COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Soirée CFMS en Régions : Grenoble

Unité d'incinération et de valorisation énergétique (UIVE) - LA TRONCHE (38)

CFMS GRENOBLE – L. PEYMIRAT ET R. MOULINARD

09 OCTOBRE 2024

GINGER CEBTP

Sommaire

1. Présentation du projet et des ouvrages géotechniques
2. Contexte géologique, géotechnique et sismique
3. Analyse de la liquéfaction
4. Problématiques identifiées
5. Choix constructifs

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

1. Présentation du projet et des ouvrages géotechniques

1. Présentation du projet et des ouvrages géotechniques

Localisation du projet : Commune de la Tronche (38)

Intervenants :

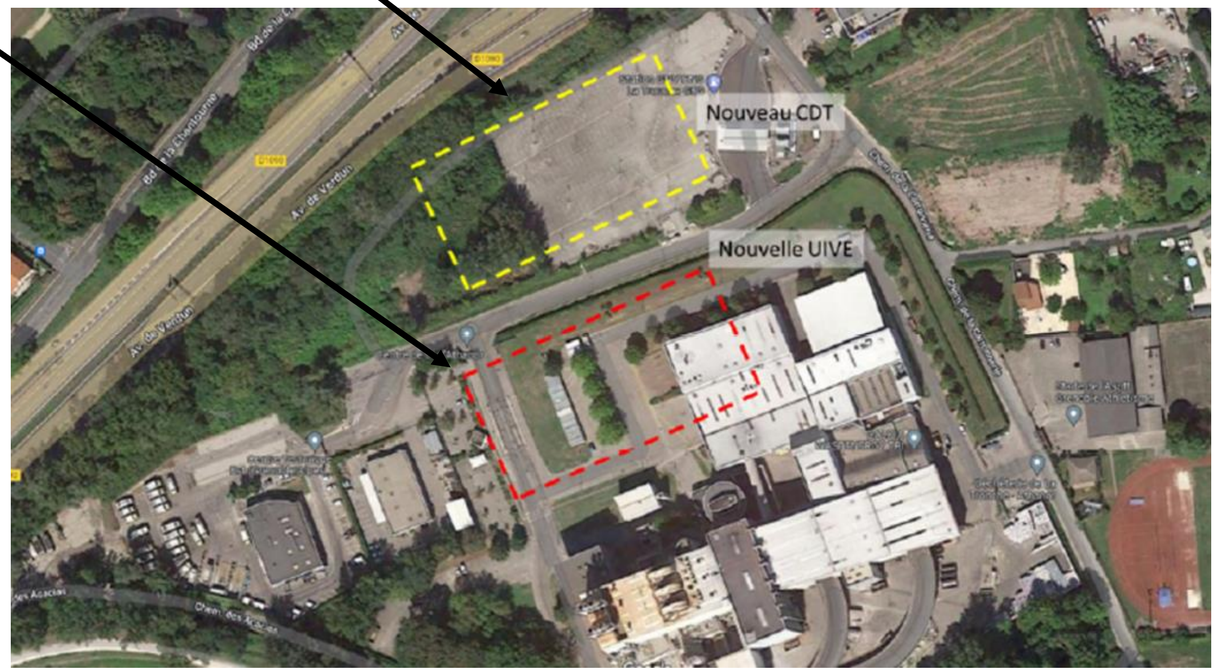
- Maitre d'œuvre et BET structure : BG – Artelia
- Maîtrise d'ouvrage : Grenoble Alpes Métropole
- Etudes de sol : Ginger CEBTP

1. Présentation du projet et des ouvrages géotechniques

Localisation des ouvrages :

Nouveau Centre de tri (déjà construit) ;

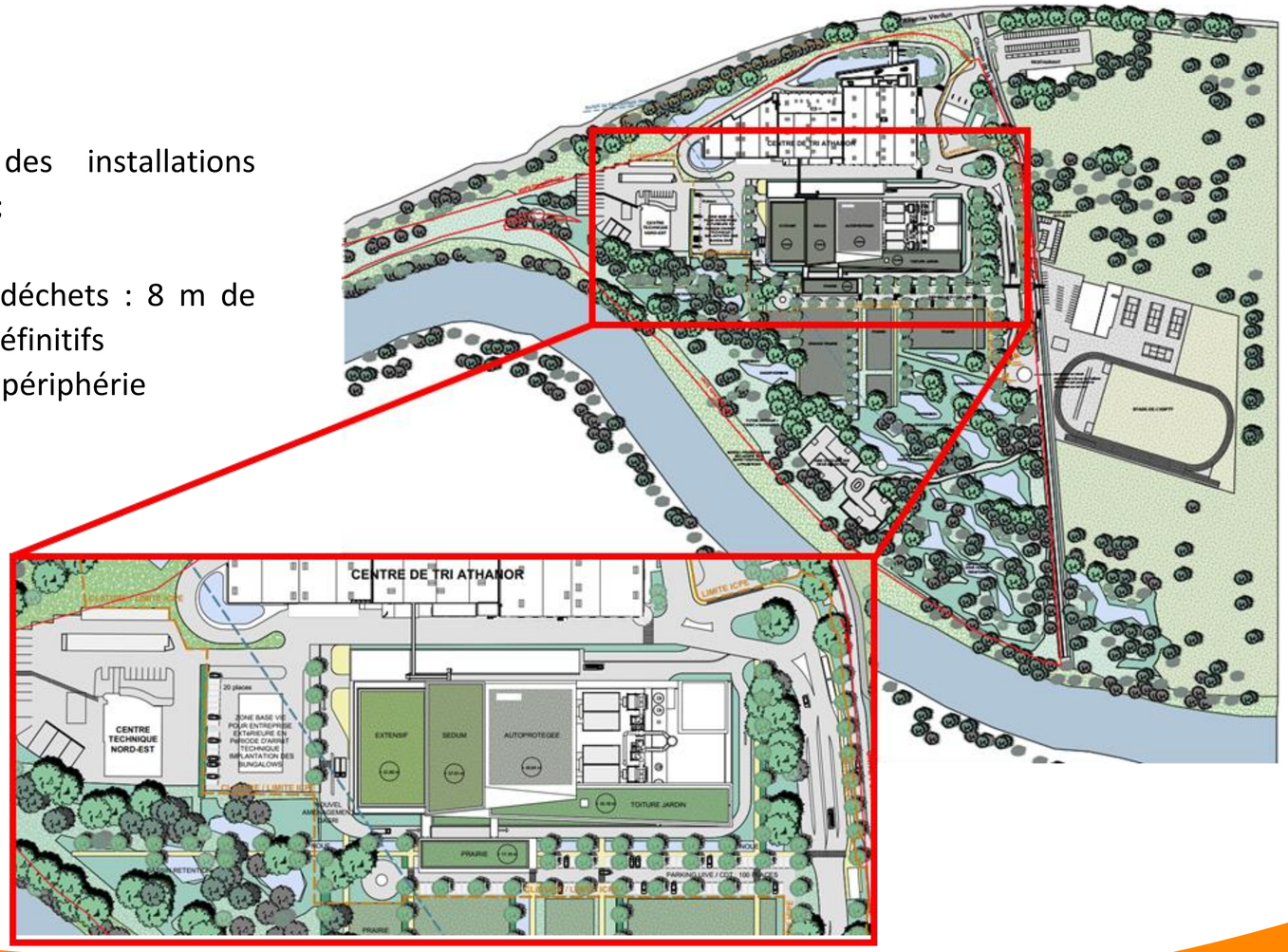
Nouvelle UIVE.



