crépiné dans cette zone et il a montré une montée de pression entre le 3 et le 5 février 2021, suivi d'une décroissance progressive de cette pression durant février et mars. Cette montée de pression était très limitée et a atteint au maximum 9 kPa. Une telle pression n'est pas suffisante pour déstabiliser le versant d'Argiles Vertes (*d'autant plus que cette pression doit être encore plus faible à l'approche du versant*). Toutefois, elle traduit la présence momentanée, en certaines périodes de l'année, d'une nappe perchée, qui pourrait conduire à une dégradation plus importante des Argiles Vertes influencées par la présence de cette nappe, donc à sa base.

En considérant cette hypothèse, les calculs de stabilité en contraintes effectives ont été repris en supposant une cohésion nulle pour les Argiles Vertes sur une épaisseur de 50cm à la base de celles-ci. La cohésion de la masse d'argile a ensuite été réduite pour retrouver un coefficient de sécurité de 1.

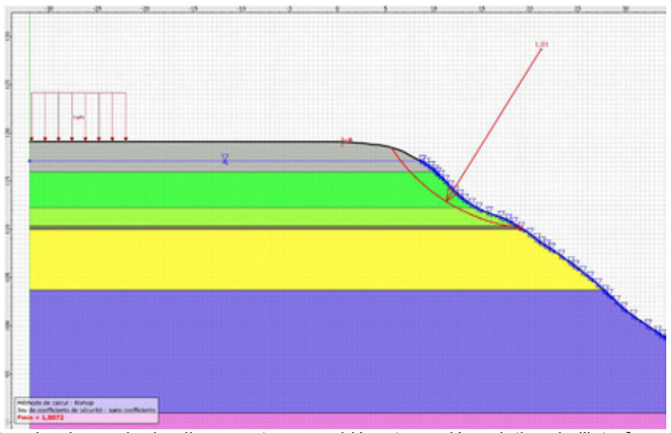


Figure 20: Recherche du cercle de glissement en considérant une dégradation de l'interface entre les Argiles Vertes et les Marnes de Pantin

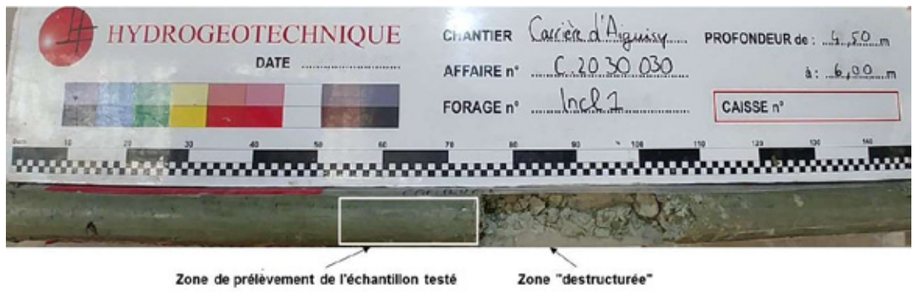
Le coefficient de sécurité atteint 1 pour une valeur de la cohésion C'≅10 kPa. Il est rappelé que la valeur de cohésion justifiant un coefficient de 1 en ne prenant pas en compte cette couche potentiellement totalement dégradée, était de 7 kPa. Il y a donc un petit effet de la présence de cette potentielle nappe perchée sur la stabilité du talus.

6.3.4 Existence de niveaux aquifères au sein des Argiles Vertes

Comme développé précédemment, la présence du Piézomètre PZ2 avec une zone crépinée à la base des Argiles Vertes a permis d'identifier l'existence d'un niveau occasionnellement aquifère, susceptible de dégrader localement les caractéristiques de ces argiles. On peut s'interroger sur l'existence, au sein de la couche d'argile, d'autres horizons potentiellement aquifères et donc altérés.

