



**AP-HP**

ASSISTANCE  
PUBLIQUE  HÔPITAUX  
DE PARIS

# Construction de l'Hôpital Universitaire Grand Paris Nord – Saint-Ouen (93)

Mission géotechnique de conception - G2 PRO

Analyse de l'aléa de dissolution du gypse  
antéludien



Rapport n°A120895 / Version D – 16 novembre 2023

Projet suivi par Matthieu VRAZINIS – 06 19 28 65 09 – [matthieu.vrazinis@anteagroup.fr](mailto:matthieu.vrazinis@anteagroup.fr)

## Fiche signalétique

### Construction de l'Hôpital Universitaire Grand-Paris Nord de Saint-Ouen (93)

Mission géotechnique de conception - G2 PRO

Analyse de l'aléa de dissolution du gypse antéludien

#### CLIENT

AP-HP

-

#### SITE

Ancienne usine PSA, rue du capitaine Glarner à Saint-Ouen (93)

#### Julien CAILLET

Ingénieur en Chef

06 46 53 19 67

[julien.caillet@aphp.fr](mailto:julien.caillet@aphp.fr)

#### RAPPORT D'ANTEA GROUP

Responsable du projet

Matthieu VRAZINIS

Interlocuteur commercial

Michel BOISSEAU

Implantation chargée du suivi du projet

Implantation d'Antony

01.57.63.14.00

[secretariat.paris-fr@anteagroup.com](mailto:secretariat.paris-fr@anteagroup.com)

Rapport n°

A120895

Version n°


D

Votre commande et date

Bon de commande n°4509736873 du 13/12/2022

Projet n°

IDFP220754

	Nom	Fonction	Date	Signature
Rédaction	Matthieu VRAZINIS	Ingénieur de projets géotechniques	Novembre 2023	
Approbation	Laurence HUCHET	Responsable d'activité géotechnique région ICN	Novembre 2023	

## Suivi des modifications

Indice Version	Date de révision	Nombre de pages	Nombre d'annexes	Objet des modifications
A	24/01/2023	44	2	Version initiale
B	17/03/2023	42	2	Mise à jour avec programme d'injection optimisé
C	27/07/2023	42	2	Intégration de certains sondages G1 manquants.
D	16/11/2023	42	2	Mise à jour pour adaptation à l'évolution du système de fondations, passant d'une solution radier à une solution pieux.

# Sommaire

1. Contexte et objectifs .....	7
1.1. Le projet HUSOGPN .....	7
1.2. Partition des rapports de la mission G2 PRO .....	7
1.3. Objectifs du rapport .....	8
1.4. Documents de référence .....	8
2. Contexte du site .....	10
2.1. Localisation et topographie .....	10
2.2. Description sommaire du projet .....	10
2.3. Avoisinants .....	12
3. Modèle géotechnique .....	13
4. Analyse de l'aléa de dissolution du gypse antéludien .....	15
4.1. Zone concernée par l'aléa .....	15
4.2. Rappel de la campagne d'investigation .....	15
4.3. Méthodologie d'analyse .....	17
4.4. Analyse des paramètres de forage .....	17
4.5. Analyse des sondages carottés .....	17
4.6. Analyse des essais pressiométriques .....	18
4.7. Analyse des essais de remplissage .....	19
4.8. Analyse des diagraphies gamma-ray .....	19
4.9. Limite de la méthode .....	21
5. Cartographie des horizons décomprimés .....	22
5.1. Méthodologie .....	22
5.2. Hauteurs décomprimées cumulées dans le Calcaire de Saint-Ouen .....	23
5.3. Hauteurs décomprimées cumulées dans les Sables de Beauchamp .....	26
5.4. Hauteurs décomprimées cumulées dans les Marnes et Caillasses .....	29
5.5. Synthèse des hauteurs décomprimées cumulées .....	32
6. Traitement des terrains par injection .....	33
6.1. Synthèse de l'analyse .....	33
6.2. Impacts de l'aléa sur le projet de construction .....	34
6.3. Optimisation du programme d'injection .....	35
6.4. Mise en œuvre des travaux d'injection .....	35
6.4.1. Forages d'injection .....	35
6.4.2. Injections gravitaires .....	36
6.4.3. Injections de clavage .....	36

6.4.4. Injections de traitement.....	36
6.4.5. Qualité des matériaux.....	36
6.4.6. Sondages de contrôles.....	36
6.5. Incertitudes résiduelles.....	36
6.6. Suivi d'exécution des travaux d'injection.....	37
7. Enchaînement des missions géotechniques.....	38

## Table des figures

Figure 1 : Plan de situation général, source : Géoportail.....	7
Figure 2 : Plan de situation et périmètre du projet (Source : Géoportail / échelle 1 :5000).....	10
Figure 3 : Extrait du plan de repérage des murs de soutènements, source : Ingérop.....	11
Figure 4 : Extrait de la coupe transversale de principe des Infrastructures, source : MOE.....	11
Figure 5 : Extrait du zonage de l'aléa de Cavités et Carrières établi par l'IGC (Source : MAPPEA Antea Group).....	15
Figure 6 : Extrait du plan d'implantations des investigations géotechniques.....	16
Figure 7 : Graphique de dispersion des pressions limites en fonction de la profondeur (à gauche), histogrammes de répartition des pressions limites dans le Calcaire de Saint-Ouen, les Sables de Beauchamp et les Marnes et Caillasses (à droite). ....	18
Figure 8 : Paramètres de forages et radioactivité naturelle dans le Calcaire de Saint-Ouen – Extrait sondage SD235.....	20
Figure 9 : Paramètres de forages et radioactivité naturelle dans les Marnes et Caillasses – Extrait sondage SD235.....	20
Figure 10 : Hauteurs cumulées des franges faiblement décomprimées dans le Calcaire de Saint-Ouen.....	23
Figure 11 : Hauteurs cumulées des franges décomprimées dans le Calcaire de Saint-Ouen.....	24
Figure 12 : Hauteurs cumulées des franges très décomprimées dans le Calcaire de Saint-Ouen.....	24
Figure 13 : Hauteurs cumulées de l'ensemble des franges faiblement à fortement décomprimées, Calcaire de Saint-Ouen.....	25
Figure 14 : Hauteurs cumulées des franges faiblement décomprimées dans les Sables de Beauchamp.....	26
Figure 15 : Hauteurs cumulées des franges décomprimées dans les Sables de Beauchamp.....	27
Figure 16 : Hauteurs cumulées des franges très décomprimées dans les Sables de Beauchamp.....	27
Figure 17 : Hauteurs cumulées de l'ensemble des franges faiblement à fortement décomprimées, Sables de Beauchamp.....	28
Figure 18 : Hauteurs cumulées des franges faiblement décomprimées dans les Marnes et Caillasses.....	29
Figure 19 : Hauteurs cumulées des franges décomprimées dans les Marnes et Caillasses.....	30
Figure 20 : Hauteurs cumulées des franges très décomprimées dans les Marnes et Caillasses.....	30
Figure 21 : Hauteurs cumulées de l'ensemble des franges faiblement à fortement décomprimées, Marnes et Caillasses.....	31
Figure 22 : Coupe géologique de principe avec situation des deux radiers et des têtes de pieux.....	34

## Table des tableaux

Tableau 1 : Modèle géotechnique de calcul retenu, extrait du rapport A120891.....	13
Tableau 2 : Synthèse des faibles récupérations dans les sondages carottés.....	18
Tableau 3 : Synthèse des essais de remplissage gravitaire des terrains .....	19
Tableau 4 : Valeurs seuils retenues pour la vitesse d'avancement.....	22
Tableau 5 : Correspondance entre hauteurs cumulées % d'épaisseur de la formation, Calcaire de Saint-Ouen.....	23
Tableau 6 : Correspondance entre hauteurs cumulées % d'épaisseur de la formation, Sables de Beauchamp.....	26
Tableau 7 : Correspondance entre hauteurs cumulées % d'épaisseur de la formation, Marnes et Caillasses .....	29
Tableau 8 : Synthèse des hauteurs cumulées décomprimées sur les trois horizons .....	32
Tableau 9 : Critères d'interprétation pour le caractère décomprimé d'un horizon géologique .....	32
Tableau 10 : Valeurs de $\alpha$ par horizon géologique étudié .....	32

## Table des annexes

Annexe I :       Synoptique des missions d'ingénierie géotechnique – Extrait de la norme NF P 94-500 de novembre 2013

Annexe II :       Hauteurs décomprimées relevées sur chaque forage, base de données.



# 1. Contexte et objectifs

## 1.1. Le projet HUSOGPN

La présente étude, réalisée à la demande de l'Assistance Publique des Hôpitaux de Paris (AP-HP), s'inscrit dans le projet de construction de l'Hôpital Universitaire Grand-Paris Nord de Saint-Ouen, rue du Capitaine Glarner à Saint-Ouen-sur-Seine (93).



Figure 1 : Plan de situation général, source : Géoportail

## 1.2. Partition des rapports de la mission G2 PRO

Dans le cadre du projet de construction de l'Hôpital Universitaire Grand Paris Nord de Saint-Ouen (93), l'AP-HP a missionné Antea Group pour la réalisation d'une étude géotechnique de conception en phase Projet (G2 PRO), au sens de la norme NF P 94-500 de novembre 2013, définissant les missions géotechniques.

Etant donnés les multiples sujets géotechniques liés au projet, la mission de conception géotechnique sera décomposée en 5 rapports, listés comme suit :

- **A120891** – Rapport de synthèse géologique, géotechnique et hydrogéologique, présentant les hypothèses et paramètres géotechniques nécessaires aux calculs de dimensionnement des ouvrages ;
- **A120892** – Traitant du dimensionnement du soutènement en bordure des voies SNCF sur la limite nord-ouest du projet, se focalisant sur la justification de l'écran de paroi moulée par rapport aux contraintes liées aux ouvrages ferroviaires ;
- **A120893** – Traitant du dimensionnement des soutènement périphériques ;
- **A120894** – Traitant du dimensionnement des ouvrages de fondations ;

- **A120895 – Traitant de l'analyse géotechnique sur le phénomène de dissolution du gypse antéludien.**

Un tableau synoptique de la norme NF P 94-500 est fourni en **Annexe I** de ce rapport.

### 1.3. Objectifs du rapport

Les objectifs de ce cinquième rapport dédié à l'aléa dissolution du gypse antéludien sont ainsi :

- De rappeler la complétude des investigations géotechniques vis-à-vis de cet aléa ;
- De rappeler la méthodologie et les critères d'analyse pour caractériser la prégnance du risque ;
- D'établir une analyse de l'ensemble des données géotechniques (sondages carottés, destructifs, pressiométriques, diagraphies gamma-ray et essais d'injection) ;
- D'établir une cartographie des zones les plus sensibles à l'aléa de dissolution du gypse antéludien ;
- De fournir la méthodologie d'injection pour le traitement de l'aléa.

### 1.4. Documents de référence

Les documents de référence mis à la disposition d'Antea Group pour la réalisation de cette étude sont les suivants :

#### **Documents mis à disposition d'Antea Group par l'AP-HP :**

- Les plans d'implantation des fouilles de reconnaissances de fondations au droit du bâtiment existant, au format .pdf ;
- Principe de Mise en Œuvre de la Paroi Moulée sur Voie SNCF – ING-GHN-HUSOGPN-APS-STR-T-040-000-001-00-00-A ;
- Elévations des parois moulées Infrastructure – ING-HU-TZ-GPN-FOND-EPM00-PLN-STR-PROV
- DCS voies ferrées – ING-GHN-HUSOGPN-APS-STR-T-070-000-002-00-00-A ;
- Détail des Murs de Soutènements – Infrastructure – ING-HU-TZ-GPN-FOND-S001-PLAN-STR-PROV ;
- Rapport d'Etude Géotechnique G1 PGC – GAIDF Octobre 2019 – N°17399-3 ;
- Rapport d'Etude Géotechnique G2 AVP – GAIDF Avril 2022 – N°17399-6 ;
- Rapport d'Etude des niveaux caractéristiques de la nappe – GAIDF Mai 2022 – N°17399-3.

#### **Etudes antérieures d'Antea Group :**

- Rapport de reprise des études hydrogéologiques, n°A120578, indA, décembre 2022.

#### **Documents techniques et normatifs :**

- Missions d'ingénierie géotechnique – Classifications et Spécification, NF P 94-500, novembre 2013 ;
- Eurocode 7, calcul géotechnique, partie I – Règles générales – NF EN 1997-1, juin 2005 ;
- Norme NF P 94-261, juin 2013, Calcul géotechnique, Fondations superficielles ;
- Norme NF P 94-262, juillet 2012, Calcul géotechnique, Fondations profondes ;
- SNCF Réseau, IG 90033 – Règles de conception, réalisation et contrôle concernant les ouvrages provisoires et les opérations de construction ;



- Tirants d'Ancrage, TA 2020 – Règles professionnelles relatives à la conception, au calcul, à l'exécution, au contrôle et à la surveillance, CFMS ;
- Notice technique, travaux d'injection des anomalies liées à la dissolution du gypse antéludien, Inspection générale des carrières, 31 janvier 2016.

### **Documents consultés :**

- Le site Géoportail (<https://www.geoportail.gouv.fr/>) pour :
  - Les cartes IGN ;
  - Les photos satellites ;
- La carte géologique au 1/25 000<sup>ème</sup> de Paris et de sa proche banlieue, et la notice qui l'accompagne ;
- La Banque de Données du Sous-Sol (BSS) du BRGM ;
- Les sites du BRGM :
  - Le visualiseur Infoterre pour les cartes géologiques et les cartes d'aléa inondations par débordement de nappe (<http://infoterre.brgm.fr/viewer/MainTileForward.do>) ;
  - L'espace cartographique du Système d'Information pour la Gestion des Eaux Souterraines en Seine-Normandie (SIGES Seine-Normandie) pour un extrait de la carte hydrogéologique de la France au 1/50 000<sup>ème</sup> (<http://sigessn.brgm.fr/?page=carto>).
- Le site Géorisques (<https://www.georisques.gouv.fr/>) pour les zonages cartographiques des aléas naturels.

## 2. Contexte du site

### 2.1. Localisation et topographie

La présente étude s'inscrit dans le projet de création de l'Hôpital Universitaire Grand Paris Nord à Saint-Ouen (93) et concerne la parcelle sud, actuellement occupée par une ancienne usine PSA. D'une surface d'environ 46 000 m<sup>2</sup>, le site est du fait de son utilisation, nivelé par une dalle béton à 34,6 m NGF.

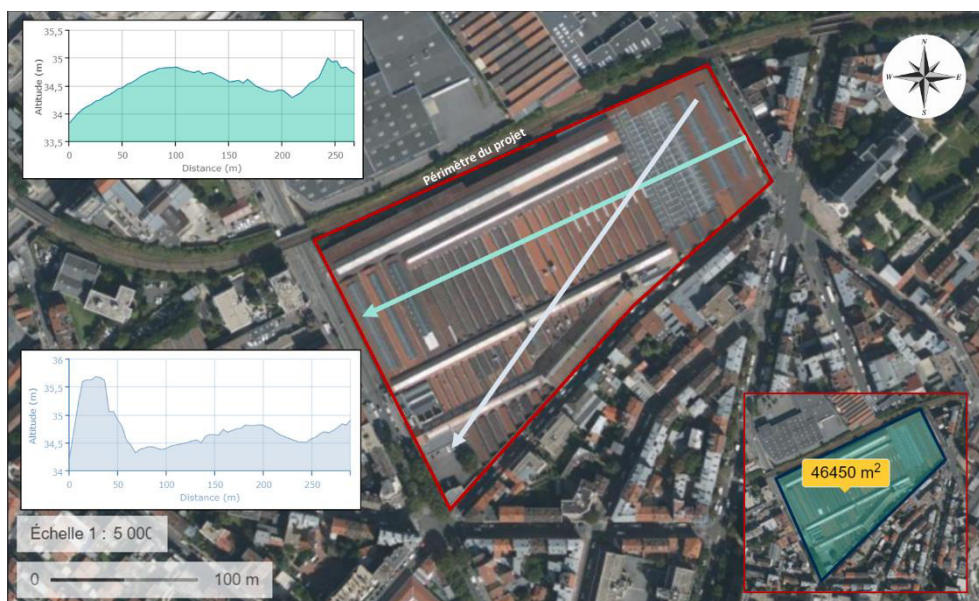


Figure 2 : Plan de situation et périmètre du projet (Source : Géoportail / échelle 1 :5000)

### 2.2. Description sommaire du projet

Les infrastructures occuperont la majeure partie de la parcelle, avec un bâtiment en R+6 avec un toit végétalisé, et 2 niveaux de sous-sol de grande hauteur, équivalent à 3 ou 4 niveaux de sous-sol ordinaires (voir extrait de plan ci-dessous).

L'extrait de plan ci-dessous présente la localisation des ouvrages de soutènement :

- **En rouge**, un soutènement par parois moulée adjacent à la voie SNCF, la justification de cette paroi fait l'objet d'un rapport indépendant, A120892,
- **En vert**, un soutènement périphérique par parois moulées, délimitant toute la partie en R-3 du projet (cote du radier à 21,60 m NGF),
- **En bleu**, un soutènement par voiles par passes alternées, délimitant la partie en R-1 du projet (cote du radier à 28,10 m NGF).