1. Présentation du projet et des ouvrages géotechniques

Ouvrages du projet :

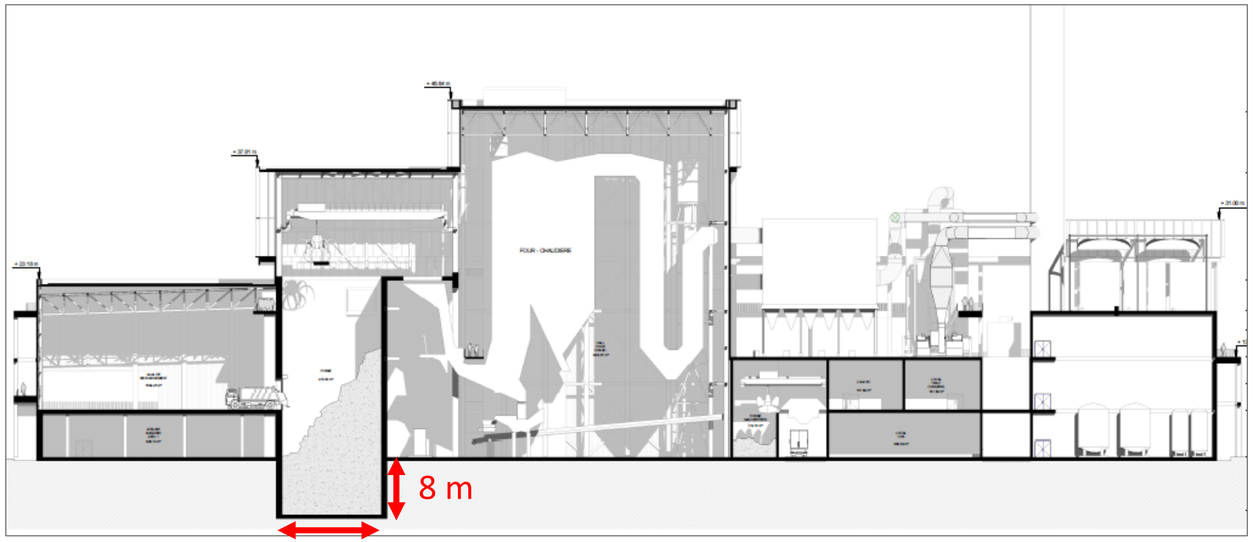
- Bâtiment industriel comportant des installations lourdes. Hauteur max : environ 45 m ;
- Voirie et rampe d'accès ;
- Une fosse destinée à accueillir des déchets : 8 m de profondeur, étanche et sans butons définitifs
- Espaces verts et bassins EP prévus en périphérie

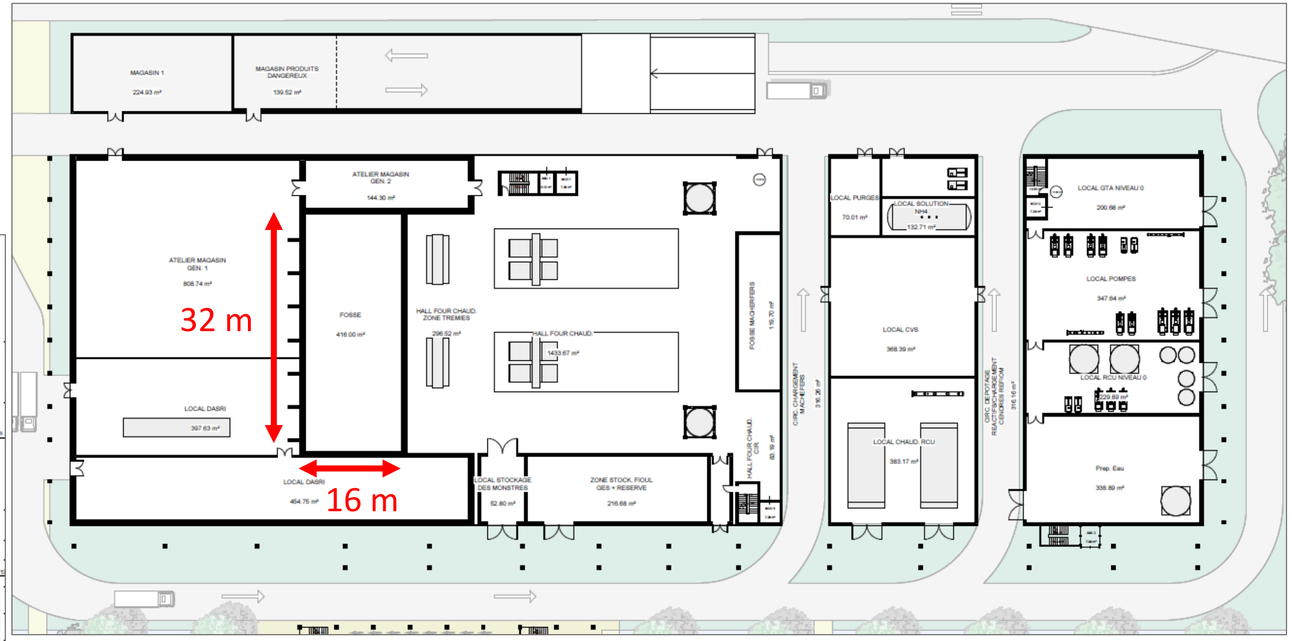


1. Présentation du projet et des ouvrages géotechniques

Ouvrage géotechniques identifiés:

- Fondations du bâtiment industriel en pieux et dalle portée ;
- Fondations des voiries et rampes d'accès ;
- Soutènement provisoire et définitif pour la création de la fosse