Afin d'évaluer cette hypothèse, on peut se reporter aux essais triaxiaux réalisés par Hydrogéotechnique [3], à une profondeur d'environ 5.10m dans le sondage de l'inclinomètre situé à proximité immédiate de la zone de glissement. Les commentaires suivants peuvent être faits, déjà partiellement abordés dans la note BG sur l'analyse des reconnaissances (§8 de la note [5]).

- La résistance en cisaillement drainée mesurée sur cet échantillon est très basse, avec une cohésion C'=15 kPa et un angle de frottement de 5.5°.
- Le comportement montre une très forte montée des pressions interstitielles durant l'essai, caractérisée par un coefficient de Skempton de 0.7 à 0.9. Ceci conduirait à considérer ce matériau comme une argile "sensible". Cette conclusion est cohérente avec l'indice de plasticité relativement élevé.
- Le Log du sondage montre que les échantillons ont été prélevés au voisinage immédiat d'une zone apparemment moins argileuse, qui a été difficilement carottée. Cette zone pourrait être le siège, occasionnellement, de percolations, au même titre que ce qui a été observé plus en profondeur, dans la zone crépinée du PZ2.



- Selon le relevé du sondage, des traces racinaires sont observées. Ceci pourrait montrer qu'il y a de l'eau dans cette zone et surtout faciliter les infiltrations.

Sans pouvoir l'affirmer, on peut donc penser que cette couche d'argile, très proche de la surface voire localement affleurante (cf §6.4), n'est pas homogène et peut être le siège localement de petites nappes perchées qui est occasionnellement alimentées, lors d'évènements ou de périodes humides.

Les caractéristiques mécaniques très basses mesurées par Hydrogéotechnique sur l'échantillon testé d'Argiles Vertes prélevé à proximité immédiate de la zone de glissement, pourraient donc être effectivement révélatrices d'une destructuration de l'argile, et non pas uniquement liées à des problématiques de prélèvement.

6.4 Origines possibles des venues d'eau

L'origine possible de ces arrivées d'eau, que ce soit au toit des Argiles Vertes dans le calcaire de Brie, ou au sein d'une couche perchée à l'interface entre les Argiles Vertes et les marnes de Pantin, reste difficile à déterminer.

En premier lieu, il est intéressant de remarquer 2 spécificités de la zone située au-dessus du talus qui a glissé :

- <u>La zone de glissement se trouve, selon la carte géologique, à proximité ou à l'interface entre les affleurements du calcaire de Brie et les Argiles Vertes</u>. On observe par ailleurs que la topographie plongeant vers le Sud, on retrouve de ce côté-là des affleurements de marnes supra-gypseuses. L'alimentation de la nappe perchée à la base de la couche d'Argiles Vertes pourrait éventuellement provenir de cet affleurement.

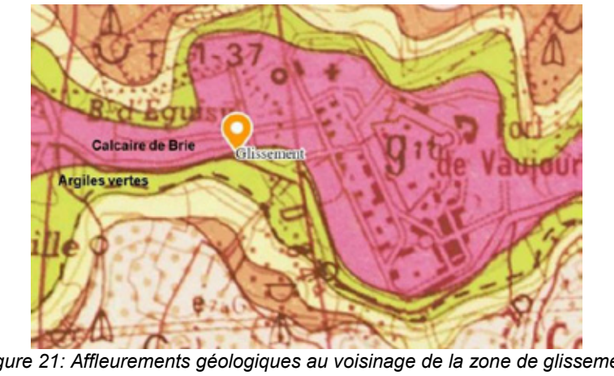


Figure 21: Affleurements géologiques au voisinage de la zone de glissement

- La topographie du terrain entre le sommet de la loupe de glissement et la route départementale semble montrer un point bas repéré sur la figure suivante. Les fossés d'assainissement de la route ne sont pas entretenus et la buse qui permet de faire transiter les eaux du côté Nord "fosse d'Aiguisy" vers le côté Sud de la chaussée, est partiellement, voire totalement, obstruée. Par ailleurs, il se pourrait que la route fasse barrière aux écoulements de surface, maintenant une zone humide en cet endroit. La limitation locale des capacités d'écoulement de la nappe du Brie pourrait justifier la présence d'un ruissellement et de ravinements plus important sur le versant de la fosse.