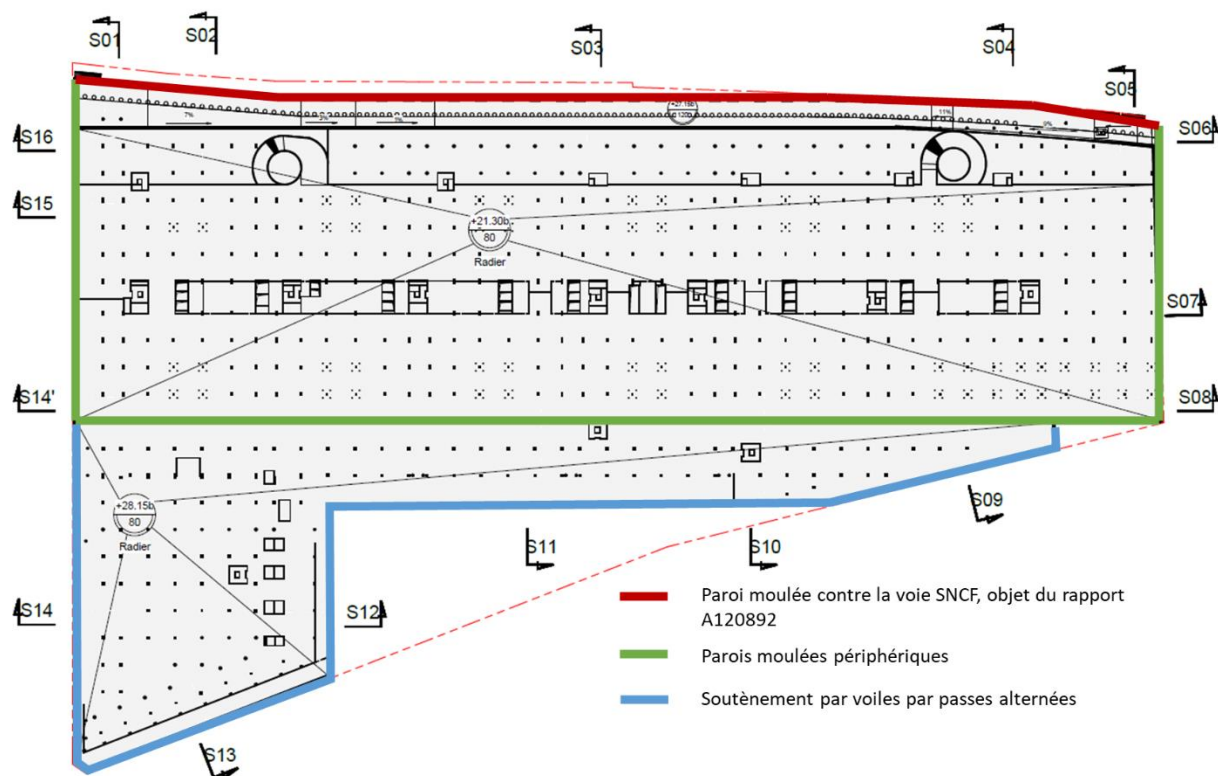


Figure 3 : Extrait du plan de repérage des murs de soutènements, source : Ingérop

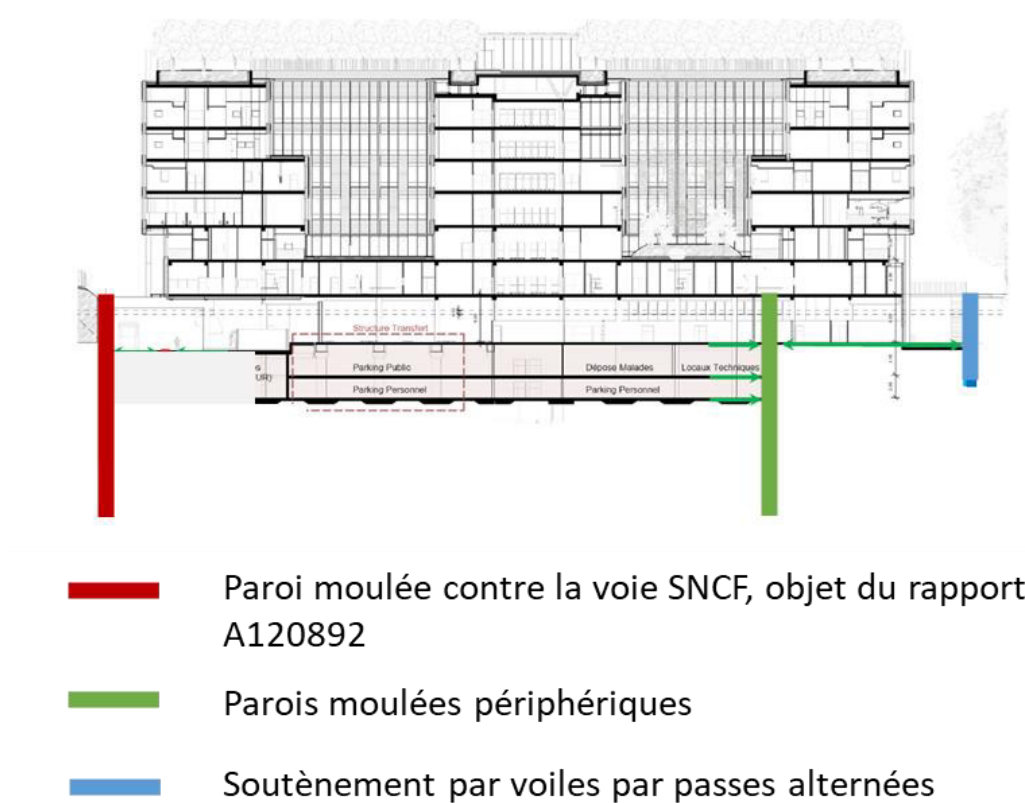


Figure 4 : Extrait de la coupe transversale de principe des Infrastructures, source : MOE

## 2.3. Avoisinants

Le principal avoisinant ayant un impact sur le projet est une ligne SNCF longeant le nord de la parcelle.

Le long de la rue Farcot au sud, les bâtiments sont de type R+3 à R+4 avec probablement un niveau de sous-sol (cave et parking).

La rue Louis Blanc, à l'est, est en contrebas, les terrains en places étant retenus par un mur de soutènement en pierres en maçonnerie liée de 2,0m de hauteur sans barbacane de drainage. Un bâtiment en R+5 jouxte la rue.

L'avenue du Capitaine Glarner, à l'ouest, présente des résidences de type R+5 à R+7.

Au nord, par-delà les voies SNCF, se trouve un autre bâtiment industriel occupé par un Conforama.

### 3. Modèle géotechnique

Le modèle géotechnique, tel que construit dans la synthèse géologique, géotechnique et hydrogéologique (rapport **A120891**) est rappelé dans le tableau ci-dessous.

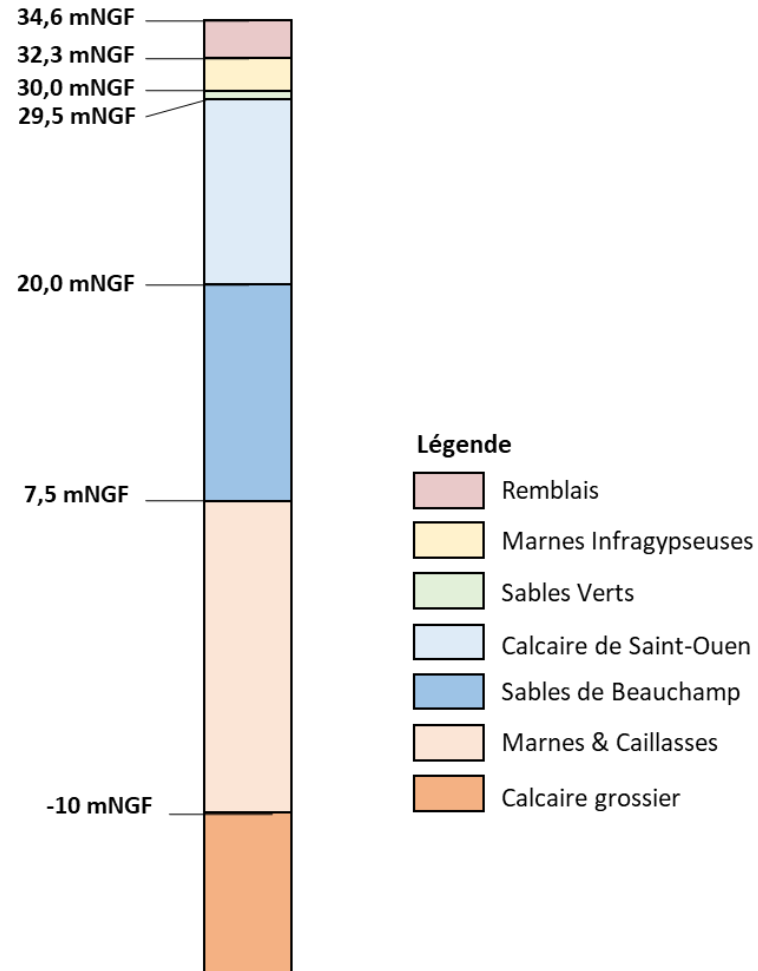
Tableau 1 : Modèle géotechnique de calcul retenu, extrait du rapport A120891

Horizon géologique	Stratigraphie moyenne			Poids	Paramètres pressiométriques				Perméabilité
	Epaisseur	Toit	Base	$\gamma$	$E_M$	$PI^*$	$\alpha$	$E_M/PI^*$	k
	m	m NGF	m NGF	kN/m <sup>3</sup>	MPa	MPa	-	-	m/s
Remblais	2,3	34,6	32,3	20*	4	0,5	1/2	8	-
Marnes Infragypseuses & Sables Verts	2,4	32,3	29,5	20*	20	1,8	1/3	11	1E-05
Calcaire de Saint-Ouen	9,7	29,5	20,0	20*	20	1,5	2/3	13	2E-05
Sables de Beauchamp	12,5	20,0	7,5	20*	23	1,8	1/2	13	3E-05
Marnes & Caillasses	18,0	7,5	-10,4	20*	30	3	2/3	10	2E-04
Calcaire grossier	> 10	-10,4	-	20*	115	4	1/2	29	2E-04

Horizon géologique	Cisaillement		Paramètres Hardening Soil Model					Niveaux d'Eau	
	c'	$\varphi'$	$\nu$	$E_{oed}$	$E_{50}$	$E_{ur}$	m	Niveau	m NGF
	kPa	°	-	MPa	MPa	MPa	-		
Remblais	0	30	0,3	12	12	36	0	$E_c$	26,10
Marnes Infragypseuses & Sables Verts	5	30	0,3	60	60	180	0,5		
Calcaire de Saint-Ouen	10	35	0,3	60	60	180	0,5	$EF_{10}$	27,28
Sables de Beauchamp	5*	35*	0,3	69	69	207	0,65	$EH_{50}$	29,14
Marnes & Caillasses	10*	35*	0,3	90	90	270	0,5	$EH_{100}$	29,65
Calcaire grossier	20*	35*	0,3	345	345	1035	0	$EE_{1000}$	30,55

La coupe géotechnique moyenne du projet est rappelée ci-dessous.





## 4. Analyse de l'aléa de dissolution du gypse antéludien

### 4.1. Zone concernée par l'aléa

D'après les données de l'Inspection Générale des Carrières (IGC), l'entièreté de la zone prévue pour le projet de construction est concernée par l'aléa de dissolution du gypse antéludien. **Les principales formations susceptibles de présenter ces risques sont le Calcaire de Saint-Ouen, les Sables de Beauchamp et les Marnes et Caillasses.**

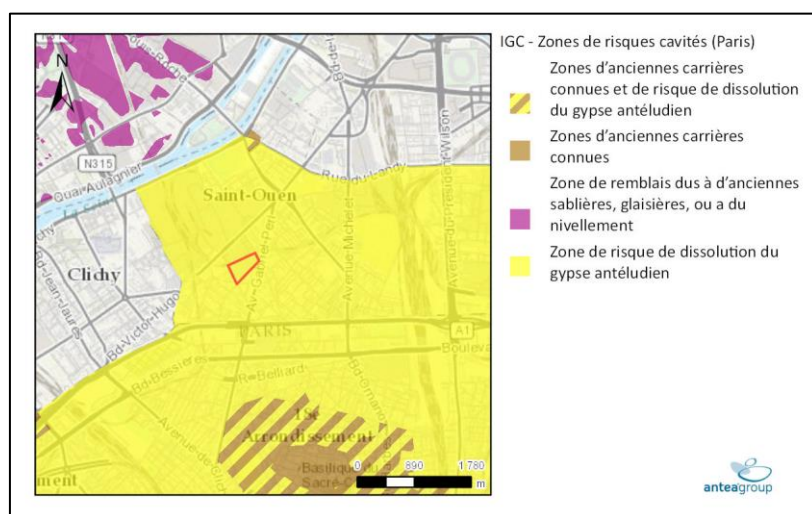


Figure 5 : Extrait du zonage de l'aléa de Cavités et Carrières établi par l'IGC (Source : MAPPEA Antea Group)

### 4.2. Rappel de la campagne d'investigation

Les investigations réalisées par GAIDF jusqu'en 2022 se sont déroulées en 3 phases lors de leurs missions G1ES, G1PGC puis G2 AVP. Le programme d'investigations réalisé est le suivant :

#### En G1 ES :

- 2 sondages pressiométriques descendus à 20 m de profondeur avec essais tous les 1,5 m, réalisés et poursuivis en destructifs jusqu'à 50 m de profondeur.
- 1 sondage carotté descendu à 15 m de profondeur

#### En G1 PGC :

- 6 sondages pressiométriques descendus à 20, 30, et 50 m de profondeur avec essais tous les 1,5 m, poursuivis en destructifs jusqu'à 50 m de profondeur.
- 17 sondages destructifs, descendus à 50 m de profondeur, équipés pour diagraphies gamma-ray.
- 3 sondages carottés descendus à 50 m de profondeur, dont un sondage équipé pour diagraphie gamma-ray.

#### En G2 AVP :

- 15 sondages carottés dont 10 descendus à 50 m, 2 à 15 m et 3 à 7 m
- 31 sondages pressiométriques dont 6 descendus à 50 m et 2 descendus à 40 m, dont 1 équipé pour diagraphie gamma-ray.
- 46 sondages destructifs descendus à 50 m dont 24 équipés pour diagraphie gamma-ray

- 18 sondages destructifs descendus à 50 m avec essais de remplissage gravitaire.

Les échantillons prélevés dans les sondages carottés ont permis de réaliser le programme d'essais en laboratoire suivant :

- 17 essais de cisaillement dans les Marnes Infragypseuses, les Sables verts ou le Calcaire de Saint-Ouen.
- 17 packs d'essais d'identification des sols pour classification GTR

L'ensemble des études hydrogéologiques réalisées a reposé sur 9 ouvrages piézométriques crépinés dans le Calcaire de Saint-Ouen avec un suivi en continu sur 4 d'entre eux.

**Le maillage et le programme des sondages réalisés satisfont les préconisations imposées par l'Inspection Générale des Carrières dans sa notice technique du 31 janvier 2016, encadrant les travaux d'injection des anomalies liées à la dissolution du gypse antéludien.**

**Soit : 1 sondage destructif / 500 m<sup>2</sup> de bâti descendu jusqu'au toit du Calcaire grossier et la réalisation de diagraphies gamma-ray sur la moitié des sondages (quantité arrondie à l'entier inférieur).**

Le plan d'implantation des investigations réalisées figure en annexe du rapport de synthèse A120891. Reporté sur la figure ci-dessous, il permet de rendre compte de la répartition des sondages et donc de l'uniformité du maillage d'investigation.

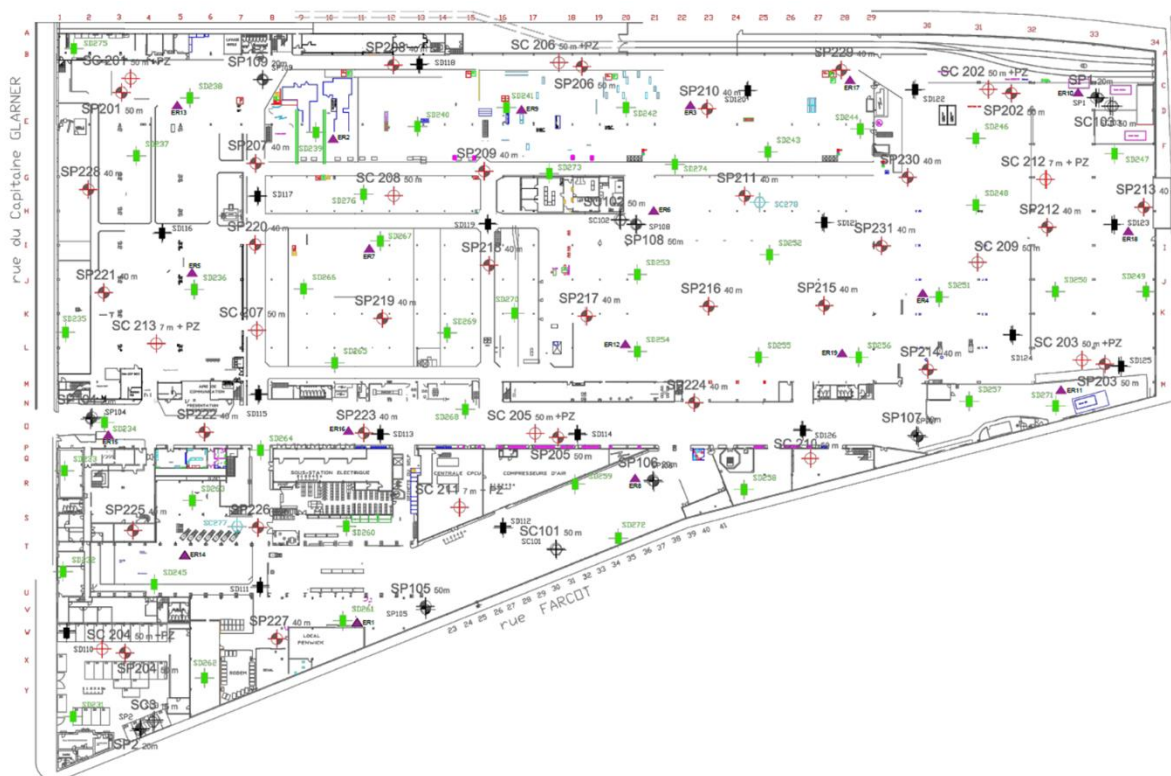


Figure 6 : Extrait du plan d'implantations des investigations géotechniques

### 4.3. Méthodologie d'analyse

L'analyse du phénomène de dissolution du gypse antéludien repose sur une analyse multicritère des données issues des investigations. Avec la nature et le volume des données obtenues à l'issue de la G2 AVP, les éventuelles poches de dissolutions sont mises en évidence par le cumul établi des critères suivants :

- **Dans les sondages carottés**, la mention en description d'éléments gypseux, ou le faible taux de récupération systématique à certaines profondeurs,
- **Dans les sondages destructifs** (et donc par extension, pressiométriques), des vitesses d'avancement élevées, proches de la vitesse de chute atteinte lors de l'étalonnage ainsi qu'une diminution de la pression d'injection,
- **Lors des essais pressiométriques**, des faibles valeurs de paramètres (pressions limites < 0,5 MPa, modules < 10 MPa),
- **Sur les diagraphies Gamma-ray**, une chute de la radioactivité naturelle (< 5cps dans les Marnes et Caillasses),
- **Sur les essais d'injection**, des surconsommations importantes de coulis.