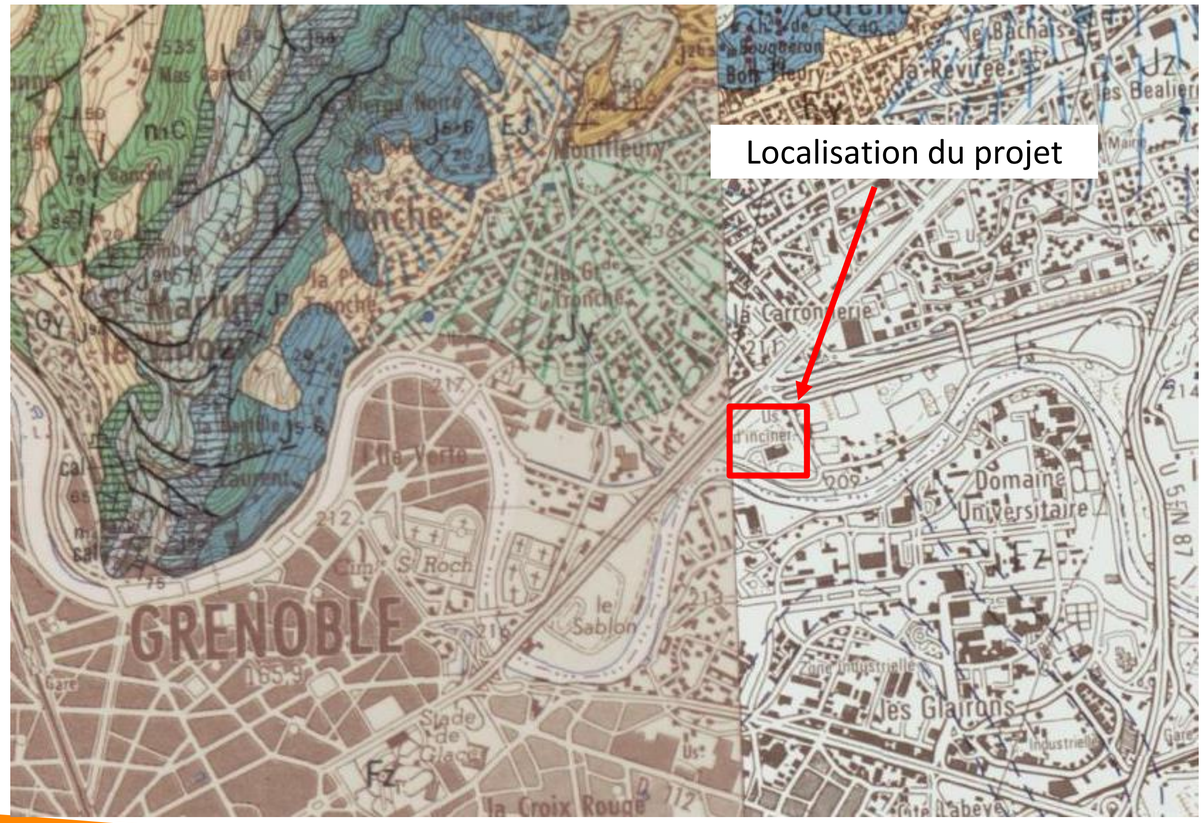
COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

2. Contexte géologique, hydrogéologique et sismique

2. Contexte géologique, hydrogéologique et sismique

Contexte géologique: Alluvions fluviatiles (Fz)

Description de la notice de la carte géologique :« alluvions modernes de la vallée de l'Isère où alternent et se mélangent des sables fins **noirâtres et vaseux** (« sablons ») et des graviers ».



2. Contexte géologique, hydrogéologique et sismique

Campagne de reconnaissance : Essais in situ

Essai	Objectifs
20 CPTu à 40m (mesure toutes les 2 cm) +2 Essais de dissipations par CPTu, répartis dans les formations (n°0, 1, 2 et 3)	Définir une stratigraphie précise des lentilles Calcul du FS du risque liquéfaction Dimensionnement fiable des pieux Obtenir des corrélations avec OCR, cv, Modules E et G, Densité relative Dr%, Résistance non drainée Su pour le calcul du soutènement
2 sondages carottés à 30m 2 échantillons intacts dans chaque horizon	Définition de la stratigraphie, comparaison avec le CPT Récupération d'échantillons intacts pour essais au laboratoire Le SC est réalisé après les CPT pour orienter les prélèvements d'échantillons intacts
3 Piézomètres	Sondages piézométriques sélectifs dans la nappe profonde Fz 2 dans le sondage carotté et équipement sonde de type Diver pendant 1 an
4 sondages destructifs à 30m	2 sondages seront équipés pour pouvoir faire 1 essai Cross Hole 2 sondages seront équipés en piézomètre sélectif profond Fz2 avec de type Diver
1 Essai Cross Hole	Pour déterminer la classe de sol et de disposer de modules en petites déformations
10 Fouilles à la pelle mécanique avec réalisation d'essai Mastuo	Définir les possibilités d'infiltration sur le site, dans la zone d'aménagements paysagers

2. Contexte géologique, hydrogéologique et sismique

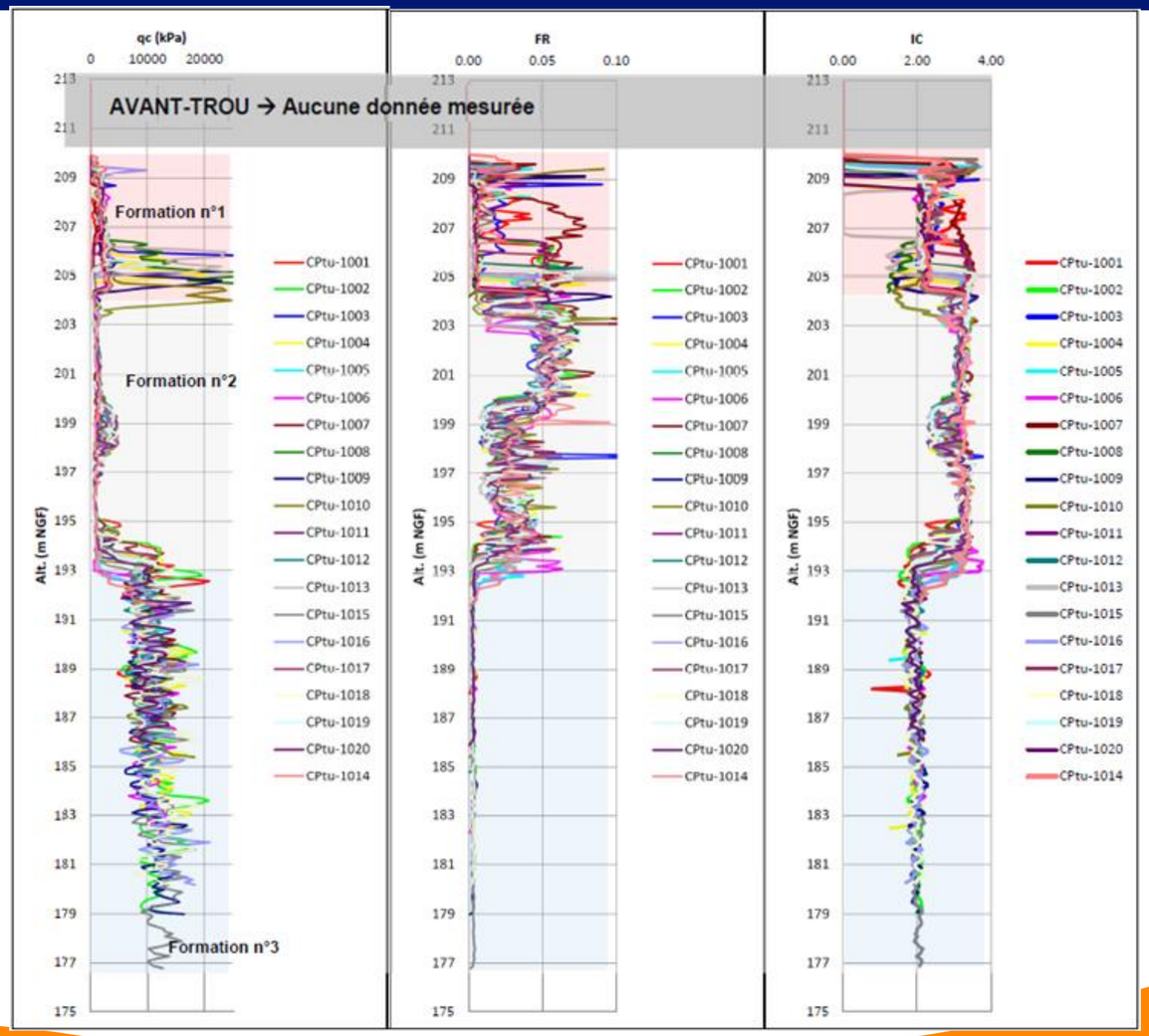
Campagne de reconnaissance : Essais au laboratoire