Figure 22: Position d'une zone possible de rétention des eaux de surface

Figure 23: Vue de la zone entre le talus de la fosse et la route départementale

Sans qu'il soit possible de clairement identifier l'origine de ces nappes (*nappe de Brie et nappe perchée à la base des Argiles Vertes*), il semble qu'il y ait effectivement dans cette zone une spécificité des

aquifères. Ceci aurait pu impacter les caractéristiques à long terme des argiles vertes dans cette zone et initier l'instabilité de surface observée.

7. Conclusions

Après avoir interprété la récente campagne de reconnaissances géotechniques réalisée sur le site de la fosse d'Aiguisy [5] et estimé les propriétés caractéristiques des principaux terrains susceptibles d'avoir influencé le développement localisé d'une loupe de glissement sur l'épaisseur des Argiles Vertes, cette note présente l'analyse qui avait pour objectif de justifier ce phénomène. En réponse aux rapports de Tierce-Expertise émis par INERIS [1] [2], des calculs sont présentés en prenant en compte ces caractéristiques mécaniques et en intégrant l'effet d'une nappe phréatique ou d'une nappe perchée. Ces calculs réalisés soit en contraintes totales, soit en contraintes effectives, montrent que :

- pour justifier par les calculs cette instabilité, il est indispensable de réduire la cohésion des Argiles Vertes et de prendre en compte une dégradation de ces matériaux dans le temps ;
- la présence d'une nappe phréatique ne modifie pas significativement le coefficient de sécurité et ne permet pas d'expliquer, à elle seule, le développement de cette instabilité.

Ce rapport établit que ce phénomène est très probablement lié à la sensibilité bien connue des Argiles Vertes à l'eau, et en particulier aux variations de teneur en eau induites par les cycles hydriques de séchage/ressaturation associés aux variations météorologiques saisonnières. Ces matériaux se déstructurent progressivement en surface, sur une épaisseur probable de quelques mètres, engendrant une réduction progressive des cohésions non-drainées et drainées. Compte tenu des conditions climatiques du site et de l'exposition de ce versant, ce mécanisme de dégradation est lent. Il est par ailleurs accentué par le ravinement de surface qui provoque une érosion externe du talus.

Ce mécanisme d'altération lent est générique et peut se produire dès que les Argiles Vertes sont exposées en surface. Le glissement étant localisé en une zone bien spécifique de la fosse et pas ailleurs, l'hypothèse est faite que cette altération est amplifiée localement par des conditions hydriques bien particulières. Il a été ainsi constaté que :

- le ravinement de surface est plus important en cet endroit ;
- il existe, de manière avérée, une petite nappe perchée à l'interface entre les Argiles Vertes et les marnes de Pantin, alimentée temporairement, probablement en fonction de la pluviométrie.
- Il pourrait exister, en se référant aux essais spécifiquement réalisés dans la zone du glissement par Hydrogéotechnique, d'autres niveaux potentiellement aquifères. Ceci justifierait les propriétés très faibles obtenues en laboratoire.

Les origines de ces ruissellements et de cette nappe ne sont pas clairement définies. On peut toutefois constater que la zone de glissement se trouve à proximité immédiate de l'affleurement des Argiles Vertes en surface, selon les cartes géologiques. Par ailleurs, la présence de la route départementale à faible distance de la crête du mur de fosse, dont les fossés et le système d'évacuation des eaux ne sont pas entretenus, pourrait empêcher une évacuation des eaux de ruissellement vers le Sud, et donc augmenter localement le niveau de la nappe phréatique dans le Travertin de Brie. Ceci pourrait justifier un ruissellement plus important sur le versant de la fosse qui ne peut s'expliquer par la topographie locale, ainsi que les infiltrations à la base des Argiles Vertes.

Ces deux phénomènes peuvent donc avoir accéléré la dégradation mécanique localement des Argiles Vertes et être des facteurs déclenchant de l'instabilité observée en cette endroit particulier sur le pourtour de la fosse d'Aiguisy.