### 4.4. Analyse des paramètres de forage

L'analyse des paramètres de forage, et notamment de la vitesse d'avancement, fait l'objet d'un chapitre dédié avec une cartographie des hauteurs décomprimées cumulées au chapitre 6.

### 4.5. Analyse des sondages carottés

Le tableau ci-dessous présente une analyse réalisée sur les 10 sondages carottés descendus à 50 m de profondeur réalisés en G2 AVP, jugés représentatifs du site par leurs localisations réparties sur l'ensemble de la parcelle. Il a été relevé sur ces carottés 22 passages avec des taux de récupération inférieurs à 50 %.

Sur ces passes, ainsi que sur l'ensemble de ces sondages, il n'est fait qu'une fois la mention de gypse dans les descriptions lithologique.

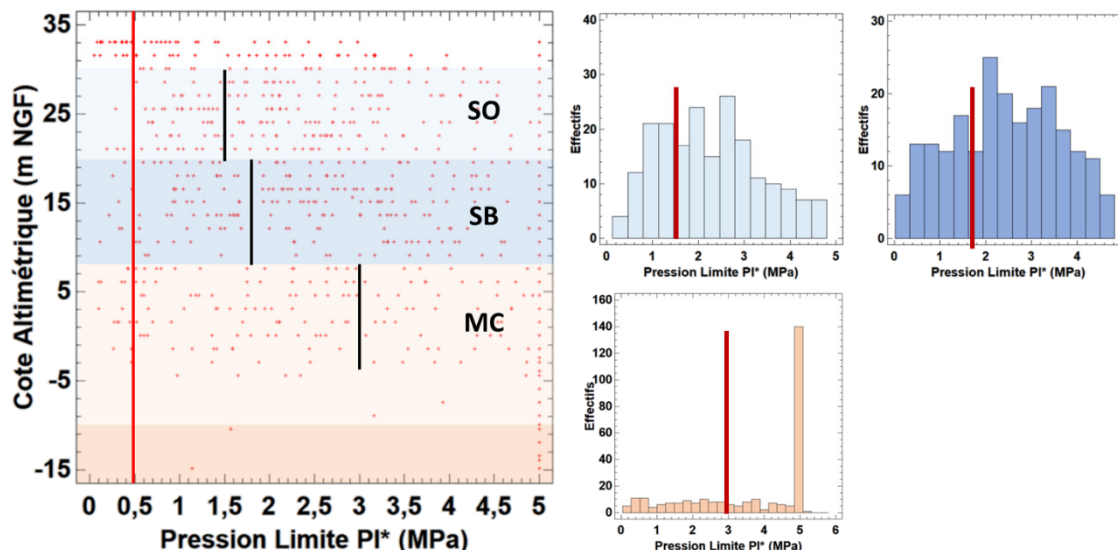
Sur l'ensemble de ces passes à faible taux de récupération, une seule est directement corrélable avec les passes altérées/décomprimées relevées sur les sondages destructifs/pressiométriques voisins (mise en évidence en jaune).

**Tableau 2 : Synthèse des faibles récupérations dans les sondages carottés.**

Sondage Carotté	Horizon	Toit		Base		Epaisseur m	Commentaires
		m NGF	m/TN	m NGF	m/TN		
SC201	SO	26,6	8	20,6	14	6	Récupération < 50%
SC201	MC	-4,9	39,5	-10,9	45,5	6	Récupération < 50%
SC202	SO	28,1	6,5	26,6	8	1,5	Récupération < 50%
SC202	SO	23,6	11	22,1	12,5	1,5	Récupération < 50%
SC202	SO	20,4	14,2	19,1	15,5	1,3	Mention de gypse en carotté
SC202	SB	16,5	18,1	9,1	25,5	7,4	Récupération < 50%
SC202	MC	1,3	33,3	-0,4	35	1,7	Récupération < 50%
SC202	MC	-9,4	44	-10,9	45,5	1,5	Récupération < 50%
SC204	SO	26,6	8	25,1	9,5	1,5	Récupération < 50%
SC204	MC	7,3	27,3	4,3	30,3	3	Récupération < 50%
SC205	SO	27,6	7	26,6	8	1	Récupération < 50%
SC205	SO	25,1	9,5	24,6	10	0,5	Récupération < 50%
SC206	SO	28,1	6,5	26,6	8	1,5	Récupération < 50%
SC206	SO	20,6	14	19,1	15,5	1,5	Récupération < 50%
SC206	MC	5,6	29	4,1	30,5	1,5	Récupération < 50%
SC208	SO	30,95	3,65	29,6	5	1,35	Récupération < 50%
SC208	SO	23,6	11	22,1	12,5	1,5	Récupération < 50%
SC208	MC	7,1	27,5	4,1	30,5	3	Récupération < 50%
SC210	SO	31,1	3,5	29,6	5	1,5	Récupération < 50%
SC210	SO	28,1	6,5	26,6	8	1,5	Récupération < 50%
SC210	SO	22,1	12,5	20,6	14	1,5	Récupération < 50%
SC210	MC	1,1	33,5	-1,9	36,5	3	Récupération < 50%

## 4.6. Analyse des essais pressiométriques

Les figures ci-dessous illustrent la dispersion des pressions limites en fonction de la cote altimétrique, ainsi que les répartitions des paramètres pressiométriques sur les trois horizons potentiellement gypsifères (Calcaire de Saint-Ouen, Sables de Beauchamp, et Marnes et Caillasses).



**Figure 7 : Graphique de dispersion des pressions limites en fonction de la profondeur (à gauche), histogrammes de répartition des pressions limites dans le Calcaire de Saint-Ouen, les Sables de Beauchamp et les Marnes et Caillasses (à droite).**

La dispersion des paramètres ne met pas en évidence de biais statistique qui se manifesterait par un fort effectif d'essais aux faibles paramètres ( $PI^* < 0,5$  MPa). De plus, il n'est pas observé de concentration d'essais médiocres à des profondeurs données sur des épaisseurs régulières.

Les histogrammes de répartitions ne permettent pas non plus de montrer l'existence d'une forte population d'essais aux faibles caractéristiques. Les pressions limites suivent, pour le Calcaire de Saint-Ouen et les Sables de Beauchamp, une répartition classique suivant une loi normale ou log-normale.

De plus, une très grande majorité des paramètres mesurés dans les Marnes et Caillasses sont bons à très bons.

## 4.7. Analyse des essais de remplissage

Un tableau de synthèse des essais de remplissage est reporté ci-dessous. Il est à noter qu'il n'y a pas eu d'essais sélectifs sur les Marnes et Caillasses ou le Calcaire de Saint-Ouen. L'ensemble des formations a été testé. Le diamètre des forages destructifs a été déduit de notre retour d'expérience, celui-ci n'étant mentionné ni dans le rapport ni dans les procès-verbaux des sondages réalisés.

**Tableau 3 : Synthèse des essais de remplissage gravitaire des terrains**

Essai	Longueur	Diamètre	Niveau Décanté	Niveau Décanté	Volume Theorique	Volume injecté
-	m	m	m/TN	m NGF	m³	m³
ER1	50	0,15	7,9	26,7	<b>0,74</b>	<b>5</b>
ER2	50	0,15	6,7	27,9	<b>0,77</b>	<b>8,2</b>
ER3	50	0,15	11	23,6	<b>0,69</b>	<b>11</b>
ER4	50	0,15	8,4	26,2	<b>0,74</b>	<b>5</b>
ER5	50	0,15	9,4	25,2	<b>0,72</b>	<b>15</b>
ER6	50	0,15	6,2	28,4	<b>0,77</b>	<b>11,7</b>
ER7	50	0,15	9,7	24,9	<b>0,71</b>	<b>5,8</b>
ER8	50	0,15	10,3	24,3	<b>0,70</b>	<b>15</b>
ER9	50	0,15	9,4	25,2	<b>0,72</b>	<b>8,7</b>
ER10	50	0,15	7,6	27	<b>0,75</b>	<b>12,5</b>
ER11	50	0,15	6,4	28,2	<b>0,77</b>	<b>8,4</b>
ER12	50	0,15	8,6	26	<b>0,73</b>	<b>8</b>
ER13	50	0,15	10,2	24,4	<b>0,70</b>	<b>4,7</b>
ER14	50	0,15	11,6	23	<b>0,68</b>	<b>10,8</b>
ER15	50	0,15	8,1	26,5	<b>0,74</b>	<b>4,5</b>
ER16	50	0,15	6,7	27,9	<b>0,77</b>	<b>5,6</b>
ER17	50	0,15	7,3	27,3	<b>0,75</b>	<b>3,6</b>
ER18	50	0,15	7,7	26,9	<b>0,75</b>	<b>4,7</b>
ER19	50	0,15	9,1	25,5	<b>0,72</b>	<b>4,5</b>

Le coulis utilisé admet une composition de 865 litres d'eau, 360kg de ciment, et 30 kg de bentonite, sans sablon. S'agissant d'un coulis très liquide, celui-ci a pu être lavé par la nappe et son écoulement. Une hypothèse qui peut être confirmée par le niveau du coulis après décantation, qui s'établit à des hauteurs proches du niveau de la nappe (entre 27 et 25 m NGF).

Les volumes injectés varient globalement entre 5 et 15 m³ de coulis par sondage. **Ces volumes ne témoignent pas de la présence de cavités établies.**

## 4.8. Analyse des diagraphies gamma-ray

Sur l'ensemble des sondages destructifs où des diagraphies gamma-ray ont été réalisées, on notera quelques pics de vitesses d'avancement élevées frôlant ou dépassant les 750 m/h (vitesse d'étalonnage à vide), dans le Calcaire de Saint-Ouen et les Marnes et Caillasses.



Le sondage SD245, dont les extraits du log sont reportés dans la figure ci-après, a été choisi comme sondage représentatif car faisant état, dans le rapport de mission G2 AVP, de zones et passages très décomprimés.

On note, dans le Calcaire de Saint-Ouen, un léger dépassement des 750 m/h en vitesse d'avancement, avec un taux de radioactivité naturelle plutôt de l'ordre de 15 cps. Une radioactivité naturelle qui semble ne pas varier ou se corrélérer aux passages à forte vitesse d'avancement.

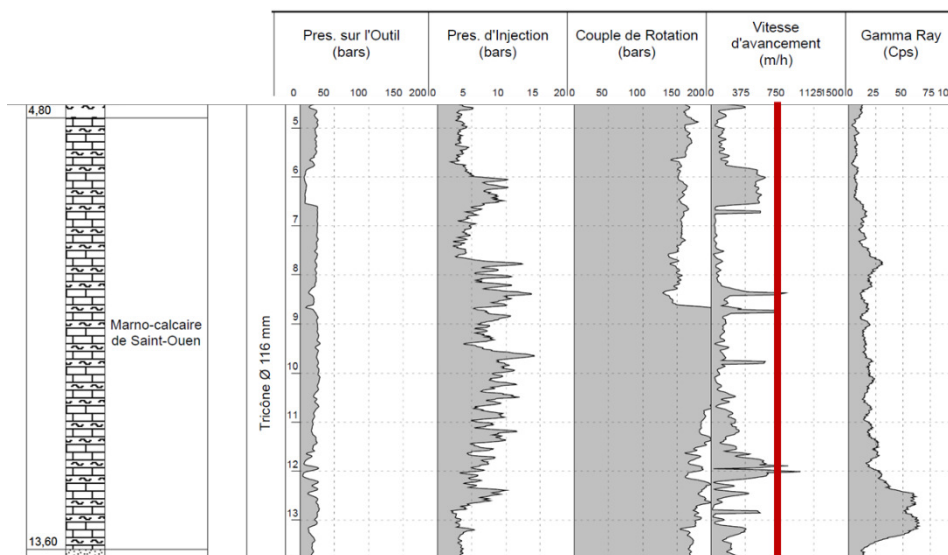


Figure 8 : Paramètres de forages et radioactivité naturelle dans le Calcaire de Saint-Ouen – Extrait sondage SD235

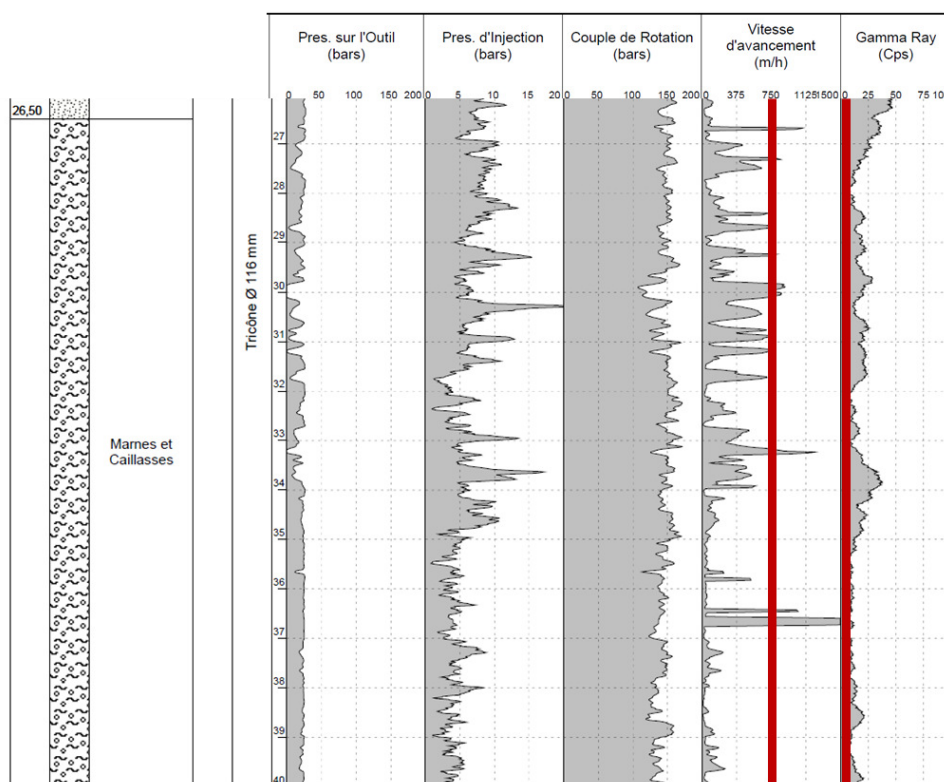


Figure 9 : Paramètres de forages et radioactivité naturelle dans les Marnes et Caillasses – Extrait sondage SD235



## 4.9. Limite de la méthode

Les sondages sont des reconnaissances ponctuelles qui ne peuvent offrir une vision continue de l'état des terrains. Leur implantation et leur densité, guidées par la reconnaissance que nous avons du site et limitées par la présence de bâtis, permettent d'avoir une vision représentative de l'état du sous-sol, sans que l'on puisse exclure, entre deux sondages, l'existence d'une anomalie d'extension limitée qui aurait échappée aux mailles de nos investigations.

## 5. Cartographie des horizons décomprimés

### 5.1. Méthodologie

On se propose de réaliser une cartographie des franges décomprimées dans les horizons gypsifères constitués du Calcaire de Saint-Ouen, des Sables de Beauchamp et des Marnes et Caillasses, en se basant sur l'analyse des 120 logs de paramètres de forage issus des sondages destructifs et pressiométriques.

Lors de chaque foration, un étalonnage a lieu pendant lequel est mesurée la vitesse d'avancement maximale ou vitesse d'avancement à vide de la tête de forage, en m/h. Celle-ci, sur l'ensemble des investigations réalisées, se situe à une valeur proche de **750 m/h**.

L'intensité du caractère décomprimé d'une frange de terrain peut ainsi être évaluée selon la proximité des valeurs de vitesse d'avancement avec le seuil des 750 m/h, et l'épaisseur de celle-ci.

Les valeurs seuils retenues sont reportées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4 : Valeurs seuils retenues pour la vitesse d'avancement

Classification des franges décomprimées	% VMA
Frange saine	< 25
Frange faiblement décomprimée	> 25 et < 50
Frange décomprimée	> 50 et < 75
Frange très décomprimée	> 75

La coupe géologique moyenne suivante, rappelée au §3, a été appliquée à l'ensemble des 120 sondages, pour associer les paramètres aux différentes couches géologiques.