Essai	Objectifs
10 masse volumique (2 par formation)	Définir le poids des terrains, en particulier pour les calculs de soutènement et les vérifications hydrauliques
18 GTR (teneur en eau, granulométrie, sédimentométrie, limite d'Atterberg ou VBS, masse volumique) 2 par horizon + 8 supplémentaires dans les remblais	Analyse qualitative du risque liquéfaction Qualification de la densité relative initiale des sols en places pour le dimensionnement des solutions de traitement anti liquéfaction
2 essais triaxiaux par horizon : essais Cu+u sauf dans les faciès plus sableux (essai CD si possible)	Définir les paramètre de cisaillement : calculs de soutènement et calcul d'interaction EF si nécessaire
4 essais œdométrique (avec mesure de fluage) et 2 essais de gonflement Huder-Amberg Formation cible : argiles de la formation n°2	Définition de module et caractérisation de la compressibilité de la couche n°2 (tassements liés au aménagement du projet : rampe notamment) Calculs en consolidation pour le dimensionnement des solutions d'amélioration de sol Caractérisation du potentiel de gonflement des argiles Fz1c
Dans les remblais 10 essais IPI, Proctor, CBR, Aptitude au traitement des sols	Étudier la possibilité de réemploi des déblais pour en couches de formes des voiries
Agressivité du sol : 2 analyses par horizon Agressivité eau : Dans la nappe superficielle et dans la nappe profonde	Définir la classe d'agressivité sur le béton

2. Contexte géologique, hydrogéologique et sismique

Contexte géologique:

- n°0: remblais et terrains remaniés (avant-trou)
- n°1: Alternances de sables limoneux et de limons argileux
- n°2: Argiles limoneuses à quelques passages plus sableux
- n°3: Alluvions sableuses



2. Contexte géologique, hydrogéologique et sismique

Modèle géotechnique :

Couche	Nature	Cote toit (m NGF)	qc (MPa)	Em (MPa)	pl* (MPa)	cu (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	γ (kN/m3)	α	Classe de sol
0	Remblais hétérogènes	213	4,0	-	-	/	25	5*	19	1/3	A1/A2, C1A1 et D3
1A	Limons +/argileux	212	1,5	4		/	28	5	19	1/2	A1/A2
1B	Sables limoneux		4,0			/	30	0	19	1/2	B5
2A	Argiles limoneuses molles	205	1,0			45	16	15	18	2/3	A1/A2
2B	Argiles limoneuses molles à fermes	199	2,0			/				2/3	A1/A2
2C	Argiles limoneuses molles	197,5	1,0			50				2/3	A1/A2
2D	Alternances de argiles limoneuses et de limons sableux	195	1,0			/				2/3	A1/A2
3	Sables et sables limoneux compactes	193	10,0	15	1,5	/	35	0	18	1/3	B5 et D1

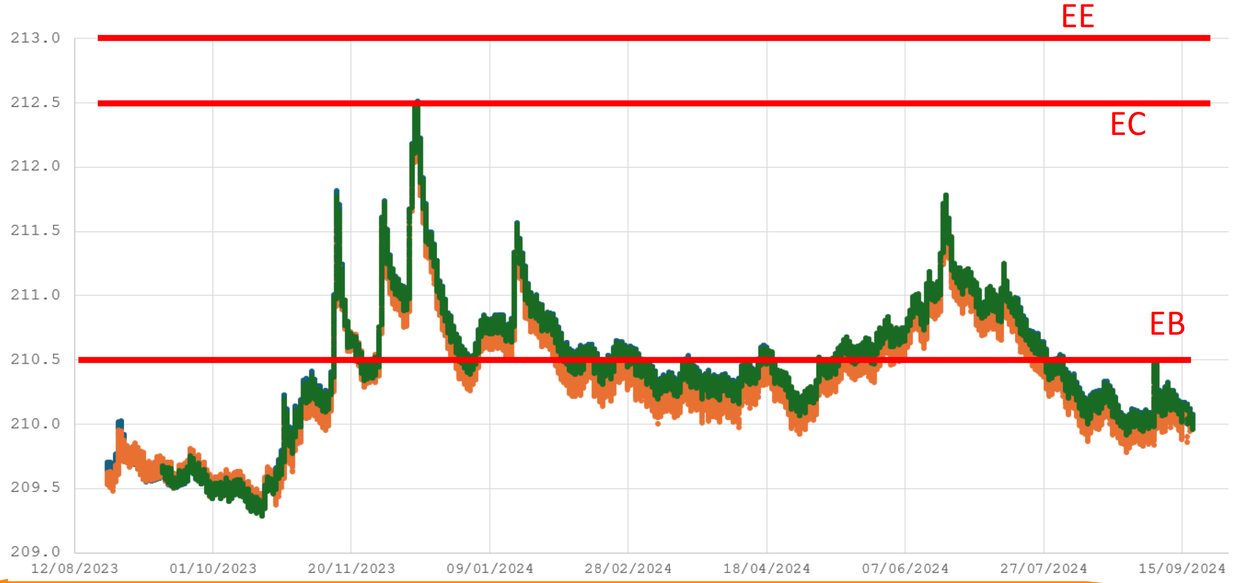
2. Contexte géologique, hydrogéologique et sismique