Le glissement constaté reste un mécanisme de surface et ne devrait pas se propager vers la route, ni impacter celle-ci par des déformations de la chaussée. Il est toutefois recommandé :

- de procéder à un entretien du réseau de drainage des accotements de la route et un maintien de la capacité d'évacuation de ces eaux de drainage et de ruissellement par la buse passant sous la route départementale et qui est actuellement fortement obturée par des végétaux.
- De continuer à suivre les piézomètres installés récemment en crête de talus, afin d'évaluer à quelle fréquence la nappe perchée à la base des Argiles Vertes est alimentée (*Un seul épisode constaté jusqu'à présent en février 2021*).
- De continuer à suivre l'inclinomètre installé à proximité de ces piézomètres, mais qui ne devrait pas montrer d'évolution significative dans le temps.

8. Références

[1] Rapport de Tierce Expertise Vaujours-Guisy – Partie Géotechnique
INERIS – 202223 – 2123191 – V2.0 / 22/06/2020

[2] Rapport de Tierce Expertise de la Carrière d'Aiguisy
INERIS – 200942 – 2335139 – V2.0 / 09/09/2020

[3] Rapport Hydro géotechnique : C.20.30030_ind C_Carrière d'Aiguisy_VAUJOURS_G0_JBI

[4] ANTEA : Lab20229_Essais géomécaniques fosse d'Aiguisy_
CENP200627_Rapport provisoire du 23.02

[5] Analyse des reconnaissances géotechniques et des mesures piézométriques
Rapport BG Ingénieurs Conseils. 200030.26-RN001 – 18 mars 2021

[6] G. Filliat
La pratique des sols et fondations
Editions Le Moniteur - 1981

[7] Z. G. Yigzaw
Analyse des processus de retrait-gonflement des sols argileux en réponse à des sollicitations hydriques cycliques – Rôle de la microstructure
Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris – Mines ParisTech - Décembre 2009.

[8] M Bufalo & T. Dubreucq & J.J. Fry & J. M. Lejeune & D. Mahmutovic
Conception et construction des ouvrages en sols fins – Enseignements du Projet ANR Terredurable et Reteour d'Expériences.
Presses des Ponts - 2019.

[9] A. Medjnoun & R. Bahar
Shrinking-swelling of clay under the effect of hydric cycles
Innov. Infrastruct. Solut. 1:46 – 2016

[10] K. Ashrafuzzaman
Impact of wet-dry cycle on mechanical properties of expansive clay under low overburden stress

[11] M. K. Kayyal & S.G.Wright

Investigation of Long-Term Strength Properties of Paris and Beaumont Clays in Earth Embankments
Research Report 1195-2F, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, November, 1991

PLACOPLATRE
Annexes de l'étude d'impact
Vaujours, Coubron (93) et Courtry (77)
Mars 2022
Cabinet GREUZAT PARTIE 1.2

ANNEXE 9 - STABILITÉ DU PROFIL TYPE DES TALUS DE LA FOSSE (BG)

14 juin 2021

PLACOPLATRE

FOSSE D'AIGUISY

STABILITÉ DU PROFIL TYPE DES TALUS DE LA FOSSE

200030.26-RN003

Le calcul du profil type du versant la fosse d'Aiguisy est repris et présenté ci-dessous, en cohérence avec les hypothèses générale du calcul LREP 84, mais en réactualisant les paramètres géomécaniques des Argiles Vertes, des Marnes de Pantin et des Marnes d'Argenteuil, telles que définies dans le rapport [1], suite aux investigations géotechniques réalisées en 2020.

La partie supérieure du talus, au droit du Travertin de Brie et des Argiles Vertes, présente une pente de 2/1, alors qu'elle est de 1/1 au niveau de marnes supra-gypseuses, à savoir les Marnes de Pantin et les Marnes Bleues d'Argenteuil.