Ainsi, pour chaque forage et chaque horizon géologique ont été relevées les hauteurs cumulées **faiblement décomprimées**, **décomprimées** et **très décomprimées**, créant une base de données brutes reportée en **Annexe II** du présent rapport.

Les coordonnées des sondages, ne figurant pas à l'origine sur le rapport G2 AVP, ont été relevées sur Géoportail et incluent donc une imprécision de mesure en comparaison d'un relevé géomètre.

Ces coordonnées ont été intégrées à la base de données, permettant de réaliser une cartographie des horizons décomprimés à l'aide du Logiciel GDM.

**Nota :** Le découpage des logs de forage selon les 4 critères de vitesse d'avancement ci-dessus implique une discrétisation de la courbe de vitesse. Des légers pics de vitesse inférieurs à 20 cm d'épaisseur ont pu ne pas être consignés dans la base de données.

## 5.2. Hauteurs décomprimées cumulées dans le Calcaire de Saint-Ouen

L'horizon du Calcaire de Saint-Ouen présente une épaisseur moyenne de 9,5 m, par conséquent, il peut être pertinent de présenter les hauteurs décomprimées cumulées en pourcentage de l'épaisseur totale de la formation, tel que présenté dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5 : Correspondance entre hauteurs cumulées % d'épaisseur de la formation, Calcaire de Saint-Ouen

Calcaire de Saint-Ouen		
Couleur	Hauteurs cumulées	% de la formation
	0 à 3 m	0 à 31
	3 à 6 m	31 à 62
	6 à 9 m	62 à 93
	> 9 m	93 à 100

Les cartes des hauteurs cumulées pour chacun des trois critères de vitesses et sur l'ensemble du site pour le Calcaire de Saint-Ouen sont reportées dans les figures ci-après.

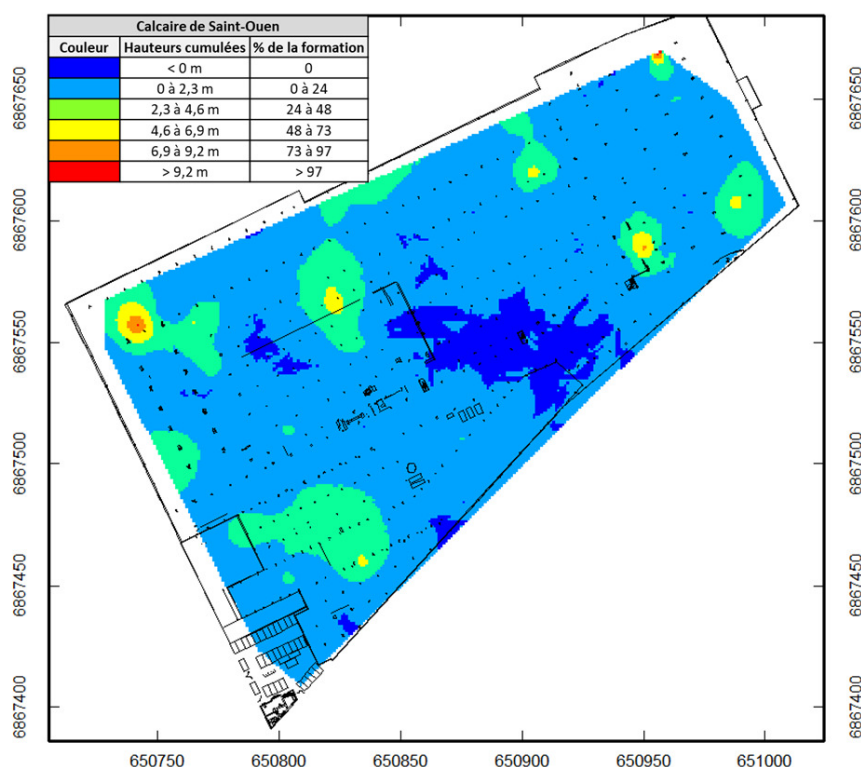


Figure 10 : Hauteurs cumulées des franges faiblement décomprimées dans le Calcaire de Saint-Ouen

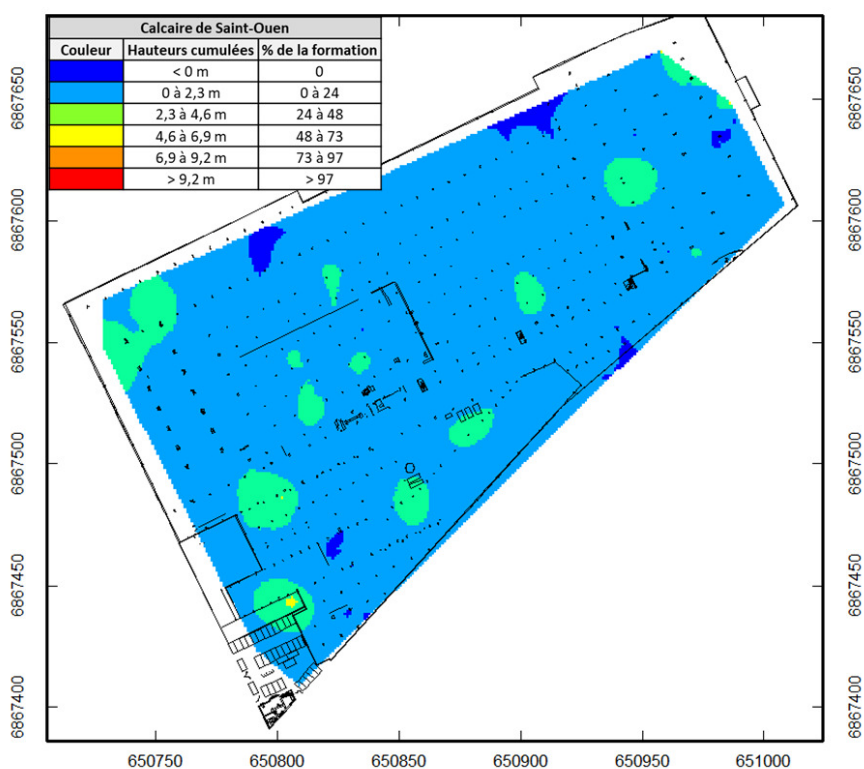


Figure 11 : Hauteurs cumulées des franges **décomprimées** dans le Calcaire de Saint-Ouen

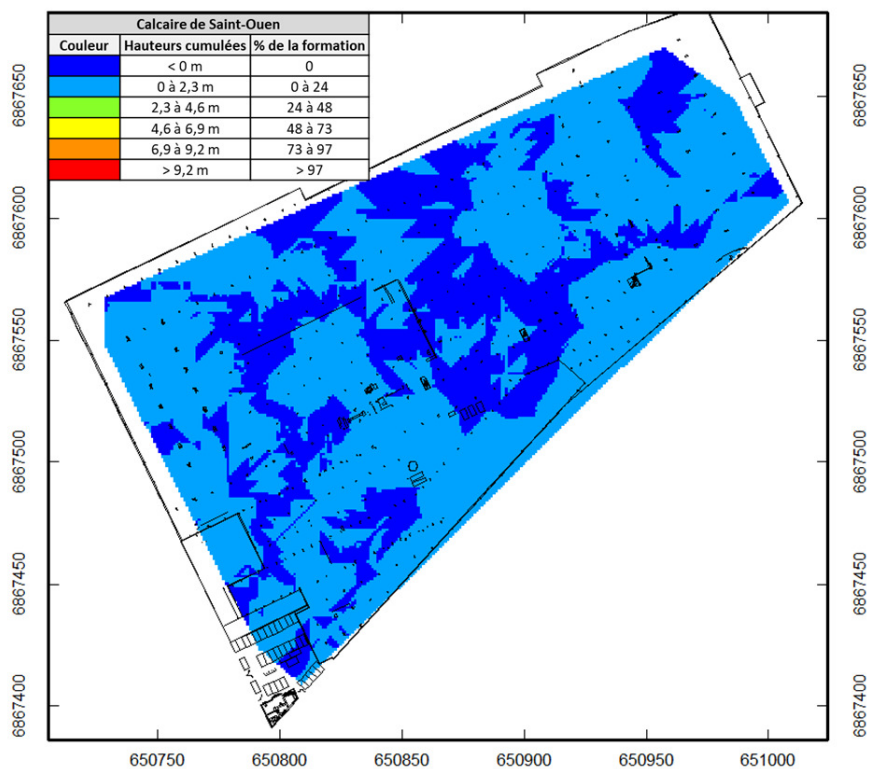


Figure 12 : Hauteurs cumulées des franges **très décomprimées** dans le Calcaire de Saint-Ouen

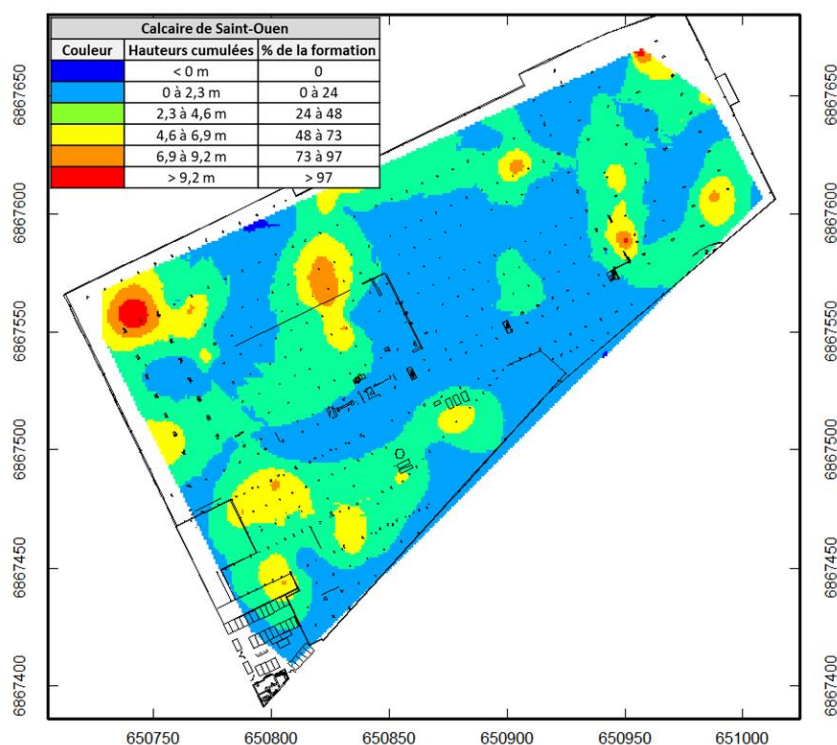


Figure 13 : Hauteurs cumulées de l'ensemble des franges faiblement à fortement décomprimées, Calcaire de Saint-Ouen

On retiendra de cette représentation cartographique que les anomalies dans le Calcaire de Saint-Ouen sont plutôt faibles à moyenne, avec une forte disparité sur l'ensemble du site. La partie sud-ouest du site et plus généralement la périphérie du site semble davantage être concernée par ces anomalies.

### 5.3. Hauteurs décomprimées cumulées dans les Sables de Beauchamp

L'horizon des Sables de Beauchamp présente une épaisseur moyenne de 12,5 m, par conséquent, il peut être pertinent de présenter les hauteurs décomprimées cumulées en pourcentage de l'épaisseur totale de la formation, tel que présenté dans le tableau ci-dessous.

Tableau 6 : Correspondance entre hauteurs cumulées % d'épaisseur de la formation, Sables de Beauchamp

Sables de Beauchamp		
Couleur	Hauteurs cumulées	% de la formation
	0 à 2 m	0 à 16
	2 à 4 m	16 à 32
	4 à 6 m	32 à 48
	6 à 8 m	48 à 64
	8 à 10 m	64 à 80
	10 à 12 m	80 à 96
	> 12 m	96 à 100

Les cartes des hauteurs cumulées pour chacun des trois critères de vitesses et sur l'ensemble du site pour les Sables de Beauchamp sont reportées dans les figures ci-après.

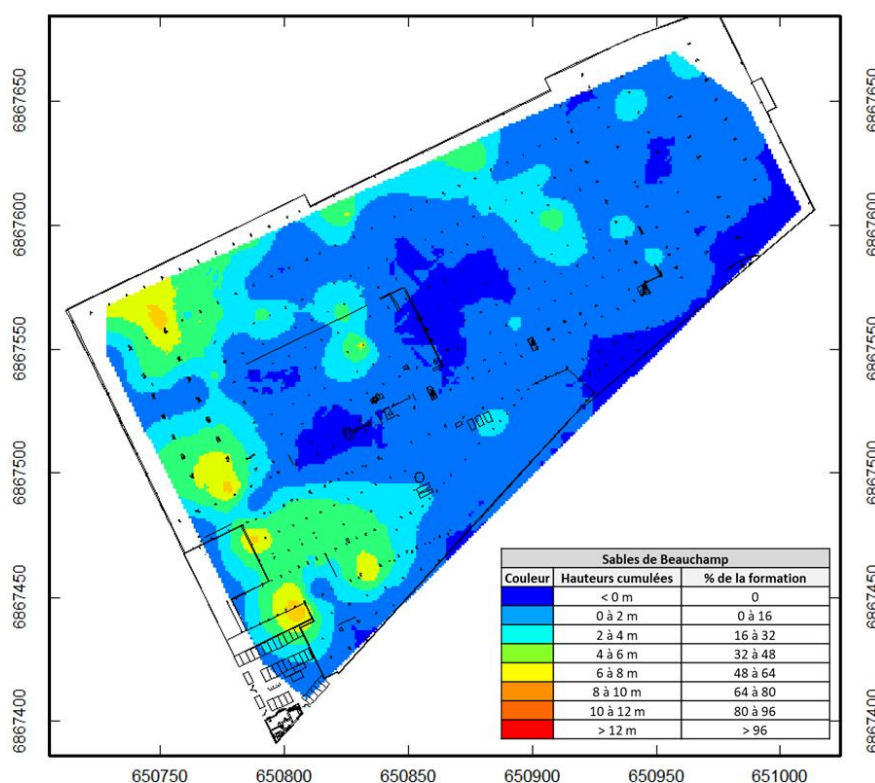


Figure 14 : Hauteurs cumulées des franges faiblement décomprimées dans les Sables de Beauchamp



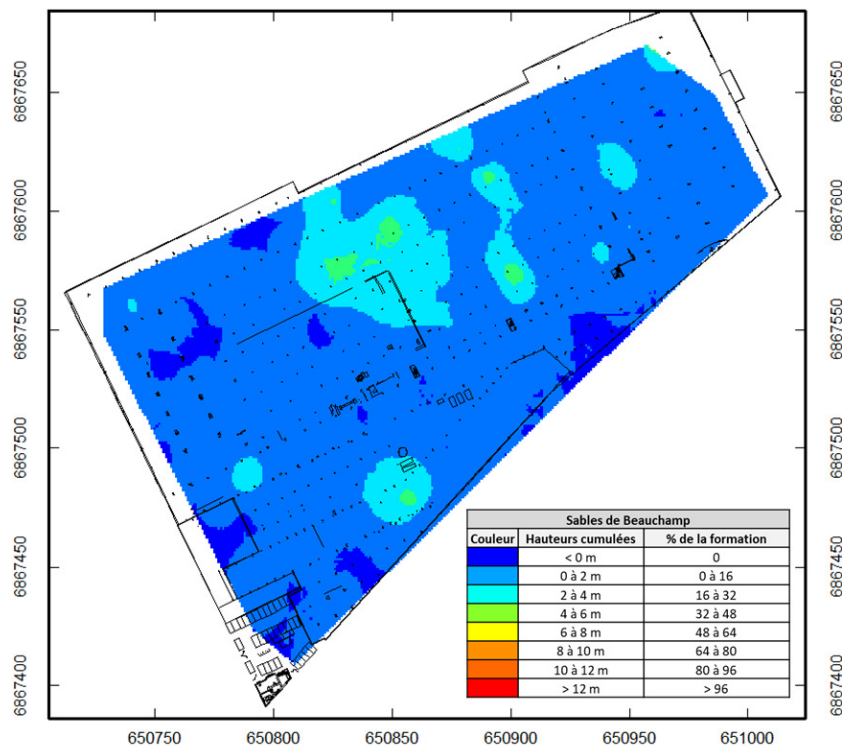


Figure 15 : Hauteurs cumulées des franges décomprimées dans les Sables de Beauchamp

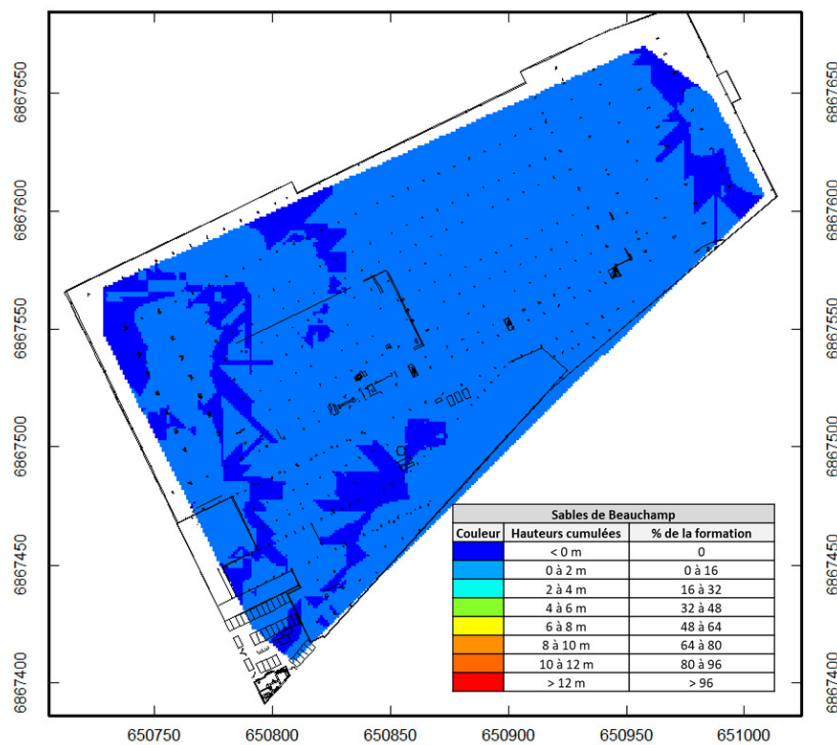


Figure 16 : Hauteurs cumulées des franges très décomprimées dans les Sables de Beauchamp