Contexte hydrogéologique:

- Une nappe libre superficielle dans les alluvions fines de surface, située entre 1 à 3 m de profondeur par rapport au TN
- Une nappe en charge profonde baigne les alluvions plus sableuses, avec un niveau similaire à la nappe de surface

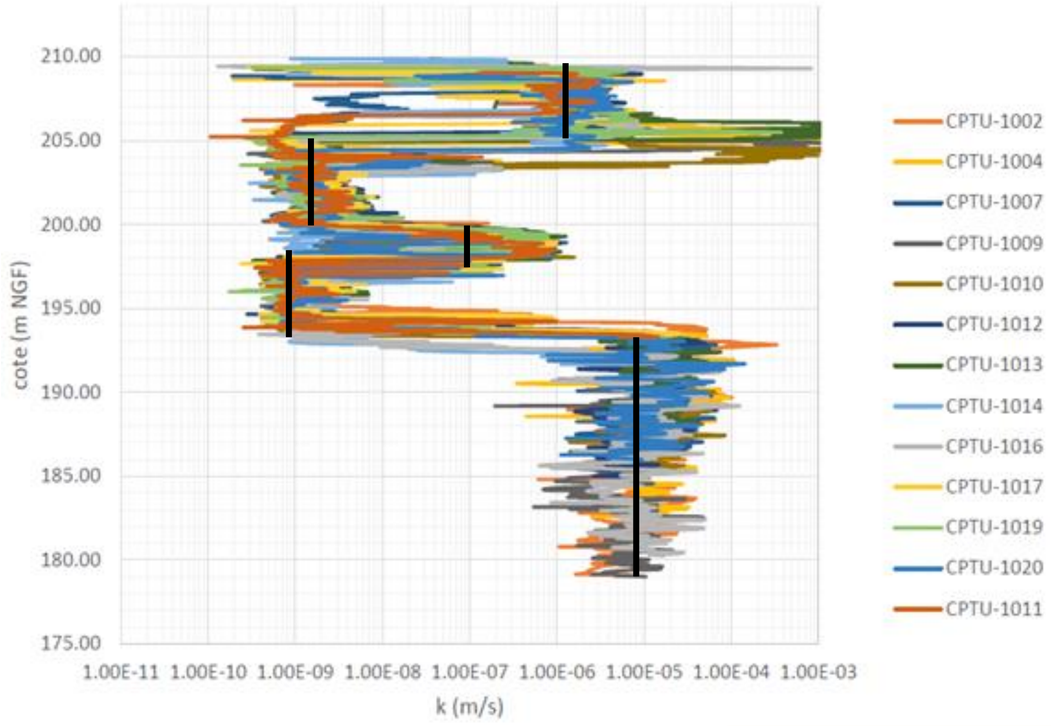
⇒ **Les niveaux d'eau ont une grande influence sur le dimensionnement de la fosse**

Piézomètres dans la nappe profonde :



Perméabilités (corrélation avec les CPTu et essais de dissipation):

- Hétérogènes dans la formation n°1 ;
- Globalement faibles dans la formation n°2 (légèrement plus élevé pour 2B) ;
- Elevées dans la formation n°3



2. Contexte géologique, hydrogéologique et sismique

Contexte sismique:

- qc issus des essais CPTu
- Vs30 issu de l'essai cross hole : **205 m/s**

$$v_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{v_i}}$$

Essai Cross hole :

Lithologie	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ν	G_{max} (MPa)	E_{max} (MPa)
Remblais (mesures à 1 et 2 m)	875	185	0,48	61	181
Alluvions limoneuses à sableuses (mesures de 3 à 9 m)	1625 *(226; 7)*	227 *(80; 7)*	0,49 *(0,01; 7)*	110 *(75; 7)*	327 *(222; 7)*
Alluvions argilo limoneuses (mesures de 10 à 18 m)	1589 *(22; 9)*	180 *(20; 9)*	0,49 *(0,00; 9)*	59 *(13; 9)*	176 *(38; 9)*
Alluvions sablo limoneuses (mesures de 19 à 29,6 m)	1642 *(24; 12)*	250 *(22 ; 12)*	0,49 *(0,00; 12)*	126 *(22; 12)*	376 *(64; 12)*

Contexte sismique:

- Classe de sol retenue: C
- Zone de sismicité: 4 (d'après le zonage sismique français)
- Catégorie d'importance de l'ouvrage: III (choix du MOA en fonction de la destination de l'ouvrage)

Classe de sol	Description du profil stratigraphique	Paramètres			Ordre de grandeur		
		$V_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT} (coups/30 cm)	C_u (kPa)	q_c (MPa)	E_M (MPa)	p_l (MPa)
C	Dépôts profonds de sable de densité moyenne, de gravier ou d'argile moyennement raide ayant des épaisseurs de quelques dizaines à quelques centaines de mètres.	180 – 360	15 – 50	70 – 250	De 1 à 3,5 (argile) De 6 à 20 (sable)	5 – 25	0,5 à 1,2 (argile) 0,8 à 2 (sable)

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

3. Analyse de la liquéfaction

3. Analyse de la liquéfaction

Contexte sismique:

Extrait du CT45 : « La liquéfaction des sols en principalement observée dans les dépôts sableux peu profonds, saturés, lâches, sous l'effets de mouvements forts produits pas les séismes de grande magnitude. Elle se manifeste par une perte de résistance brutale du sol qui, dans des circonstances défavorables, peut dégénérée en une rupture. »

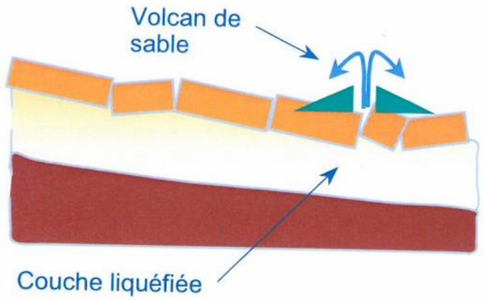
« La génération de pressions interstitielles dans le sol au cours du mouvement sismique constitue le point commun de toutes les définitions de la liquéfaction des sols »

La liquéfaction concerne les sols :

- peu compacts,
- fins (et pas très fins),
- à la granulométrie uniforme.

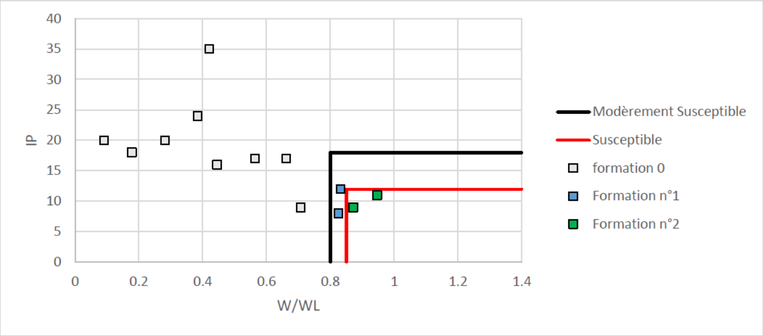
Généralement il s'agit de sables fins, limons et vases.