Seuls les cercles de glissement profonds sont recherchés et on ne s'intéresse pas aux glissements de surface, en particulier au droit des Argiles Vertes. Ce point a été étudié dans la note [2] et il a été montré que ces argiles étaient fortement influencées par les conditions hydriques extérieures, induisant une dégradation progressive des caractéristiques mécaniques, ainsi que par les variations de la nappe du Travertin de Brie ; seule nappe libre identifiée sur le site.

La nappe phréatique n'est donc pas prise en compte dans les marnes supra-gypseuses, en cohérence avec les hypothèses de l'approche LREP84, en considérant que, même si ces horizons sont potentiellement saturés, les argiles vertes créent une couche suffisamment imperméable pour dissocier les pressions d'eau dans les marnes, de celles imposées par la nappe de surface du Travertin de Brie.

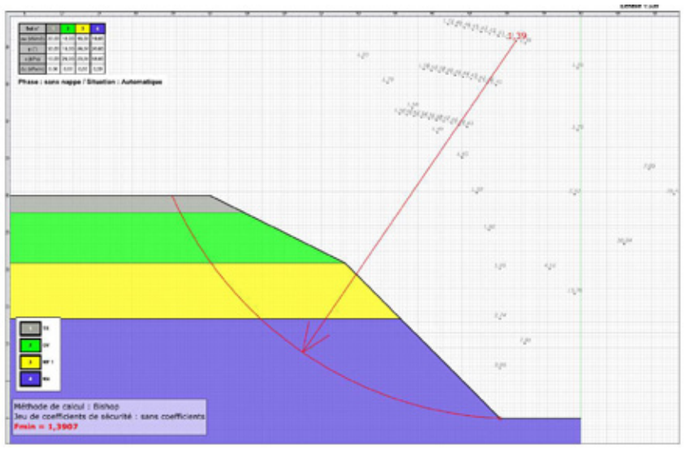
Les paramètres retenus pour le calcul sont résumés dans le tableau suivant :

Paramètres		γ_h	c'	ϕ'	C_u	ϕ_{cu}
Formations		kN/m³	kPa	(°)	kPa	(°)
TB	Travertin de Brie	20	10	30	10	30
GV	Argiles Vertes	18	29	19	60	18
GC	Glaises à Cyrènes	18	29	19	60	18
MP	Marnes de Pantin	19	23	29	100	28
MA	Marnes d'Argenteuil	19	68	20	93	26
MFL	Niveaux Gypseux	22	650	35	650	35

Propriétés mécaniques retenues pour les différentes couches de terrain

Le cercle de glissement passant par le pied de la fosse et ayant le coefficient de glissement le plus faible, est reproduit sur la figure suivante.

Le coefficient de sécurité obtenu est de 1.39, supérieur à une valeur de 1.3 qui serait retenu dans ce cadre particulier pour une approche selon le coefficient de sécurité global.



RÉFÉRENCES:

[1] Analyse des reconnaissances géotechniques et des mesures piézométriques
Rapport BG Ingénieurs Conseils. 200030.26-RN001 – 18 mars 2021

[2] Analyse des conditions de stabilité du talus.
Rapport BG Ingénieurs Conseils. 200030.26-RN002b – 28 mai 2021

VERSION	-	a	b
DOCUMENT			
DATE	14 juin 2021		
ELABORATION	François LAIGLE		
VISA			
COLLABORATION			
DISTRIBUTION			

Siège social
40, rue Moreau Duchesne
77910 Varreddes

01 64 33 18 29

Bureau de Coulommiers
87, Avenue Jehan de Brie
77120 Coulommiers

01 64 03 02 05

Bureau de La Ferté-sous-Jouarre
64, rue Pierre Marx
77260 La Ferté-sous-Jouarre

01 60 22 02 38

Bureau de Crépy-en-Valois
2, bis rue Louis Armand
60800 Crépy-en-Valois

03 44 59 10 81

environnement@cabinet-greuzat.com
http://www.cabinet-greuzat.com

cabinet
GREUZAT