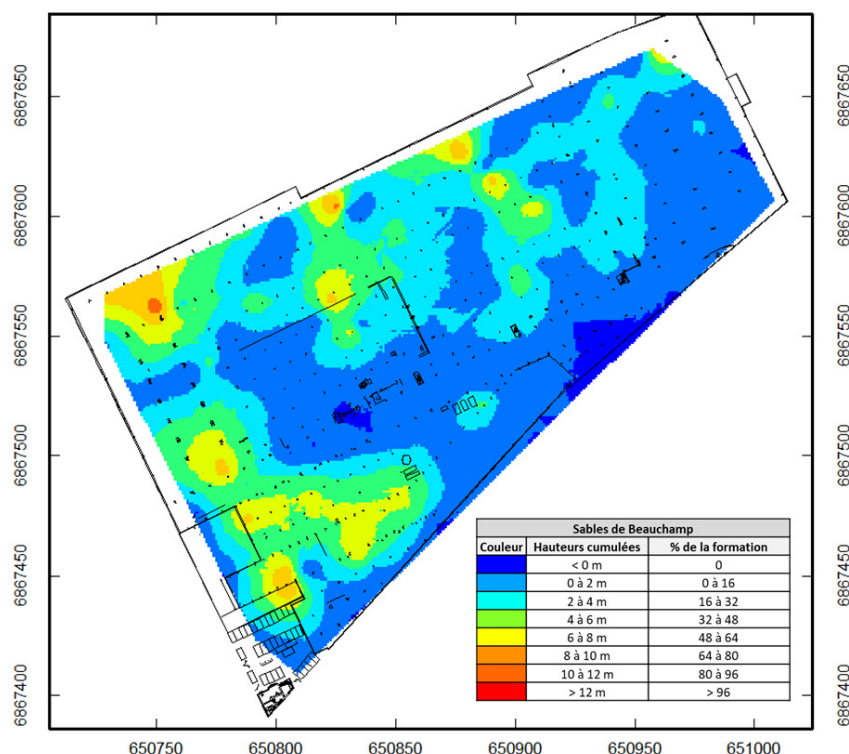


Figure 17 : Hauteurs cumulées de l'ensemble des franges faiblement à fortement décomprimées, Sables de Beauchamp

On retiendra de cette représentation cartographique que les anomalies dans les Sables de Beauchamp sont plutôt de faible intensité. La répartition de ces anomalies est plus homogène que dans le cas du Calcaire de Saint-Ouen, et concerne la presque totalité du site. Une bande allant du centre au nord-est du site semble être presque totalement épargnée par les anomalies.

## 5.4. Hauteurs décomprimées cumulées dans les Marnes et Caillasses

L'horizon du Calcaire de Saint-Ouen présente une épaisseur moyenne de 9,5 m, par conséquent, il peut être pertinent de présenter les hauteurs décomprimées cumulées en pourcentage de la formation, tel que présenté dans le tableau ci-dessous.

Tableau 7 : Correspondance entre hauteurs cumulées % d'épaisseur de la formation, Marnes et Caillasses

Marnes et Caillasses		
Couleur	Hauteurs cumulées	% de la formation
Blue	0 à 3 m	0 à 17
Green	3 à 6 m	17 à 34
Yellow	6 à 9 m	34 à 51
Orange	9 à 12 m	51 à 68
Red	> 12 m	> 68

Les cartes des hauteurs cumulées pour chacun des trois critères de vitesses et sur l'ensemble du site pour le Calcaire de Saint-Ouen sont reportées dans les figures ci-après.

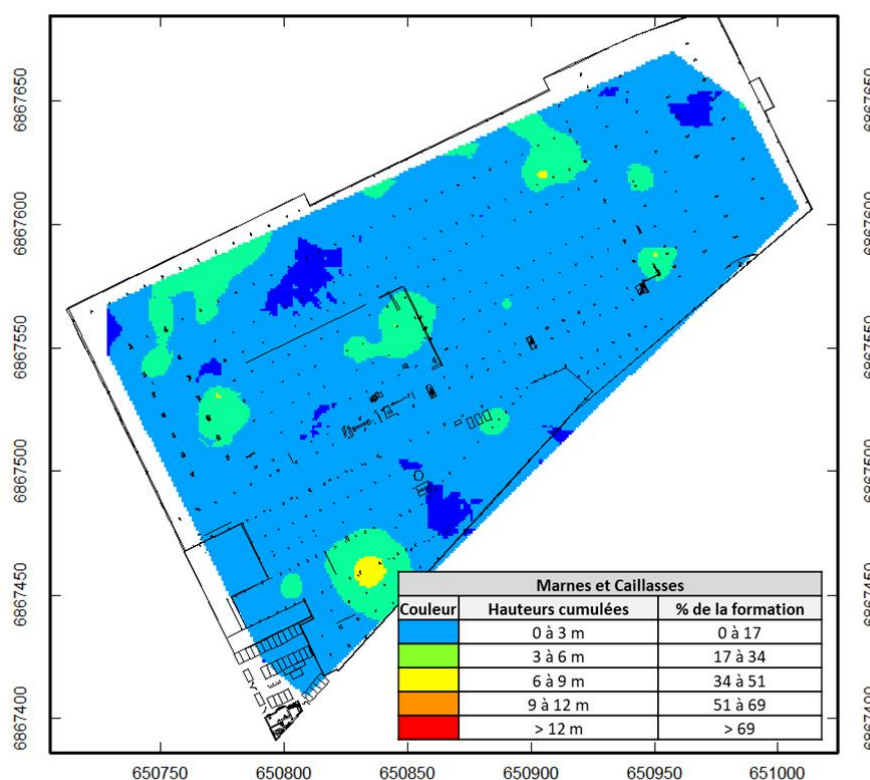


Figure 18 : Hauteurs cumulées des franges faiblement décomprimées dans les Marnes et Caillasses

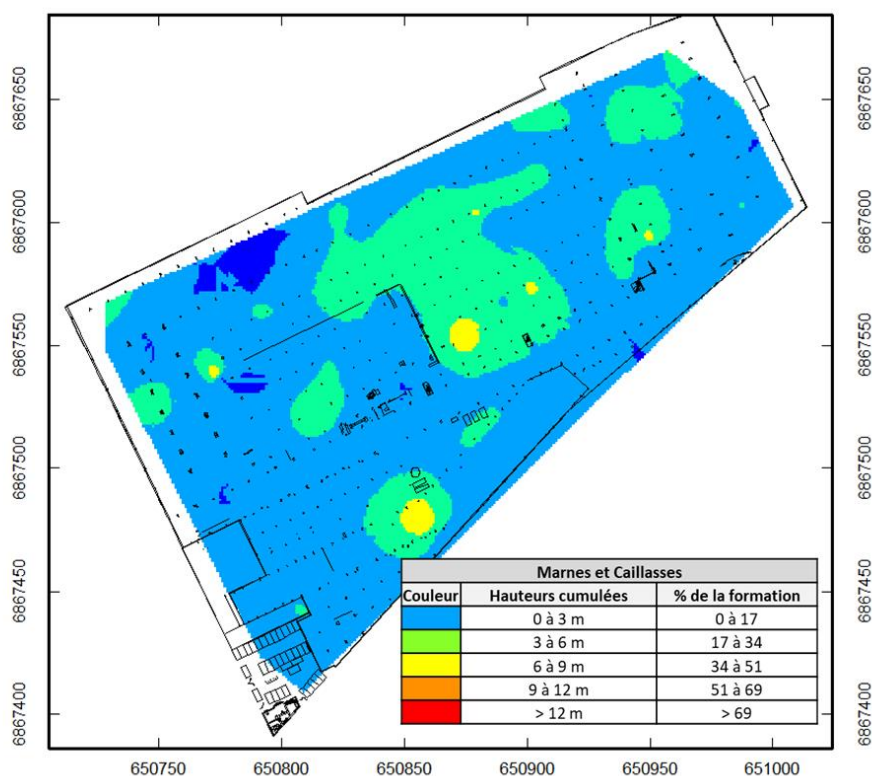


Figure 19 : Hauteurs cumulées des franges décomprimées dans les Marnes et Caillasses

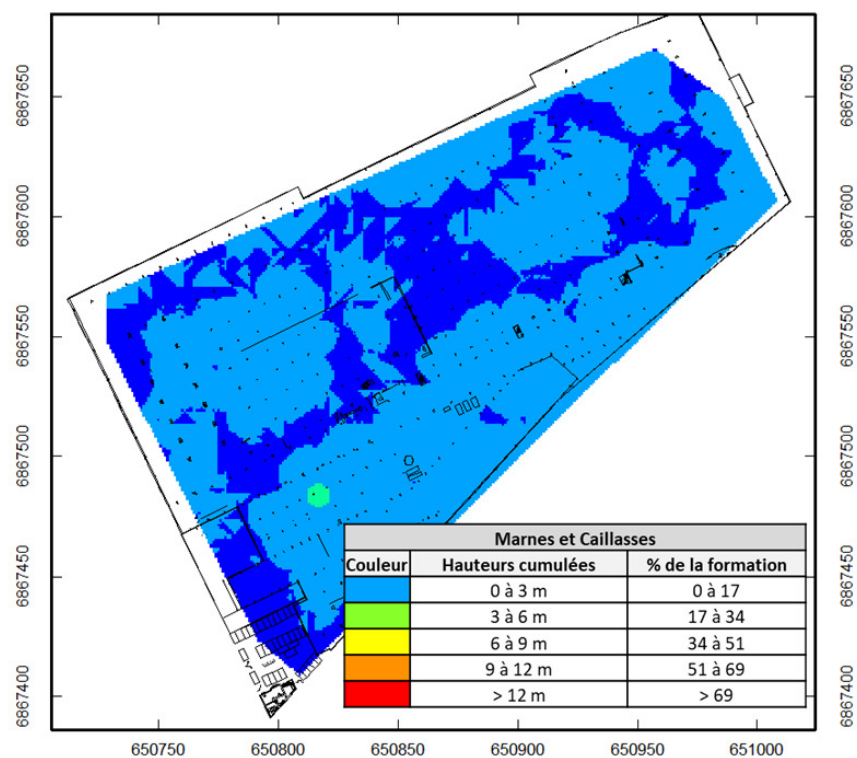


Figure 20 : Hauteurs cumulées des franges très décomprimées dans les Marnes et Caillasses

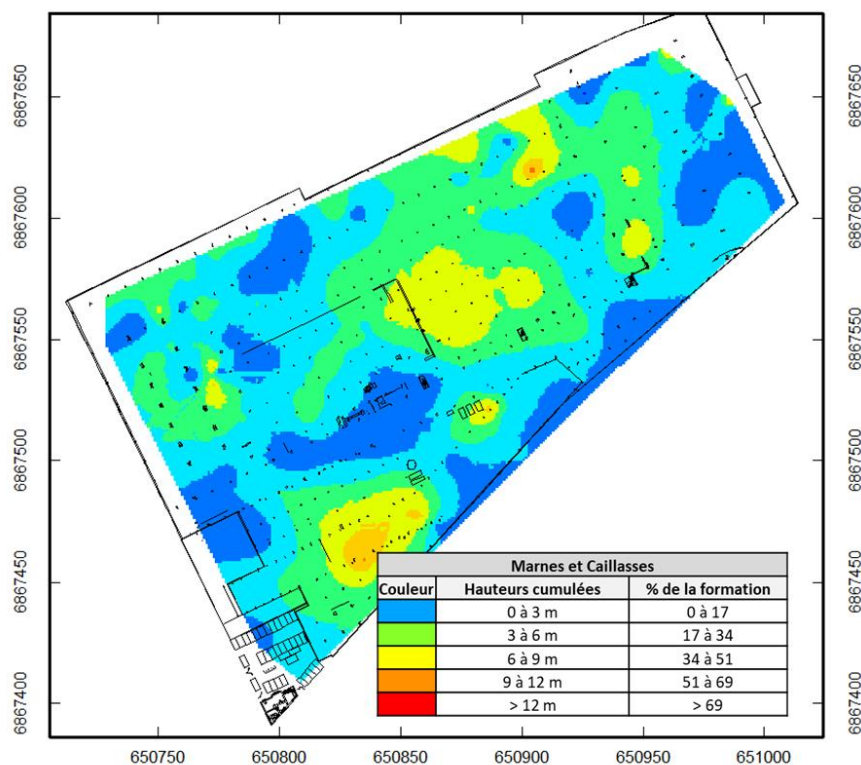


Figure 21 : Hauteurs cumulées de l'ensemble des franges faiblement à fortement décomprimées, Marnes et Caillasses

On retiendra de cette représentation cartographique que les anomalies dans les Marnes et Caillasses sont plutôt de moyenne intensité. Ces anomalies se répartissent sur l'ensemble de la zone concernée par le projet avec quelques poches notables notamment au sein du noyau central.



## 5.5. Synthèse des hauteurs décomprimées cumulées

Le tableau ci-dessous offre une vision globale des hauteurs cumulées pour chaque critère lié à la vitesse d'avancement. Il est remarquable que les trois formations présentent peu ou prou la même proportion d'horizon sain, soit près des trois quarts de leur épaisseur ; avec une quasi-absence de franges fortement décomprimées.

**Tableau 8 : Synthèse des hauteurs cumulées décomprimées sur les trois horizons**

Horizons géologiques	Total foré ml	Hauteurs cumulées décomprimées								
		Sain		Faiblement		Moyennement		Fortement		$\alpha$
		ml	%/total	ml	%/total	ml	%/total	ml	%/total	
Calcaire de Saint-Ouen	1140	822	<b>72,1</b>	171,2	<b>15,0</b>	144,5	<b>12,7</b>	2,6	<b>0,2</b>	<b>12,9</b>
Sables de Beauchamp	1500	1176	<b>78,4</b>	230,5	<b>15,4</b>	92,5	<b>6,2</b>	0,8	<b>0,1</b>	<b>6,2</b>
Marnes & Caillasses	2100	1717	<b>81,8</b>	175,6	<b>8,4</b>	194,1	<b>9,2</b>	13,1	<b>0,6</b>	<b>9,9</b>

Le rapport entre les hauteurs cumulées décomprimées et l'épaisseur cumulée de l'horizon traversée est notée  $\alpha$ . La valeur de ce paramètre permet, au regard du barème indiqué dans le tableau ci-dessous, de statuer sur le caractère décomprimé d'un horizon.

**Tableau 9 : Critères d'interprétation pour le caractère décomprimé d'un horizon géologique**

$\alpha$	Interprétation
%	-
$\alpha < 5$	Terrain très compact
$5 < \alpha < 10$	Terrain compact
$10 < \alpha < 20$	Terrain moyennement compact à décomprimé
$20 < \alpha < 30$	Terrain décomprimé
$30 < \alpha$	Terrain très décomprimé avec anomalies majeures

Il sera choisi d'intégrer dans cette valeur  $\alpha$  uniquement les anomalies de forage significatives, soit les parties moyennement et fortement décomprimées (Vitesse d'avancement > 50% de la VMA). On obtient alors, pour chacun des trois horizons :

**Tableau 10 : Valeurs de  $\alpha$  par horizon géologique étudié**

$\alpha$	Horizon géologique	Interprétation
%	-	-
<b>12,9</b>	Calcaire de Saint-Ouen	Terrain moyennement compact à décomprimé
<b>6,2</b>	Sables de Beauchamp	Terrain compact
<b>~ 10,0</b>	Marnes et Caillasses	Terrain moyennement compact à décomprimé



## 6. Traitement des terrains par injection

### 6.1. Synthèse de l'analyse

L'analyse présentée dans les chapitres 5 et 6 permet de mettre en évidence les conclusions suivantes :

- Les horizons du Calcaire de Saint-Ouen, des Sables de Beauchamp et des Marnes et Caillasses présentent des anomalies de forage plutôt moyennes sur environ 25% de leur épaisseur. Une quantité minimale, < 1%, correspond à des anomalies majeures (> 75% de la VMA).
- Selon les critères d'interprétations exposés précédemment, le Calcaire de Saint-Ouen et les Marnes et Caillasses sont considérés comme des terrains moyennement compacts à décomprimés, tandis que les Sables de Beauchamp sont considérés plutôt compacts.
- La mise en corrélation des différents paramètres issues des campagnes d'investigations (essais pressiométriques, sondages carottés, essais de remplissage, diagraphies gamma-ray), rendent compte d'horizons géologiques de caractéristiques mécaniques plutôt homogènes et globalement bons sur leurs épaisseurs respectives. Les signes de la dissolution du gypse, lorsqu'ils sont présents, sont relativement dispersés sur l'ensemble des horizons, ne permettant pas de distinguer des profondeurs récurrentes de vide ou de dissolution. Celles-ci, si elles existent, devraient constituer des poches de hauteurs faibles, inférieures à 20 cm. **De plus, l'absence de la mention de gypse sur la quasi-totalité des carottes de sol semble indiquer l'absence d'évolutions futures du phénomène de dissolution.**
- La cartographie réalisée au chapitre §5 montre une dispersion des zones décomprimées sur l'ensemble du projet, avec une zone centrale davantage concernée par une altération des Marnes et Caillasses, et une zone sud-ouest davantage concernée par l'altération du Calcaire de Saint-Ouen et des Sables de Beauchamp. La géométrie de cette disparité ajoutée à l'importante dispersion du phénomène et permet difficilement de réaliser un zonage simple pour d'éventuels travaux d'injection.