Conséquences sur les ouvrages : perte de portance, tassements, augmentation des poussées et/ou diminution de la butée sur les soutènements, glissement.



3. Analyse de la liquéfaction

Sondage	Profondeur moyenne	Formation	Passant à 63 µm	Teneur en eau	Limite d'atterberg			Passant à 5µm	Critère chinois	
	(m/TN)		(%)	wn (%)	wl (%)	wp (%)	IP (%)	(%)	Suspect	Exempt
SC1 101	1.62	1	96.3	36.6	44	32	12	30	FAUX	VRAI
SC1 102	2.55	1	88.8	33	40	32	8	19	FAUX	FAUX
SC1 101	14.08	2	85.9	30.5	35	26	9	30	FAUX	FAUX
SC1 102	14.28	2	98.8	38.8	41	30	11	56	FAUX	VRAI



Sols susceptibles à la liquéfaction selon Bray et Sancio 2006

Essais au laboratoire :

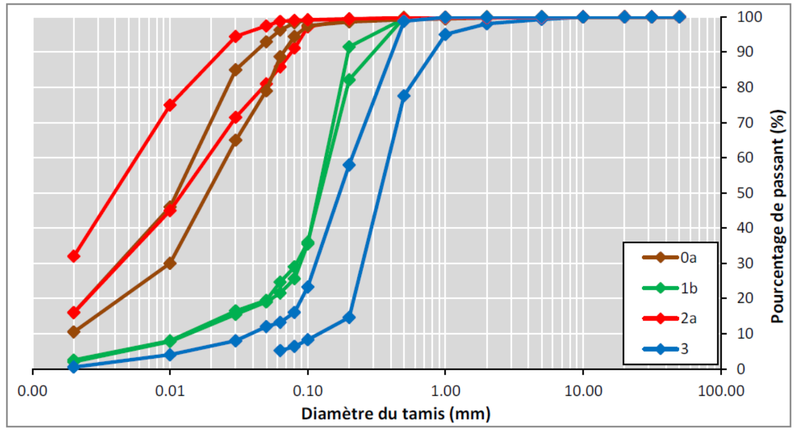
- Bray et Sancio (2006)
- Critère chinois

Sols suspect si tous les critères suivants sont réunis :

- d15 > 5 µm
- wL < 35%
- wnat > 0,9 wL

Exempts si :

- d10 > 2 mm
- Ip > 10% et d70 < 74 µm



- **Les formations 1a, 2a et 2c ne présente pas de potentiel de liquéfaction.**

Le risque ne peut pas être écarté pour les formations 1b, 2b, 2d et 3

3. Analyse de la liquéfaction

Approche quantitative basée sur l'analyse des CPTu : méthode simplifiée du National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER, 2001).

Calcul de CSR (rapport de cisaillement) :

Le taux de contrainte cyclique se calcule par la formule de Seed et Idriss (1971)

$$CSR = \tau_{av}/\sigma'_{v0} = 0.65[a_{max}/g] \times (\sigma_{v0}/\sigma'_{v0}) \times r_d$$

Où :

- τ_{av} est la contrainte de cisaillement cyclique moyenne
- σ_{v0} et σ'_{v0} les contraintes totales et effectives
- a_{max} est l'accélération maximale en champs libre (1.6 m.s-2 en zone IV). g est l'accélération de la pesanteur
- r_d est un facteur de réduction qui varie avec la profondeur, calculé avec la formule suivante qui donne une bonne estimations des plages de valeurs proposés initialement par Seed et Idriss (1971) :
  - $1-0.00765\times z$ si $z < 9.15m$
  - $1.174-0.0267\times z$ si $9.15m < z < 23m$
  - $0.744-0.008\times z$ si $23m < z < 30m$
  - 0.5 si $z < 30\ m$

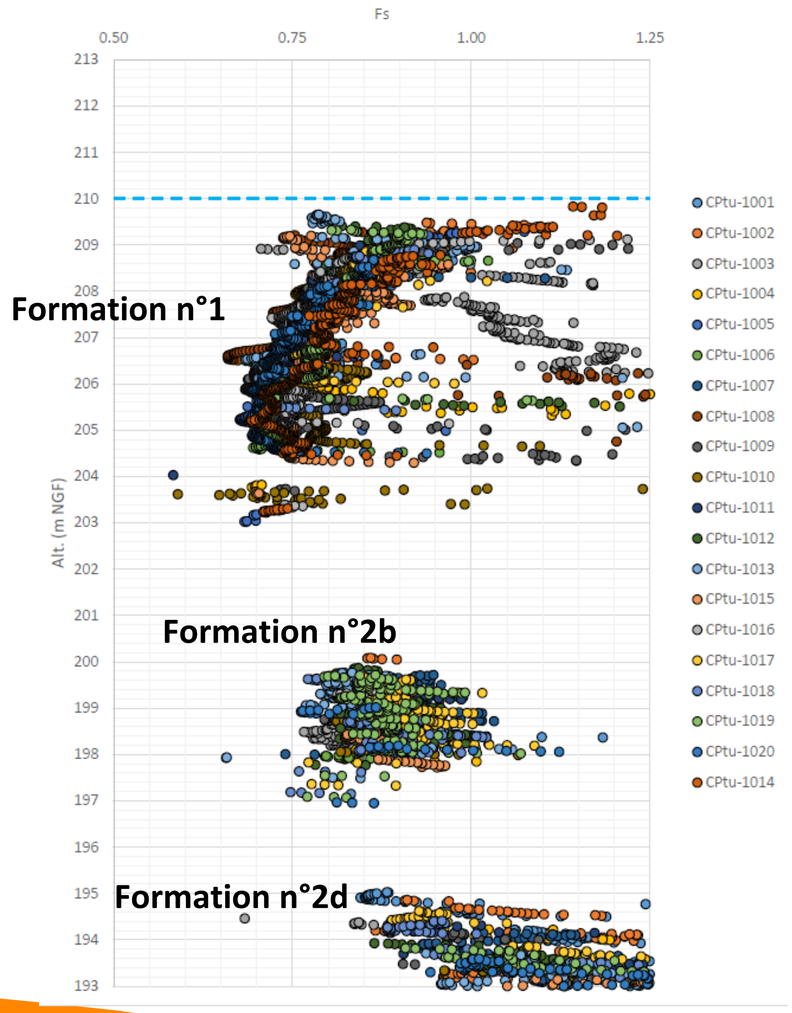
Calcul de CRR7.5 (résistance cyclique normalisée)

Pour les sols argileux (Ic>2.6), on considère qu'ils ne sont pas sensibles à la liquéfaction sous réserve de vérifier le critère chinois.

Pour les sols sableux et intermédiaires (Ic<2.6), le taux CRR7.5 est estimé par le biais de la résistance de pointe à équivalent de sable $(Qtn)cs$, qui introduit une correction sur Qt pour tenir compte du pourcentage de fine dans les sols (Robertson et Wright 1998).

$$FS = CRR7.5 \times MSF / CSR$$

On cherche a obtenir un facteur de sécurité FS > 1,25



La répartition en plan des lentilles sablo-limoneuse est aléatoire

⇒ pas possible de faire un zonage

4. Problématiques identifiées

4. Problématiques identifiées

- **Rampes d'accès :** Risque de tassements importants et de frottement négatif sur les pieux ➔ réalisation d'une structure GC portée par des pieux (pas de remblaiements)

- **Profondeur de l'horizon porteur:** Le toit de l'horizon porteur a été reconnu entre 19 et 20 m/TN (alluvions sableuses) ➔ fondations profondes sur pieux

- **Réalisation de la fosse (à 8-9 m/TN):**
  Terrassement sous nappe ➔ soutènement étanche obligatoire,
  Terrains ayant de faibles caractéristiques mécaniques butons définitifs interdis ➔ soutènement cylindrique ou paroi à forte inertie
  Terrains potentiellement gonflants en fond de fouille ➔ vide sanitaire à prévoir

- **Liquéfaction:** zones liquéfiables identifiées ➔ traitement anti-liquéfaction à prévoir

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

5. Choix constructifs

5. Choix constructifs

Fondations profondes par pieux (tarière creuse)

Portance faible, car aucun frottement ne peut être pris en compte dans les argiles molles (en première approche, frottement négligé sur les 20 premiers mètres).

Pieux de 30 m : ancrage de 10 m dans les sables :

	Capacité portante (kN)			
	ELSqp	ELScara	ELUfond	ELUacc
Ø1200	3000	3660	4850	5330
Ø1000	2360	2880	3760	4140
Ø800	1780	2170	2790	3070

Pieux de 35 m : ancrage de 15 m dans les sables (limite de faisabilité) :

	Capacité portante (kN)			
	ELSqp	ELScara	ELUfond	ELUacc
Ø1200	4000	4890	6280	6910
Ø1000	3190	3910	4960	5460
Ø800	2440	2990	3750	4127

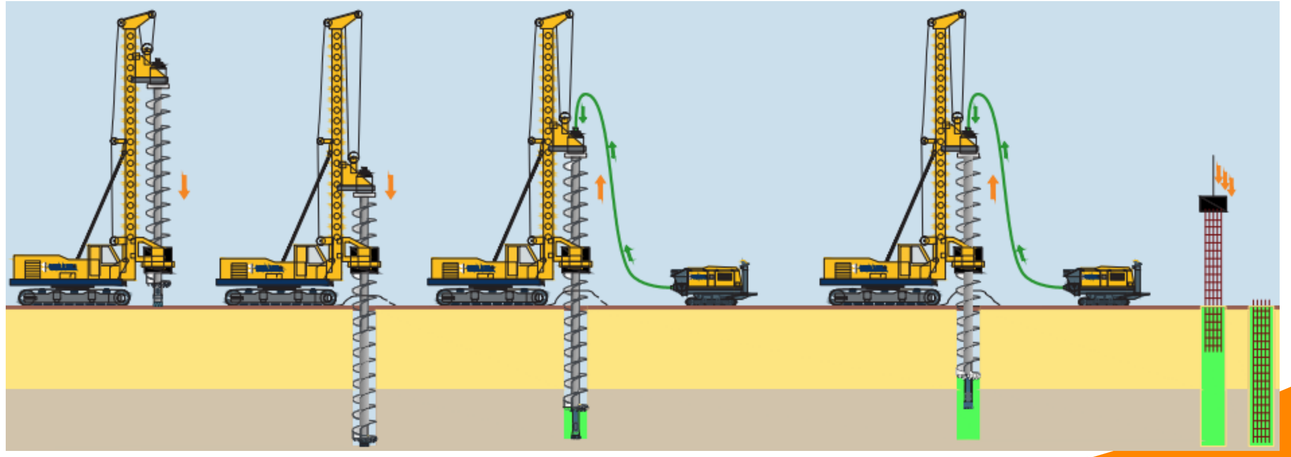
Descentes de charges :

Les DDC ne sont pas encore connues. De l'ordre de 500 t aux ELSqp d'après les premiers éléments d'Artelia

⇒ Nécessité de réaliser des massifs reposant sur plusieurs pieux sous certains appuis…

Des efforts de tractions significatifs (pas d'ordre de grandeur à ce stade) sont également attendus en phase sismique

⇒ Ferraillage toute hauteur



5. Choix constructifs

Réalisation de la fosse (à 8-9 m/TN):

Liste des contraintes :

- Pas de butonnage définitif dans la fosse

- UPL (soulèvement) :

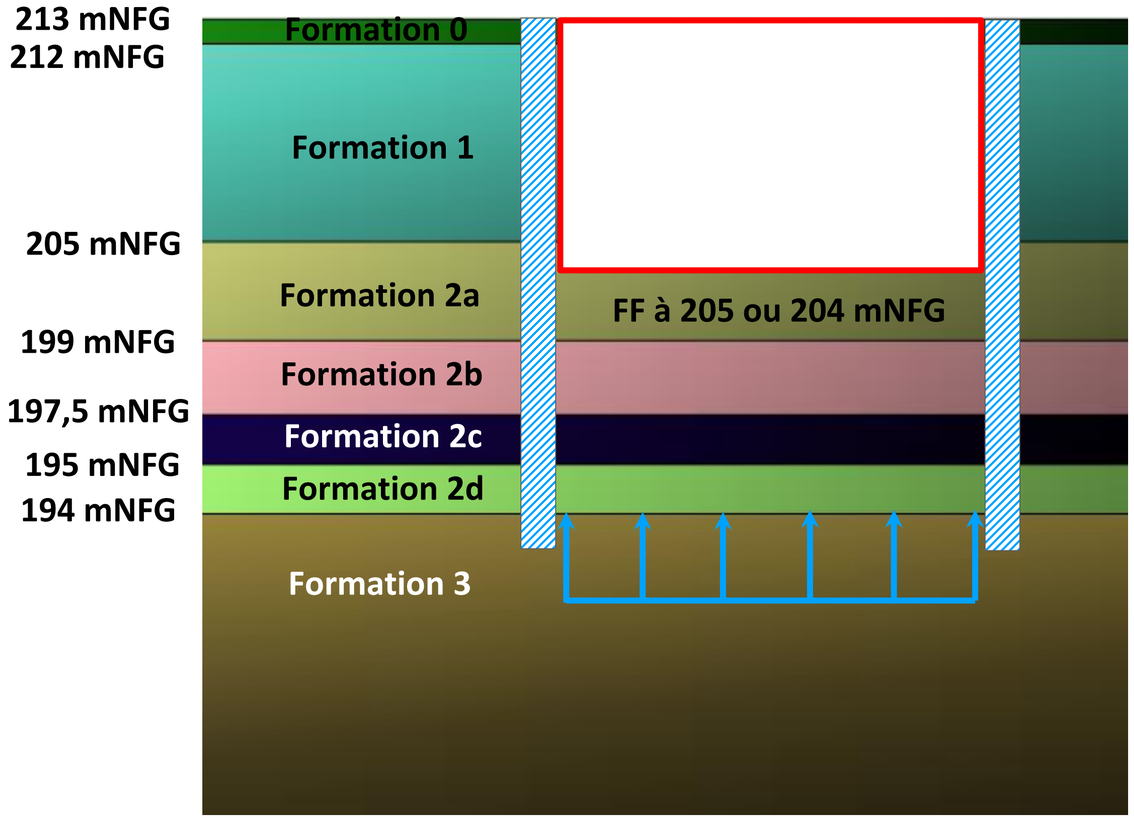
⇒ Phase travaux (niveau EC) : limitation de la profondeur de la fouille (ou réalisation d'un fond injecté)