## 6.2. Impacts de l'aléa sur le projet de construction

Le projet de construction est conçu sur la base de parois de soutènement (parois moulées et voiles par passes alternées, fichées dans les Sables de Beauchamp (13 m NGF) et :

- Pour la partie en R-3, des pieux ancrés dans la partie supérieure des Marnes et Caillasses (tête de pieux à 20,3 m NGF) ;
- Pour la partie en R-1, des pieux ancrés dans la base des Sables de Beauchamp ou dans la partie supérieure des Marnes et Caillasses (tête de pieux à 26,8 m NGF).

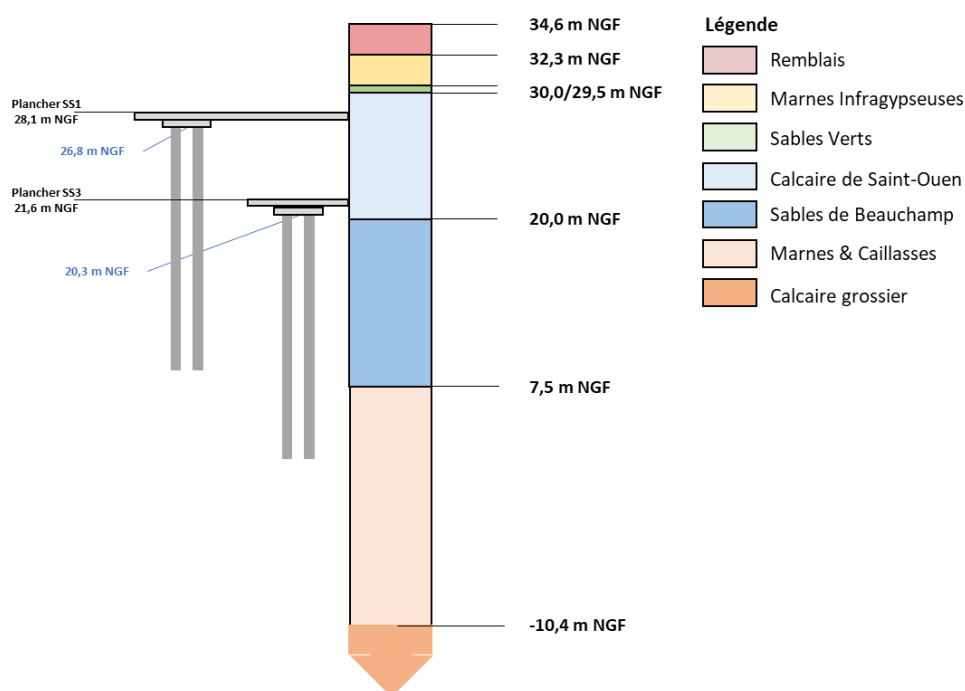


Figure 22 : Coupe géologique de principe avec situation des deux radiers et des têtes de pieux

Le caractère ponctuellement décomprimé ou altéré du Calcaire de Saint-Ouen pourrait occasionner un phénomène de perte de boue lors du creusement des parois moulées périphériques mais n'a pas d'impact sur la mobilisation du frottement sur le fût des pieux.

Les Sables de Beauchamp peuvent, à l'issue de cette analyse, être considérés comme un horizon sain exempt d'éléments indiquant un phénomène de dissolution du gypse.

L'impact des anomalies ponctuelles liées à l'altération ou à la décompression des Marnes et Caillasses n'impacterait que les pieux, en ne permettant pas, dans le cas de remontée de fontis ou d'ancrage dans une éventuelle porche de dissolution, de mobiliser la résistance de pointe des pieux.

**De manière générale, on caractérisera l'aléa dissolution du gypse antéludien comme ayant un impact plutôt faible à moyen pour le projet, en préconisant, à ce stade, un traitement par injection sélective (Calcaire de Saint-Ouen ou Marnes et Caillasses) et adapté aux risques géotechniques du projet.**

### 6.3. Optimisation du programme d'injection

A ce stade, il est donc proposé un programme d'injection optimisé, calé sur les risques géotechniques liés au projet de construction à savoir :

- Des injections gravitaires et de clavage du **Calcaire de Saint-Ouen** sur la périphérie aux abords des **parois moulées**, avec un maillage **3,5 x 3,5 m** ;
- Des injections gravitaires et de clavage dans les **Marnes et Caillasses** sur le reste de la parcelle, avec un maillage calé sur le maillage des appuis, à raison d'un forage d'injection par appui, soit en moyenne une maille de **7,2 x 7,2 m (au plus large)** ;

Les forages d'injection dans le **Calcaire de Saint-Ouen** seront descendus jusqu'à **+18,0 m NGF** pour tenir compte des hétérogénéités des couches géologiques et d'une épaisseur plus importante de Calcaire de Saint-Ouen.

Les forages d'injection dans les **Marnes et Caillasses** seront descendus jusqu'à **-10 m NGF** avec des tubes lisses jusqu'à **+10 m NGF**, de manière à éviter autant que possible l'injection du Calcaire de Saint-Ouen et des Sables de Beauchamp.

### 6.4. Mise en œuvre des travaux d'injection

La méthodologie de traitement par injection devra être conforme à la notice technique encadrant les travaux d'injection des anomalies liées à la dissolution du gypse antéludien de l'Inspection générale des carrières en date du 31 janvier 2016.

#### 6.4.1. Forages d'injection

Les forages seront réalisés en rotation simple et sous un fluide permettant la tenue des parois de forage (boue bentonitique, eau claire, rover, ...).

Pour les forages liés à la paroi moulée, ils seront descendus jusqu'à la base moyenne du Calcaire de Saint-Ouen **+ 2,0 m** soit à une **cote de 18,0 m NGF (à partir d'une cote de plateforme de 31,65 m NGF)**, tenant compte du pendage des couches géologiques et de la variabilité d'épaisseur des horizons géologiques.

Pour les forages au droit des appuis, ils seront descendus jusqu'à la base moyenne des Marnes et Caillasses soit à une **cote de -10,0 m NGF (à partir d'une cote de plateforme de 31,65 m NGF)**.

L'enregistrement des paramètres de forage suivant sera indispensable :

- Vitesse d'avancement ;
- Pression sur l'outil ;
- Couple de rotation ;
- Pression d'injection.

Un essai d'étalonnage à vide devra être réalisé à différentes profondeurs.

Le diamètre de foration devra **être a minima de 100 mm** et s'adapter à l'équipement prévu.

Les dimensions du maillage de forage devront être de 1 sondage par appui soit une maille de **7,2 x 7,2 m** Le maillage sera resserré à **3,5 x 3,5 m sur toute la périphérie le long des futures parois moulées**.

Les forages devront être équipés en **tubes PVC crépinés de 60 mm** de diamètre au minimum.

Dans le cas de comblement de vides superposés en utilisant un seul forage, il y aura lieu d'adopter des dispositions spéciales pour assurer la mise en œuvre du clavage.

#### 6.4.2. Injections gravitaires

L'injection gravitaire devra être menée en utilisant un coulis de résistance à la compression minimale de **1,4 MPa à 28 jours**.

Le ciment utilisé doit pouvoir résister à l'action chimique des eaux séléniteuses.

#### 6.4.3. Injections de clavage

Les injections de clavage seront à réaliser en respectant un temps de prise du coulis gravitaire de **7 jours minimum**. Le coulis utilisé devra être injecté sous une **pression minimale de 5 bars**, et adopter une résistance à la compression de **2,2 MPa à 28 jours**.

#### 6.4.4. Injections de traitement

Les injections de traitement étant liées aux fontis et aux cloches de fontis et ceux-ci étant absents, celles-ci sont considérées comme non nécessaires pour le traitement des anomalies liées au projet.

#### 6.4.5. Qualité des matériaux

Les matériaux utilisés pour l'injection devront être admis à la marque NF « Liants hydrauliques » et être conformes aux normes en vigueur sur les ciments, notamment les normes NF EN 197-1 d'avril 2012 et NF 197-2 de février 2001.

Ils devront permettre leur utilisation en milieu agressif et être conformes aux normes NF P 15-319 de janvier 2014 pour les travaux en eau à haute teneur en sulfate.

La bentonite sodique ou activée sera compatible avec les qualités de ciment indiquées ci-avant.

Le sablon fin devra posséder une granulométrie de 0 à 2 mm maximum.

**L'usage de cendres volantes et de cendres d'incinération d'ordures ménagères seront proscrites.**

Des essais de convenance et de contrôle sont à prévoir tout au long des travaux d'injection. **Des essais supplémentaires sont susceptibles d'être demandés par l'Inspection Générale des Carrières.**

#### 6.4.6. Sondages de contrôles

28 jours minimum après la fin des injections de clavages, il sera demandé la réalisation de sondages pressiométriques de contrôle à raison de 1 pour 10 forages d'injection.

Un rapport final de reconnaissance des sols sera à réaliser par l'entreprise en charge des travaux d'injection, comprenant au minimum le plan d'implantation des forages d'injection et de contrôle, l'ensemble des diagraphies des forages et les essais à vide correspondant, ainsi qu'une analyse technique par un géotechniciens des résultats des travaux d'injection et une conclusion sur l'atteinte des objectifs.

**En cas de résultats non concluant des sondages de contrôle, il sera nécessaire de reprendre les travaux d'injection.**

### 6.5. Incertitudes résiduelles

Les sondages sont des reconnaissances ponctuelles qui ne peuvent refléter avec exactitude les variations latérales des terrains.

De même, certains sondages réalisés dans le cadre de la mission G2 AVP présentent une variation de la pression sur l'outil lors de la foration, entraînant une variation de la vitesse d'avancement en cours de forage dont l'analyse seule ne peut exclure des anomalies n'ayant pas été mise en évidence dans l'analyse du §5.

En revanche, le programme d'injection défini précédemment tient compte de cette incertitude et est adapté aux risques géotechniques identifiés, notamment dans le cas d'anomalies dans les Marnes et Caillasses.

## 6.6. Suivi d'exécution des travaux d'injection

**Une mission d'Assistance à Maîtrise d'Ouvrage Géotechnique sera réalisée spécifiquement pour le sujet du programme d'injection, avec pour objectifs :**

- L'analyse technique des réponses des groupements d'entreprise vis-à-vis de la problématique du gypse (programme d'injection, notes et réflexions géotechniques) ;
- Le suivi d'exécution des travaux d'injection, notamment pour la conformité des travaux d'injection avec le cahier des charges et l'analyse des logs de sondage pour estimer le besoin d'injections complémentaires en cas de détection d'anomalies ;

## 7. Enchaînement des missions géotechniques

Le présent rapport est un élément d'un corpus de 5 rapports dont l'ensemble répond aux exigences d'une étude géotechnique de type G2 PRO selon la norme NF P94-500 de novembre 2013. Les conclusions des pièces de cette mission sont interdépendantes.

Conformément à l'enchaînement des missions géotechniques définies par la norme NF P 94 500, elle doit être poursuivie par la phase DCE-ACT de la mission G2.

**Le présent rapport fourni un avis technique sur l'aléa dissolution du gypse antéludien, son impact sur le projet de construction et les estimations techniques et financières pour la réduction du risque.**

Pour la phase de réalisation des travaux, une mission de supervision géotechnique (mission G4) devra être réalisée. Elle comportera, d'une part, la validation des documents géotechniques produits par l'entreprise, et d'autre part le suivi géotechnique du chantier, permettant de s'assurer que les terrains rencontrés présentent des caractéristiques géotechniques cohérentes avec les hypothèses faites dans le cadre des études, et le cas échéant définir en concertation avec l'entreprise les adaptations nécessaires.



### **Observations sur l'utilisation du rapport**

Ce rapport, ainsi que les cartes ou documents, et toutes autres pièces annexées constituent un ensemble indissociable. Les incertitudes ou les réserves qui seraient mentionnées dans la prise en compte des résultats et dans les conclusions font partie intégrante du rapport.

En conséquence, l'utilisation qui pourrait être faite d'une communication ou d'une reproduction partielle de ce rapport et de ses annexes ainsi que toute interprétation au-delà des énonciations d'Antea Group ne sauraient engager la responsabilité de celui-ci. Il en est de même pour une éventuelle utilisation à d'autres fins que celles définies pour la présente prestation.

Les résultats des prestations et des investigations s'appuient sur un échantillonnage ; ce dispositif ne permet pas de lever la totalité des aléas liés à l'hétérogénéité des milieux naturels ou artificiels étudiés. Par ailleurs, la prestation a été réalisée à partir d'informations extérieures non garanties par Antea Group ; sa responsabilité ne saurait être engagée en la matière.

Antea Group s'est engagé à apporter tout le soin et la diligence nécessaire à l'exécution des prestations et s'est conformé aux usages de la profession. Antea Group conseille son Client avec pour objectif de l'éclairer au mieux. Cependant, le choix de la décision relève de la seule compétence de son Client.

Le Client autorise Antea Group à le nommer pour une référence scientifique ou commerciale. A défaut, Antea Group s'entendra avec le Client pour définir les modalités de l'usage commercial ou scientifique de la référence.

Ce rapport devient la propriété du Client après paiement intégral de la mission, son utilisation étant interdite jusqu'à ce paiement. A partir de ce moment, le Client devient libre d'utiliser le rapport et de le diffuser, sous réserve de respecter les limites d'utilisation décrites ci-dessus.

Pour rappel, les conditions générales de vente ainsi que les informations de présentation d'Antea Group sont consultables sur : <https://www.anteagroup.fr/fr/annexes>



# ANNEXES

Annexe I :       Synoptique des missions d'ingénierie géotechnique – Extrait de la norme NF P 94-500 de novembre 2013

Annexe II :       Hauteurs décomprimées relevées sur chaque forage, base de données.

# Annexe I : **Synoptique des missions d'ingénierie géotechnique –** **Extrait de la norme NF P 94-500 de novembre 2013**

## Schéma d'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique

Enchaînement des missions G1 à G4	Phases de la maîtrise d'œuvre	Mission d'ingénierie géotechnique (GN) et Phase de la mission		Objectifs à atteindre pour les ouvrages géotechniques	Niveau de management des risques géotechniques attendu	Prestations d'investigations géotechniques à réaliser
Étape 1 : <b>Étude géotechnique préalable (G1)</b>		Étude géotechnique préalable (G1) Phase Étude de Site (ES)		Spécificités géotechniques du site	Première identification des risques présentés par le site	Fonction des données existantes et de la complexité géotechnique
	Étude préliminaire, esquisse, APS	Étude géotechnique préalable (G1) Phase Principes Généraux de Construction (PGC)		Première adaptation des futurs ouvrages aux spécificités du site	Première identification des risques pour les futurs ouvrages	Fonction des données existantes et de la complexité géotechnique
Étape 2 : <b>Étude géotechnique de conception (G2)</b>	APD/AVP	Étude géotechnique de conception (G2) Phase Avant-projet (AVP)		Définition et comparaison des solutions envisageables pour le projet	Mesures préventives pour la réduction des risques identifiés, mesures correctives pour les risques résiduels avec détection au plus tôt de leur survenance	Fonction du site et de la complexité du projet (choix constructifs)
	PRO	Étude géotechnique de conception (G2) Phase Projet (PRO)		Conception et justifications du projet		Fonction du site et de la complexité du projet (choix constructifs)
	DCE/ACT	Étude géotechnique de conception (G2) Phase DCE / ACT		Consultation sur le projet de base / Choix de l'entreprise et mise au point du contrat de travaux		
Étape 3 : <b>Études géotechniques de réalisation (G3/G4)</b>		À la charge de l'entreprise	À la charge du maître d'ouvrage			
	EXE/VISA	Étude et suivi géotechniques d'exécution (G3) Phase Étude (en interaction avec la phase Suivi)	Supervision géotechnique d'exécution (G4) Phase Supervision de l'étude d'exécution (en interaction avec la phase Supervision du suivi)	Étude d'exécution conforme aux exigences du projet, avec maîtrise de la qualité, du délai et du coût	Identification des risques résiduels, mesures correctives, contrôle du management des risques résiduels (réalité des actions, vigilance, mémorisation, capitalisation des retours d'expérience)	Fonction des méthodes de construction et des adaptations proposées si des risques identifiés surviennent
	DET/AOR	Étude et suivi géotechniques d'exécution (G3) Phase Suivi (en interaction avec la phase Étude)	Supervision géotechnique d'exécution (G4) Phase Supervision du suivi d'exécution (en interaction avec la phase Supervision de l'étude)	Exécution des travaux en toute sécurité et en conformité avec les attentes du maître d'ouvrage		Fonction du contexte géotechnique observé et du comportement de l'ouvrage et des avoisinants en cours de travaux
À toute étape d'un projet ou sur un ouvrage existant	Diagnostic	Diagnostic géotechnique (G5)		Influence d'un élément géotechnique spécifique sur le projet ou sur l'ouvrage existant	Influence de cet élément géotechnique sur les risques géotechniques identifiés	Fonction de l'élément géotechnique étudié

## Classification des missions d'ingénierie géotechnique (page 1/2)

L'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique (étapes 1 à 3) doit suivre les étapes de conception et de réalisation de tout projet pour contribuer à la maîtrise des risques géotechniques. Le maître d'ouvrage ou son mandataire doit faire réaliser successivement chacune de ces missions par une ingénierie géotechnique. Chaque mission s'appuie sur des données géotechniques adaptées issues d'investigations géotechniques appropriées.