⇒ Phase service (niveau EE) : pieux ou barrettes pour reprendre les sous-pressions

- Étanchéité : réalisation d'une boite étanche à l'intérieur du soutènement.

- Terrains potentiellement gonflants en fond de fouille : Réalisation d'un vide sanitaire

UPL :

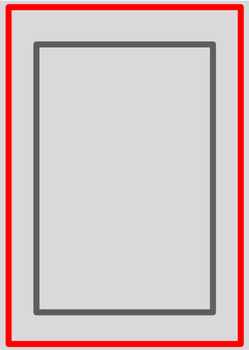
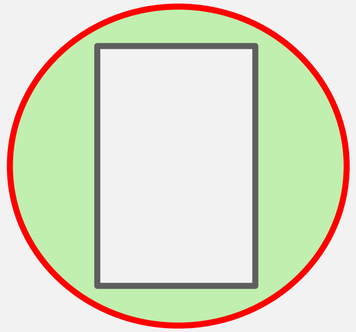


Résultat du calcul :

- Fosse stable à 8 m
- Fosse instable à 9 m ⇒ Fond en jet grouting dans les sables nécessaire

5. Choix constructifs

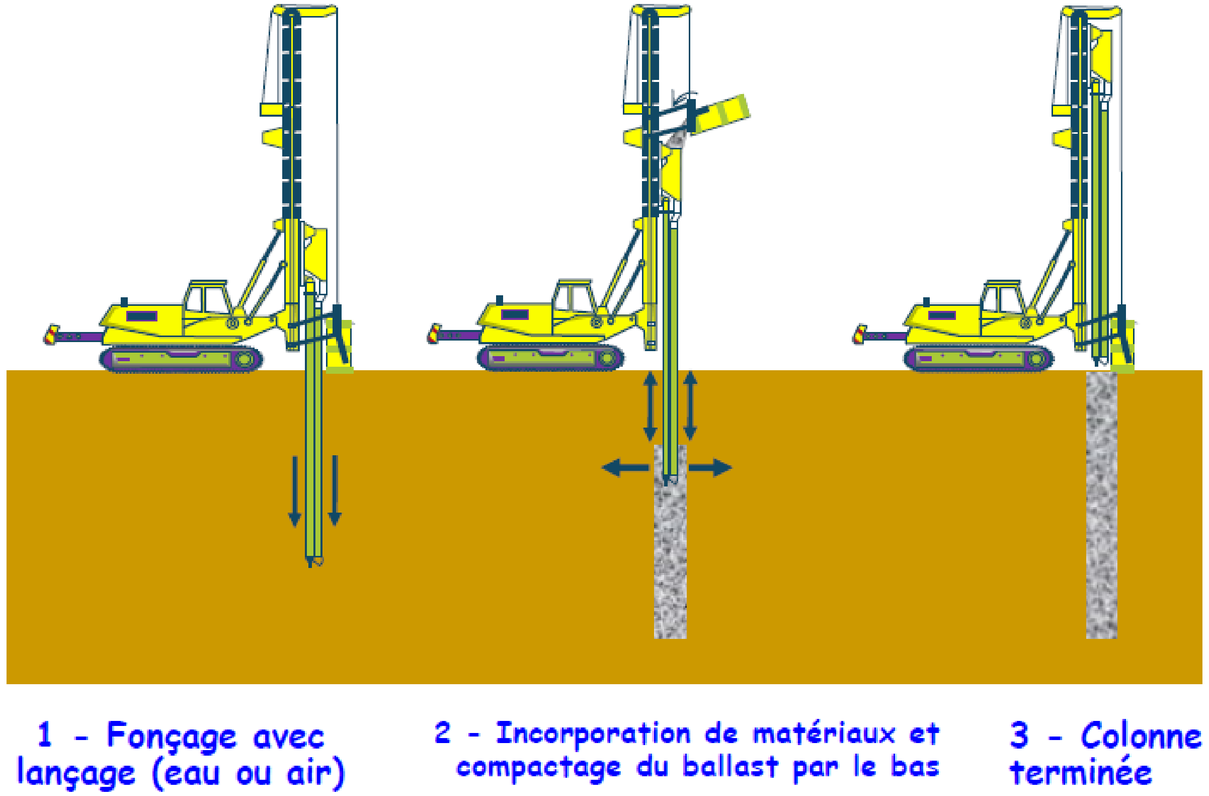
Soutènement en paroi moulée : rectangle ou circulaire

	Avantage	Inconvénient	Schéma
Rectangle	Peu de déblais Moins de pompage	Fiche profonde Travaille en flexion (ferraillage dense) Difficulté pour reprendre les efforts sismiques : Nécessite de réaliser des contreforts	
Circulaire	Fiche peu profonde Travaille en compression (moins de ferraillage) Possibilité de liaisonner la boite intérieure à la paroi circulaire pour la reprise des efforts sismiques (dalle en vert)	Beaucoup de déblais (traitement à prévoir en cas de réutilisation) Plus de pompage	

5. Choix constructifs

Traitement anti-liquéfaction : colonnes ballastée

- CRR (Cyclic Resistant Ratio ou taux de résistance au cisaillement cyclique du sol)
- Réduction du CSR (taux de contrainte cyclique engendré par le séisme Cyclic Stress Ratio) : concentration des contraintes de cisaillement liées au séisme sur l'élément le plus raide
- Réduction rapide des surpressions interstitielles par la forte perméabilité du gravier des colonnes

Prédimensionnement :

- Maille triangulaire
- Diamètre des colonnes : 0,6 m
- Entraxe des colonnes : 2,0 m
- 20 m de pronfondeur