### **ETAPE 1 : ETUDE GEOTECHNIQUE PREALABLE (G1)**

Cette mission exclut toute approche des quantités, délais et coûts d'exécution des ouvrages géotechniques qui entre dans le cadre de la mission d'étude géotechnique de conception (étape 2). Elle est à la charge du maître d'ouvrage ou son mandataire. Elle comprend deux phases :

#### Phase Étude de Site (ES)

Elle est réalisée en amont d'une étude préliminaire, d'esquisse ou d'APS pour une première identification des risques géotechniques d'un site.

- Faire une enquête documentaire sur le cadre géotechnique du site et l'existence d'avoisinants avec visite du site et des alentours.
- Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Fournir un rapport donnant pour le site étudié un modèle géologique préliminaire, les principales caractéristiques géotechniques et une première identification des risques géotechniques majeurs.

#### Phase Principes Généraux de Construction (PGC)

Elle est réalisée au stade d'une étude préliminaire, d'esquisse ou d'APS pour réduire les conséquences des risques géotechniques majeurs identifiés. Elle s'appuie obligatoirement sur des données géotechniques adaptées.

- Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Fournir un rapport de synthèse des données géotechniques à ce stade d'étude (première approche de la ZIG, horizons porteurs potentiels, ainsi que certains principes généraux de construction envisageables (notamment fondations, terrassements, ouvrages enterrés, améliorations de sols).

### **ETAPE 2 : ETUDE GEOTECHNIQUE DE CONCEPTION (G2)**

Cette mission permet l'élaboration du projet des ouvrages géotechniques et réduit les conséquences des risques géotechniques importants identifiés. Elle est à la charge du maître d'ouvrage ou son mandataire et est réalisée en collaboration avec la maîtrise d'œuvre ou intégrée à cette dernière. Elle comprend trois phases :

#### Phase Avant-projet (AVP)

Elle est réalisée au stade de l'avant-projet de la maîtrise d'œuvre et s'appuie obligatoirement sur des données géotechniques adaptées.

- Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Fournir un rapport donnant les hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade de l'avant-projet, les principes de construction envisageables (terrassements, soutènements, pentes et talus, fondations, assises des dallages et voiries, améliorations de sols, dispositions générales vis-à-vis des nappes et des avoisinants), une ébauche dimensionnelle par type d'ouvrage géotechnique et la pertinence d'application de la méthode observationnelle pour une meilleure maîtrise des risques géotechniques.

#### Phase Projet (PRO)

Elle est réalisée au stade du projet de la maîtrise d'œuvre et s'appuie obligatoirement sur des données géotechniques adaptées suffisamment représentatives pour le site.

- Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Fournir un dossier de synthèse des hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade du projet (valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques en particulier), des notes techniques donnant les choix constructifs des ouvrages géotechniques (terrassements, soutènements, pentes et talus, fondations, assises des dallages et voiries, améliorations de sols, dispositions vis-à-vis des nappes et des avoisinants), des notes de calcul de dimensionnement, un avis sur les valeurs seuils et une approche des quantités.

#### Phase DCE / ACT

Elle est réalisée pour finaliser le Dossier de Consultation des Entreprises et assister le maître d'ouvrage pour l'établissement des Contrats de Travaux avec le ou les entrepreneurs retenus pour les ouvrages géotechniques.

- Établir ou participer à la rédaction des documents techniques nécessaires et suffisants à la consultation des entreprises pour leurs études de réalisation des ouvrages géotechniques (dossier de la phase Projet avec plans, notices techniques, cahier des charges particulières, cadre de bordereau des prix et d'estimatif, planning prévisionnel).
- Assister éventuellement le maître d'ouvrage pour la sélection des entreprises, analyser les offres techniques, participer à la finalisation des pièces techniques des contrats de travaux.

## Classification des missions d'ingénierie géotechnique (page 2/2)

### **ETAPE 3 : ETUDES GEOTECHNIQUES DE REALISATION (G3 et G4, distinctes et simultanées)**

#### **ETUDE ET SUIVI GEOTECHNIQUES D'EXECUTION (G3)**

Cette mission permet de réduire les risques géotechniques résiduels par la mise en œuvre à temps de mesures correctives d'adaptation ou d'optimisation. Elle est confiée à l'entrepreneur sauf disposition contractuelle contraire, sur la base de la phase G2 DCE/ACT. Elle comprend deux phases interactives :

##### Phase Étude

- Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Étudier dans le détail les ouvrages géotechniques : notamment établissement d'une note d'hypothèses géotechniques sur la base des données fournies par le contrat de travaux ainsi que des résultats des éventuelles investigations complémentaires, définition et dimensionnement (calculs justificatifs) des ouvrages géotechniques, méthodes et conditions d'exécution (phasages généraux, suivis, auscultations et contrôles à prévoir, valeurs seuils, dispositions constructives complémentaires éventuelles).
- Élaborer le dossier géotechnique d'exécution des ouvrages géotechniques provisoires et définitifs : plans d'exécution, de phasage et de suivi.

##### Phase Suivi

- Suivre en continu les auscultations et l'exécution des ouvrages géotechniques, appliquer si nécessaire des dispositions constructives prédéfinies en phase Étude.
- Vérifier les données géotechniques par relevés lors des travaux et par un programme d'investigations géotechniques complémentaire si nécessaire (le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats).
- Etablir la prestation géotechnique du dossier des ouvrages exécutés (DOE) et fournir les documents nécessaires à l'établissement du dossier d'interventions ultérieures sur l'ouvrage (DIUO)

#### **SUPERVISION GEOTECHNIQUE D'EXECUTION (G4)**

Cette mission permet de vérifier la conformité des hypothèses géotechniques prises en compte dans la mission d'étude et suivi géotechniques d'exécution. Elle est à la charge du maître d'ouvrage ou son mandataire et est réalisée en collaboration avec la maîtrise d'œuvre ou intégrée à cette dernière. Elle comprend deux phases interactives :

##### Phase Supervision de l'étude d'exécution

Donner un avis sur la pertinence des hypothèses géotechniques de l'étude géotechnique d'exécution, des dimensionnements et méthodes d'exécution, des adaptations ou optimisations des ouvrages géotechniques proposées par l'entrepreneur, du plan de contrôle, du programme d'auscultation et des valeurs seuils.

##### Phase Supervision du suivi d'exécution

- Par interventions ponctuelles sur le chantier, donner un avis sur la pertinence du contexte géotechnique tel qu'observé par l'entrepreneur (G3), du comportement tel qu'observé par l'entrepreneur de l'ouvrage et des avoisinants concernés (G3), de l'adaptation ou de l'optimisation de l'ouvrage géotechnique proposée par l'entrepreneur (G3).
- Donner un avis sur la prestation géotechnique du DOE et sur les documents fournis pour le DIUO.

#### **DIAGNOSTIC GEOTECHNIQUE (G5)**

Pendant le déroulement d'un projet ou au cours de la vie d'un ouvrage, il peut être nécessaire de procéder, de façon strictement limitative, à l'étude d'un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques, dans le cadre d'une mission ponctuelle. Ce diagnostic géotechnique précise l'influence de cet ou ces éléments géotechniques sur les risques géotechniques identifiés ainsi que leurs conséquences possibles pour le projet ou l'ouvrage existant.

- Définir, après enquête documentaire, un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Étudier un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques (par exemple soutènement, causes géotechniques d'un désordre) dans le cadre de ce diagnostic, mais sans aucune implication dans la globalité du projet ou dans l'étude de l'état général de l'ouvrage existant.
- Si ce diagnostic conduit à modifier une partie du projet ou à réaliser des travaux sur l'ouvrage existant, des études géotechniques de conception et/ou d'exécution ainsi qu'un suivi et une supervision géotechniques seront réalisés ultérieurement, conformément à l'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique (étape 2 et/ou 3).

**Annexe II : Hauteurs décomprimées relevées sur chaque forage,  
base de données.**



Marno-Calcaire de Saint-Ouen								
Faiblement décomprimé			Décomprimé			Très décomprimé		
Sondage	Prof. Fin (m)	Hauteur (m)	Sondage	Prof. Fin (m)	Hauteur (m)	Sondage	Prof. Fin (m)	Hauteur (m)
TOTAL		171,22	TOTAL		144,5	TOTAL		2,55
SP1	8,8	0,2	SP104	10	0,05	SP104	11,4	0,1
SP1	13,8	0,1	SP105	10,2	0,2	SP104	12,25	0,05
SP2	7,9	0,1	SP105	12,9	0,4	SP105	6,1	0,1
SP2	9,15	0,05	SP107	10,6	0,5	SP105	6,65	0,05
SP2	9,75	0,2	SP108	12,95	0,45	SP107	5,85	0,05
SP2	11,6	0,1	SP201	14,8	2	SP107	13,3	0,3
SP2	12,1	0,2	SP203	9	1	SP108	6,05	0,05
SP2	13	0,3	SP203	14,4	0,4	SP109	14,35	0,05
SP104	5,3	0,2	SP204	7,2	0,7	SP219	5,2	1
SP107	5,7	0,65	SP204	10	2	SD112	12,5	0,4
SP107	12,2	0,5	SP204	12,8	1,8	SD113	12,3	0,1
SP108	12	0,15	SP205	11	2	SD122	14,4	0,1
SP108	14	0,8	SP205	13,5	0,7	SD126	12,7	0,2
SP109	13	0,3	SP206	13	1			
SP109	15,4	0,4	SP207	14,5	1,5			
SP201	12,8	9,4	SP209	7,5	1			
SP202	14,5	9,8	SP209	13,5	1,5			
SP202	36	1	SP210	5	0,5			
SP202	39,9	2,2	SP211	9	1			
SP203	8	1,5	SP211	14,2	1,2			
SP203	14	4	SP212	16	2			
SP204	5,5	1	SP213	9	2,2			
SP205	12	1	SP213	12,2	3			
SP206	8	0,8	SP215	14,6	1,4			
SP206	12	3	SP216	8	1,6			
SP207	5	1	SP216	14	2			
SP207	8	1	SP217	7,4	1			
SP207	12,2	2,7	SP217	13	1			
SP209	12	4	SP218	13,6	1,8			
SP210	9	1,5	SP219	12	1,6			
SP211	7,8	1,8	SP220	7	0,5			
SP211	13	4	SP220	13,2	0,6			
SP212	10,2	2,2	SP221	7	0,8			
SP213	13,8	1,6	SP221	12,2	0,7			
SP214	14	5,8	SP222	10,5	2			
SP215	6	1	SP222	14,6	1,6			
SP215	9	1	SP223	9	2			
SP215	10,5	1	SP223	11,5	1			
SP215	12,5	1,5	SP224	14	2			
SP215	20	3	SP225	7,2	0,4			
SP218	7,5	2,5	SP225	13,8	1,8			
SP218	10,2	2,2	SP228	6	0,5			
SP220	10	2,8	SP228	9	2,5			
SP220	12	1,8	SP228	11,8	1			
SP225	12	4	SP231	8,8	1,3			
SP226	8	2,8	SP231	14,6	3,4			
SP226	13,2	1,2	SD110	12,5	0,3			
SP227	8	1	SD111	14,1	0,7			
SP227	14,6	4,1	SD113	11,3	0,3			
SP229	6	1	SD114	13,2	0,2			
SP229	9	2	SD122	14,6	0,2			
SP229	12	0,5	SD125	13,3	0,3			
SP230	11,5	0,7	SD232	12,5	1,5			
SP230	14,5	1,5	SD234	12,5	1			
SD110	13,7	0,1	SD235	6,8	1,3			
SD112	7,7	0,1	SD236	12,5	1			
SD113	12,1	0,1	SD236	13,8	1			
SD115	11,45	0,05	SD237	9,5	1,1			

SD116	12,2	0,2	SD237	14,2	1			
SD117	11,6	0,2	SD238	7	1			
SD117	12,75	0,05	SD238	8,6	0,6			
SD119	7,15	0,05	SD238	11	1			
SD119	12,1	0,3	SD238	14,6	1,8			
SD119	13,55	0,05	SD239	6,2	0,4			
SD120	8,6	0,2	SD239	7,6	0,6			
SD121	7,92	0,02	SD239	13,4	0,9			
SD121	12,85	0,05	SD241	13,4	0,9			
SD123	8,65	0,15	SD241	14,2	0,6			
SD231	12,8	0,8	SD241	27,1	0,3			
SD231	14	0,45	SD242	8,4	0,9			
SD233	12,5	1	SD242	14,5	1			
SD234	7,5	0,5	SD245	7,2	0,8			
SD235	13,6	3,4	SD245	12,5	1			
SD235	14,6	1	SD245	13,2	0,4			
SD237	8,2	0,7	SD246	7,8	0,3			
SD238	9,8	0,8	SD246	8,4	0,3			
SD238	12,4	1	SD246	13,6	0,6			
SD239	12,5	4,3	SD246	14,6	0,8			
SD240	8,6	0,8	SD247	14,5	1			
SD241	7,2	0,4	SD248	14,2	0,4			
SD241	11,5	2,7	SD249	14,2	0,7			
SD242	11,8	1	SD251	12,5	0,3			
SD243	8,2	0,7	SD251	14,5	1,1			
SD243	10	0,8	SD252	7,2	0,7			
SD243	14	0,8	SD252	13,1	0,6			
SD244	8,1	0,6	SD253	12,6	0,4			
SD244	9,2	0,7	SD255	13,8	0,8			
SD244	14,4	0,4	SD255	14,6	0,4			
SD245	9,5	1,7	SD256	6	0,6			
SD245	11	1	SD256	14	1			
SD246	7,2	0,4	SD258	14	1,5			
SD247	9,2	1	SD259	3	1,8			
SD248	9	0,8	SD259	6,5	0,9			
SD249	9	1,5	SD259	9,6	0,6			
SD249	19	0,7	SD260	10,8	0,8			
SD250	8,2	0,7	SD260	12,2	1,2			
SD251	8,5	0,7	SD260	13,2	0,7			
SD252	11	0,5	SD260	14,2	0,4			
SD253	11,8	0,8	SD261	7,5	0,5			
SD256	8,5	1	SD261	9,2	0,7			
SD258	7,5	0,7	SD261	11,5	1			
SD258	12	0,8	SD261	12,2	0,4			
SD259	11,5	1	SD261	12,8	0,2			
SD259	13,2	0,4	SD263	6,4	0,9			
SD259	14,4	1	SD263	8,2	1			
SD260	6,8	1,2	SD263	9	0,6			
SD263	14,6	1,6	SD263	10,6	0,8			
SD265	7	1	SD263	11,8	0,8			
SD267	12,2	3,7	SD263	12,8	0,6			
SD267	16,2	1,9	SD264	11	0,6			
SD269	6	0,9	SD265	11	0,8			
SD275	9	0,8	SD265	12,6	0,8			
SD275	12	1,5	SD265	13,5	0,5			
ER1	7,2	0,7	SD266	7,6	0,8			
ER1	9	0,5	SD266	12,8	1,6			
ER2	6,2	0,7	SD266	13,4	0,2			
ER3	7,5	1,3	SD267	6,2	1			
ER5	10,4	0,8	SD267	14,2	1,4			
ER5	13,6	0,6	SD269	9	0,5			
ER7	5,9	0,7	SD269	11,5	1,3			

ER7	10,8	0,6	SD269	12,4	0,4			
ER7	13	0,6	SD269	13	0,5			
ER7	14,2	0,7	SD270	11,8	0,3			
ER9	5,8	0,7	SD270	12,9	0,3			
ER11	6,8	0,8	SD271	6,8	0,6			
ER11	8,2	1	SD271	8,4	0,9			
ER11	13,8	1	SD271	13,6	1,1			
ER12	7,5	0,7	SD272	14,2	0,6			
ER14	7	0,8	SD273	14	0,6			
ER14	16,2	1	SD274	7	0,5			
ER15	7,6	0,6	SD274	11,2	0,6			
ER15	14	1	SD274	14	1			
ER16	6,2	0,6	SD275	6,6	1			
ER16	11,2	2,2	SD275	13,2	0,4			
ER17	8,5	0,5	SD276	7,8	0,8			
ER17	13,2	0,2	SD276	12,8	0,6			
ER18	14	1	ER1	12,5	0,7			
ER19	12,5	1	ER2	12,6	0,8			
			ER3	12	1			
			ER3	13	0,8			
			ER6	13,4	1,2			
			ER8	13,4	0,9			
			ER8	14,2	0,7			
			ER9	12	1			
			ER10	6,5	1			
			ER10	9,2	1,7			
			ER10	12,2	1			
			ER10	14,5	2,1			
			ER12	13	1			
			ER13	13	0,8			
			ER13	14,2	0,8			
			ER14	11,9	0,9			
			ER15	12,2	0,7			
			ER19	13,6	0,6			
Sables de Beauchamp								
Faiblement décomprimé			Décomprimé			Très décomprimé		
Sondage	Prof. Fin (m)	Hauteur (m)	Sondage	Prof. Fin (m)	Hauteur (m)	Sondage	Prof. Fin (m)	Hauteur (m)
TOTAL		230,45	TOTAL		92,5	TOTAL		0,75
SP1	14,9	0,1	SP1	15	0,1	SP104	23,9	0,1
SP1	17,05	0,05	SP1	22,35	0,15	SP104	25	0,05
SP2	26,1	0,05	SP1	22,5	0,15	SP104	26,7	0,2
SP104	22,4	0,2	SP104	22,2	1,1	SP105	16	0,05
SP104	22,9	0,5	SP106	25,95	0,15	SP109	23,4	0,1
SP108	20,1	0,15	SP106	26,7	0,2	SD116	19,55	0,05
SP108	22,15	0,65	SP109	20,8	0,7	SD123	15,4	0,1
SP108	26,6	0,1	SP109	21,05	0,05	SD123	15,7	0,1
SP109	19,15	0,05	SP201	20	2			
SP109	20	0,5	SP202	16	1,5			
SP201	18	3,2	SP203	18	0,5			
SP201	22	2	SP203	27,5	0,7			
SP202	19,5	0,7	SP205	18,5	1			
SP202	25	3	SP209	17	2			
SP204	21	8	SP209	19	2			
SP204	24,5	1	SP213	15	1			
SP204	27,5	1	SP214	15	1			
SP205	17,5	0,8	SP214	27,1	1,1			
SP205	21,5	3	SP215	15,2	0,6			
SP206	17	1,2	SP216	22	6			
SP206	18,2	1	SP222	25	2			
SP207	22	6	SP223	24,5	1,5			
SP208	22	4,5	SP224	22	1			
SP209	15	1,5	SP226	26	1			

SP210	16	3	SP228	24	1			
SP210	19,5	3	SP228	27,2	0,7			
SP211	18	1	SP230	16,5	1,5			
SP211	28	2	SP231	19,2	1,7			
SP212	20	2	SP231	27,1	1,1			
SP214	19	1	SD111	18,1	0,2			
SP215	23	3	SD114	26,7	0,2			
SP218	20,4	3,9	SD119	25,05	0,15			
SP218	27,1	2,9	SD119	27,1	0,4			
SP219	16,4	1,4	SD119	28,1	0,7			
SP219	27,5	1,5	SD122	16,75	0,05			
SP220	20,2	5,2	SD236	15,5	0,7			
SP221	17	1,2	SD238	22,2	1,8			
SP224	20	2,5	SD241	16,5	2,3			
SP225	16,8	1,8	SD241	28,8	1,7			
SP225	23	4	SD244	17	1,5			
SP225	28	3	SD244	20,5	0,5			
SP226	16	1	SD245	17	0,5			
SP226	17,5	1	SD245	18,5	1,3			
SP226	20	2	SD246	18	0,5			
SP226	24,5	1,5	SD246	18,8	0,8			
SP227	22,2	7,6	SD251	18,2	0,4			
SP229	27,1	1,1	SD252	23,5	2			
SD110	24,7	0,1	SD253	17,8	0,8			
SD110	28,25	0,75	SD253	27,1	0,9			
SD112	27,1	0,2	SD256	15	0,4			
SD116	17,85	0,05	SD256	18,5	0,7			
SD117	26	0,2	SD256	19,5	0,5			
SD118	15	0,05	SD256	21,5	1,5			
SD119	17,3	0,05	SD256	27,1	0,6			
SD120	27,1	0,1	SD258	17,5	1			
SD123	19,2	0,1	SD259	15,2	0,2			
SD124	23,9	0,1	SD260	16,2	0,8			
SD234	19,5	4,9	SD260	17,8	1,4			
SD234	21	1	SD260	19,2	0,7			
SD234	24,2	0,4	SD260	24,8	0,4			
SD234	26,8	2,6	SD261	22,8	0,8			
SD235	20	5,4	SD261	24,5	1,7			
SD236	20	3	SD263	15,8	0,6			
SD237	20	5,6	SD266	17,6	0,4			
SD238	20	4,8	SD267	20	2			
SD238	27,1	4,7	SD267	21	1			
SD239	16,8	2,2	SD267	25,8	0,6			
SD239	18,8	1	SD269	15,5	0,7			
SD239	22,6	0,6	SD270	21	1			
SD239	25,5	2,3	SD270	24,8	1			
SD241	17,2	0,6	SD270	26	0,8			
SD241	19	1	SD271	17,8	0,6			
SD241	20,5	0,5	SD271	18,5	0,6			
SD241	21,8	1,2	SD273	16	0,8			
SD241	25	3	SD273	17,8	1,6			
SD242	20	1,8	SD273	23,4	1,6			
SD242	27	0,5	SD273	24,2	0,7			
SD244	20	1,5	SD274	20	2			
SD245	14,6	1,3	SD274	26,5	1			
SD245	15,8	1,2	SD275	23,8	0,4			
SD245	20	1,4	SD275	24,8	0,6			
SD245	24,5	3,5	SD275	26,2	0,8			
SD246	21,8	1,8	SD276	25	0,5			
SD246	24,5	1,7	ER2	25,9	0,4			
SD250	15,5	1	ER3	21,5	0,5			
SD251	17,5	1,1	ER10	15,8	0,9			

SD251	21,5	1,1	ER10	18,8	1,2			
SD251	27,2	0,7	ER10	22,2	2,2			
SD252	16	1,4	ER10	24,2	1,8			
SD252	16,8	0,6	ER11	27,2	0,8			
SD252	20	1	ER15	27,2	1			
SD252	20,8	0,8	ER16	26,8	0,9			
SD252	25	1,5	ER17	21,2	1,2			
SD255	23,5	1,3	ER18	23,5	0,7			
SD259	21,5	1,5						
SD260	15,4	0,8						
SD260	21,8	1,8						
SD261	16,2	1						
SD263	17,5	1,3						
SD263	21	3,4						
SD267	17,8	1,4						
SD267	23,4	2,2						
SD267	25	1,5						
SD269	19	0,5						
SD269	27,8	1,3						
SD272	27,1	0,5						
SD274	21	1						
SD274	24,8	3						
SD275	20	5,4						
SD275	22	2						
SD276	20	1,5						
SD276	24,2	3,6						
ER1	22,2	2						
ER2	22,8	1,6						
ER5	20,8	0,6						
ER6	24,2	2						
ER7	20	1,2						
ER10	17,5	1,3						
ER10	20	1						
ER10	26,2	2						
ER11	18	1						
ER12	22,3	1,6						
ER13	16,2	1,7						
ER13	17,2	0,8						
ER13	22,6	0,8						
ER14	24,5	4,5						
ER15	18	1						
ER15	23	2,2						
ER15	25,8	0,9						
ER18	21,7	1,7						
ER19	23,5	1,3						

#### Marnes et Caillasses

Faiblement décomprimé			Décomprimé			Très décomprimé		
Sondage	Prof. Fin (m)	Hauteur (m)	Sondage	Prof. Fin (m)	Hauteur (m)	Sondage	Prof. Fin (m)	Hauteur (m)
TOTAL		175,55	TOTAL		194,08	TOTAL		13,05
SP1	30,3	0,05	SP1	33,65	0,05	SP1	35,85	0,05
SP1	31,6	0,1	SP1	34,2	0,05	SP104	33,15	0,05
SP1	32,1	0,1	SP1	34,65	0,05	SP105	27,85	0,05
SP1	33	0,5	SP1	35,55	0,05	SP105	32,65	0,05
SP1	33,75	0,05	SP104	31,5	0,6	SP106	34,3	0,1
SP1	35,35	0,05	SP105	29,9	0,8	SP107	34,6	0,7
SP1	35,75	0,15	SP105	32,1	0,3	SP108	43,55	0,05
SP1	42,85	0,05	SP105	33,9	0,1	SP210	36	3
SP2	29,2	0,2	SP105	34,9	0,1	SP226	36	4
SP2	29,8	0,4	SP105	36,5	0,3	SD111	32,9	0,2
SP2	31,15	0,05	SP106	32,3	0,1	SD111	35	0,5
SP2	32,8	0,1	SP106	35,2	0,3	SD112	33	0,4
SP2	33,25	0,05	SP106	36,2	0,7	SD113	30,4	0,1

SP2	33,55	0,1	SP107	35,3	0,3	SD114	31,1	0,2
SP2	35,35	0,05	SP108	35,1	0,15	SD114	33,8	0,3
SP2	33,55	0,15	SP202	29,5	0,9	SD116	31,5	0,2
SP2	37,3	1,7	SP202	35	3	SD117	30,75	0,05
SP106	30	0,5	SP203	28,4	0,2	SD117	32,9	0,25
SP106	32	0,1	SP203	36	2	SD119	29,1	0,1
SP106	33,1	0,1	SP203	38,8	1	SD120	35,9	0,1
SP106	34,2	0,25	SP204	34	3,2	SD121	31,05	0,05
SP107	32,2	0,25	SP205	35	3,8	SD123	33,45	0,05
SP107	38,7	0,8	SP207	33	2	SD123	37,8	0,1
SP108	30,15	0,25	SP209	35,2	3,8	SD125	35,9	0,5
SP108	32,7	0,7	SP210	33	2	SD126	37,30	0,1
SP108	34	1,1	SP211	35	4	SD266	34	1,8
SP108	36,7	0,7	SP212	33	1			
SP109	41,8	0,1	SP213	34,5	4,3			
SP109	42,3	0,1	SP214	28	0,9			
SP202	28,6	0,6	SP214	31	2			
SP203	29,2	0,8	SP214	35	2			
SP204	35,5	1,5	SP214	37	2			
SP205	28	2	SP216	30,5	1,3			
SP205	31,2	3,2	SP216	37	5,6			
SP206	30,8	1	SP217	35	7,9			
SP206	32,2	1	SP219	32	3			
SP206	35	1,5	SP219	33,2	0,7			
SP207	28,5	1	SP220	35	9			
SP208	30	2	SP221	32	5			
SP208	32,2	1,2	SP222	29	1			
SP208	38	2	SP222	32	2			
SP210	31	3	SP223	31	5			
SP211	31	3	SP224	30,2	2,2			
SP211	39	4	SP224	36,8	1,8			
SP213	37,5	3	SP226	30	1,2			
SP213	42,2	1,7	SP227	29	1,5			
SP215	36	7	SP228	31	1,5			
SP218	28	0,9	SP229	37	3,5			
SP218	36,4	4,4	SP230	33	0,5			
SP219	34,5	1,3	SP230	35	1			
SP224	35	2	SP230	37	1,5			
SP227	31,5	2,5	SP231	30,2	1,7			
SP227	39,6	6,1	SP231	33	1			
SP229	33,5	4,5	SD111	29,3	1,3			
SP230	30,8	1,3	SD111	30,05	0,05			
SP231	32	1	SD111	32	0,4			
SP231	37	3	SD111	35,8	0,6			
SD111	32,6	0,4	SD113	31,45	0,05			
SD111	33,8	0,3	SD114	28,9	1			
SD111	34,15	0,15	SD114	34,1	0,3			
SD111	43,3	0,1	SD116	34,85	0,25			
SD112	32,4	0,1	SD116	43,7	0,1			
SD112	44,5	0,4	SD119	33	1			
SD114	42	0,05	SD119	35	1,5			
SD115	27,7	0,2	SD119	45	0,2			
SD117	28,3	0,3	SD120	27,3	0,1			
SD117	31,5	0,4	SD120	33,35	0,35			
SD118	27,75	0,05	SD123	35,53	0,03			
SD119	30,2	0,2	SD125	36,5	0,4			
SD119	31,1	0,3	SD231	29	0,2			
SD119	43,1	0,1	SD231	32,2	0,7			
SD120	32,85	0,05	SD231	37	1			
SD120	34,4	0,05	SD232	27,8	0,7			
SD120	35,8	0,3	SD232	33,8	1,3			
SD121	29,1	0,05	SD233	30,2	0,3			



SD125	35,4	0,1	SD235	31	1,2			
SD126	30,9	0,1	SD236	33,8	0,8			
SD126	32,3	0,2	SD236	35,2	0,8			
SD126	32,95	0,15	SD238	32,8	0,2			
SD232	32,5	1,3	SD238	35	1			
SD233	28	0,5	SD239	28,6	0,6			
SD234	32	1,2	SD239	34,2	1,2			
SD235	28,8	0,8	SD241	31,8	1			
SD235	34	1,5	SD241	34	2,1			
SD236	32	4,2	SD241	35,2	1			
SD236	37,2	1,8	SD242	35,9	1,9			
SD236	38,5	0,5	SD243	30	0,8			
SD237	33	2,8	SD243	35,2	0,7			
SD237	35,2	1	SD243	36,8	1,4			
SD237	36,4	1	SD244	28	0,5			
SD238	32,6	5,5	SD244	29,2	0,4			
SD239	33	4,4	SD244	34,2	0,7			
SD240	34,2	0,4	SD245	29	0,4			
SD241	37	1,7	SD246	31,1	0,9			
SD242	33,2	1,2	SD246	33,2	0,6			
SD243	33	1	SD246	35	1,5			
SD243	34,2	1	SD246	35,5	0,3			
SD244	31,2	1	SD246	37,8	2			
SD244	32,4	1	SD248	30,5	1			
SD244	37	2,6	SD248	32,5	0,3			
SD245	28	0,8	SD248	35	0,8			
SD245	31,2	0,4	SD248	36,4	1,4			
SD245	34	2,2	SD250	27,9	0,4			
SD245	36,8	0,8	SD251	33,9	0,4			
SD249	36,5	1,3	SD251	35	1			
SD251	31,2	0,4	SD251	38	2,2			
SD251	32,8	0,3	SD252	29,5	0,5			
SD252	35,2	1	SD253	28,2	1,1			
SD252	36,8	0,8	SD253	31,2	1			
SD253	30	1,5	SD253	34,4	1,6			
SD254	27,8	0,4	SD254	31,2	0,6			
SD254	28,8	0,8	SD254	31,8	0,3			
SD254	36	2,2	SD254	33,5	1,5			
SD255	27,5	1	SD255	33,5	0,7			
SD257	30	1	SD256	28,2	1,1			
SD257	31,5	0,5	SD256	28,8	0,3			
SD257	33,4	1	SD256	32	1,4			
SD257	35	0,8	SD256	33,5	0,3			
SD258	35,3	0,8	SD256	34,5	0,5			
SD258	37,2	0,7	SD256	37,8	2			
SD259	37,8	1,6	SD258	30,2	0,7			
SD262	36,8	1,8	SD258	32,2	0,4			
SD263	29,2	1,2	SD259	28,5	0,5			
SD263	34,5	1,9	SD259	30	1			
SD264	27,2	0,7	SD259	32,4	0,6			
SD266	28	0,6	SD259	35,6	1			
SD268	27,8	0,6	SD259	39,5	0,5			
SD268	30	0,4	SD260	27,8	0,7			
SD269	29,4	0,4	SD260	31,8	2,8			
SD269	30,2	0,6	SD260	34,8	2,3			
SD269	32,5	0,7	SD261	28,4	0,9			
SD269	38,5	0,5	SD261	35,4	6,9			
SD270	32,5	3,7	SD261	36,8	0,6			
SD270	36	2,5	SD262	29,2	1,2			
SD271	33,5	0,9	SD262	32,5	1			
SD271	35	1,2	SD262	33,4	0,4			
ER1	28,8	1,3	SD263	29,8	0,4			

ER1	31,5	1,3	SD263	32	0,8			
ER1	37,7	2,2	SD264	29,8	0,4			
ER2	34,2	0,7	SD265	30,1	0,6			
ER3	32,2	1	SD265	31,2	0,7			
ER3	33,8	0,8	SD265	34,2	2,4			
ER5	28,4	0,6	SD267	28,5	1			
ER7	31,2	0,7	SD267	30	0,4			
ER7	33	0,6	SD267	31,8	1,6			
ER8	36,5	2,5	SD267	34,2	1,8			
ER10	34	2	SD271	31,2	0,6			
ER12	29,1	0,9	SD271	36,2	0,7			
ER12	32,6	1,8	SD271	37,5	0,7			
ER13	34,8	0,8	SD272	29,5	0,7			
ER14	35,9	1,6	SD272	35,8	1,3			
ER15	30	1	SD273	29	0,5			
ER15	33	0,8	SD273	32	1			
ER17	35	1,2	SD273	36	2,8			
ER18	33,5	1,5	SD273	37,5	1			
ER18	34,6	0,7	SD274	30	1			
ER19	35,2	0,7	SD274	32,1	0,6			
ER19	37,5	1,9	SD274	33,5	1,2			
			SD274	36,2	2			
			SD275	29,5	2			
			SD275	30,8	1,1			
			SD275	33	1,2			
			SD275	35,4	1,2			
			SD276	31	2			
			SD276	33	1,4			
			SD276	34,6	0,8			
			ER1	38,8	1			
			ER2	28	0,1			
			ER3	29,5	1			
			ER6	29,8	1,6			
			ER6	33,4	2,4			
			ER6	34,8	1,3			
			ER6	36,2	1,2			
			ER7	28,8	0,8			
			ER8	27,8	0,8			
			ER8	29,2	1			
			ER8	32	0,8			
			ER9	28,2	0,8			
			ER10	28,9	1,1			
			ER10	30,4	1			
			ER10	32	1,5			
			ER10	35,4	1,2			
			ER10	37	1			
			ER10	38	0,8			
			ER11	30,9	0,9			
			ER11	33,2	0,7			
			ER11	36,2	0,7			
			ER12	35,7	2,7			
			ER16	29,2	0,4			
			ER16	33,7	1,9			
			ER17	30,2	0,9			
			ER17	33	1			
			ER17	37,2	2,2			
			ER18	30	1,2			
			ER18	31	0,2			
			ER19	31,2	1			
			ER19	34,1	0,8			
			ER19	39	1,5			

**Le changement climatique n'implique pas seulement un monde plus chaud, il annonce un monde qui change.**



**Notre métier, vous accompagner pour gérer ces enjeux.**



**Références :**