



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Gestion des Données et Nouvel Environnement Digital en Géotechnique

Traitement et analyse de données pour modélisation du substratum



GEISLER, Jean

15 NOVEMBRE 2022

SOMMAIRE

1. Le contexte du site et les enjeux

2. Le modèle géotechnique

- Programme de reconnaissance
- Résultats des investigations
- Problématiques géotechniques liées à la justification des fondations

3. Les modélisations (SIG, SURFER)

4. La conception

5. Confrontation avec l'exécution

6. Conclusion

1. CONTEXTE DU SITE ET LES ENJEUX

□ Présentation du projet



➔ **INTER IKEA :**

Surface forum $\approx 42\ 150\ \text{m}^2$

Supports $\approx 587\ \text{u}$

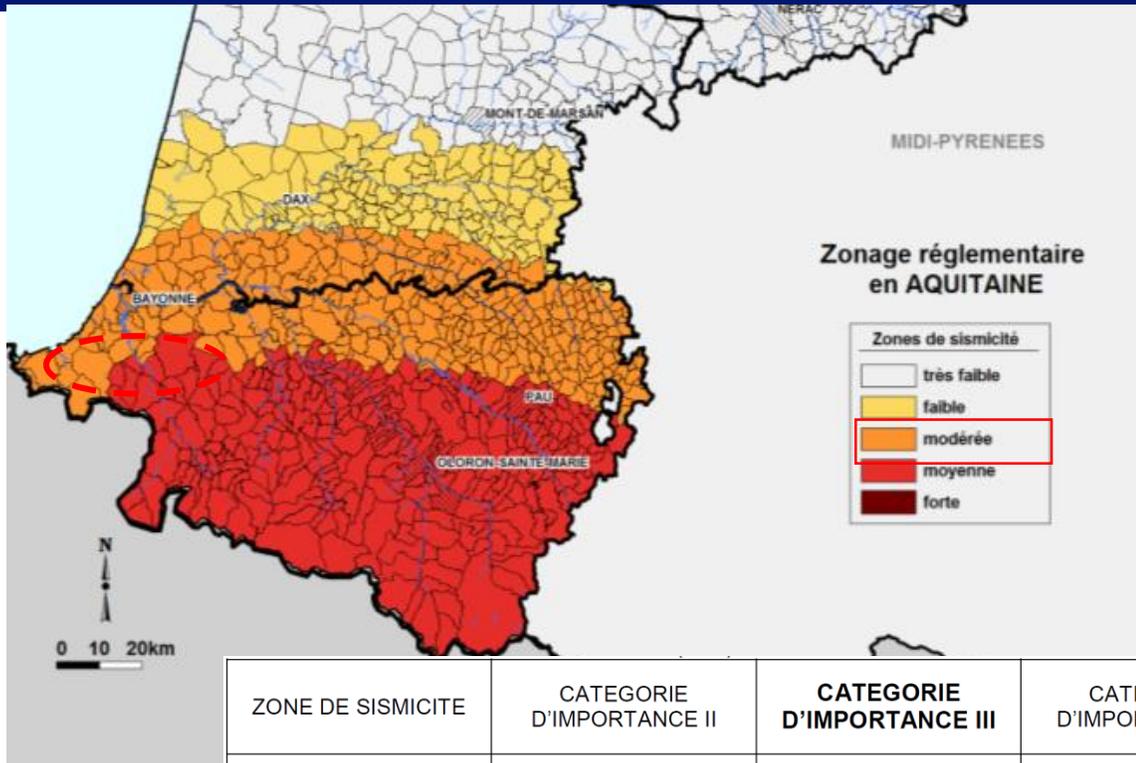
➔ **IKEA :**

Surface magasin : $26\ 400\ \text{m}^2$

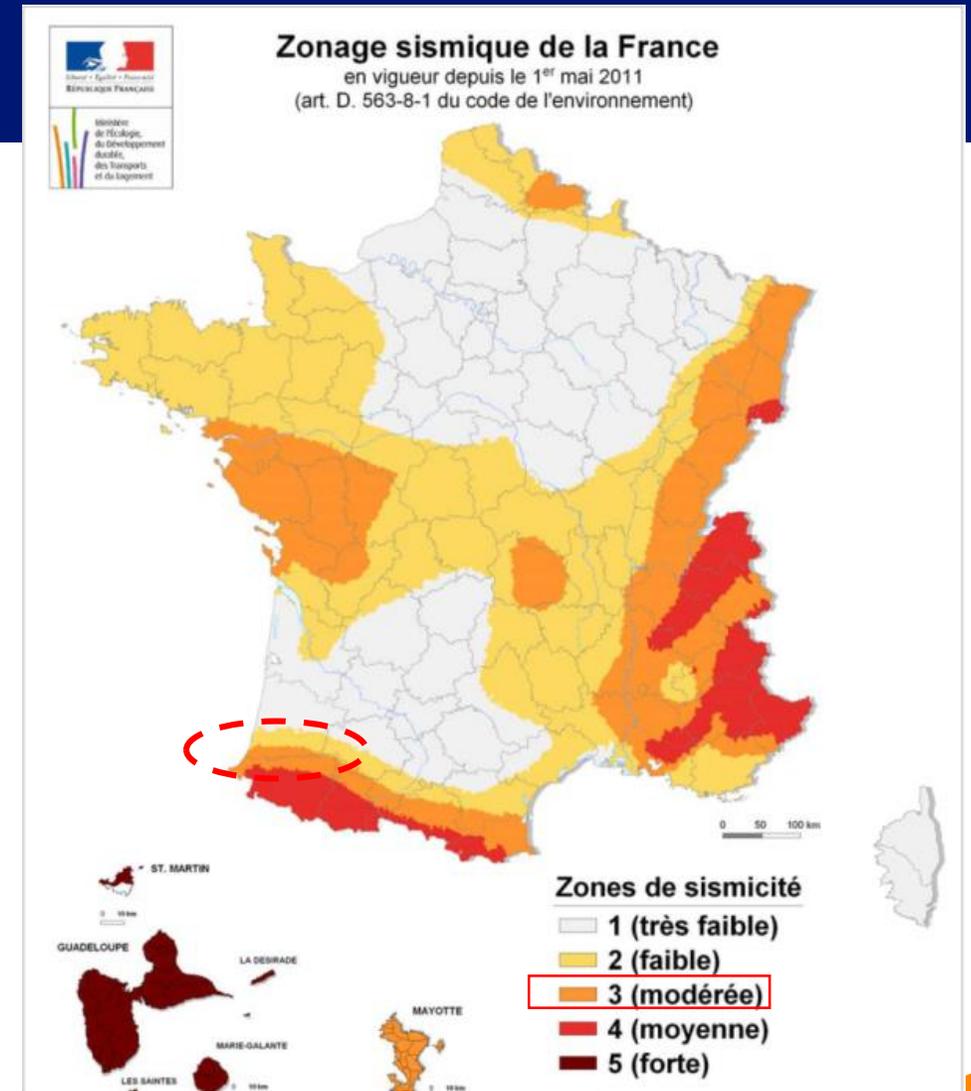
Supports : $\approx 349\ \text{u}$

1. CONTEXTE DU SITE ET LES ENJEUX

Le contexte sismique

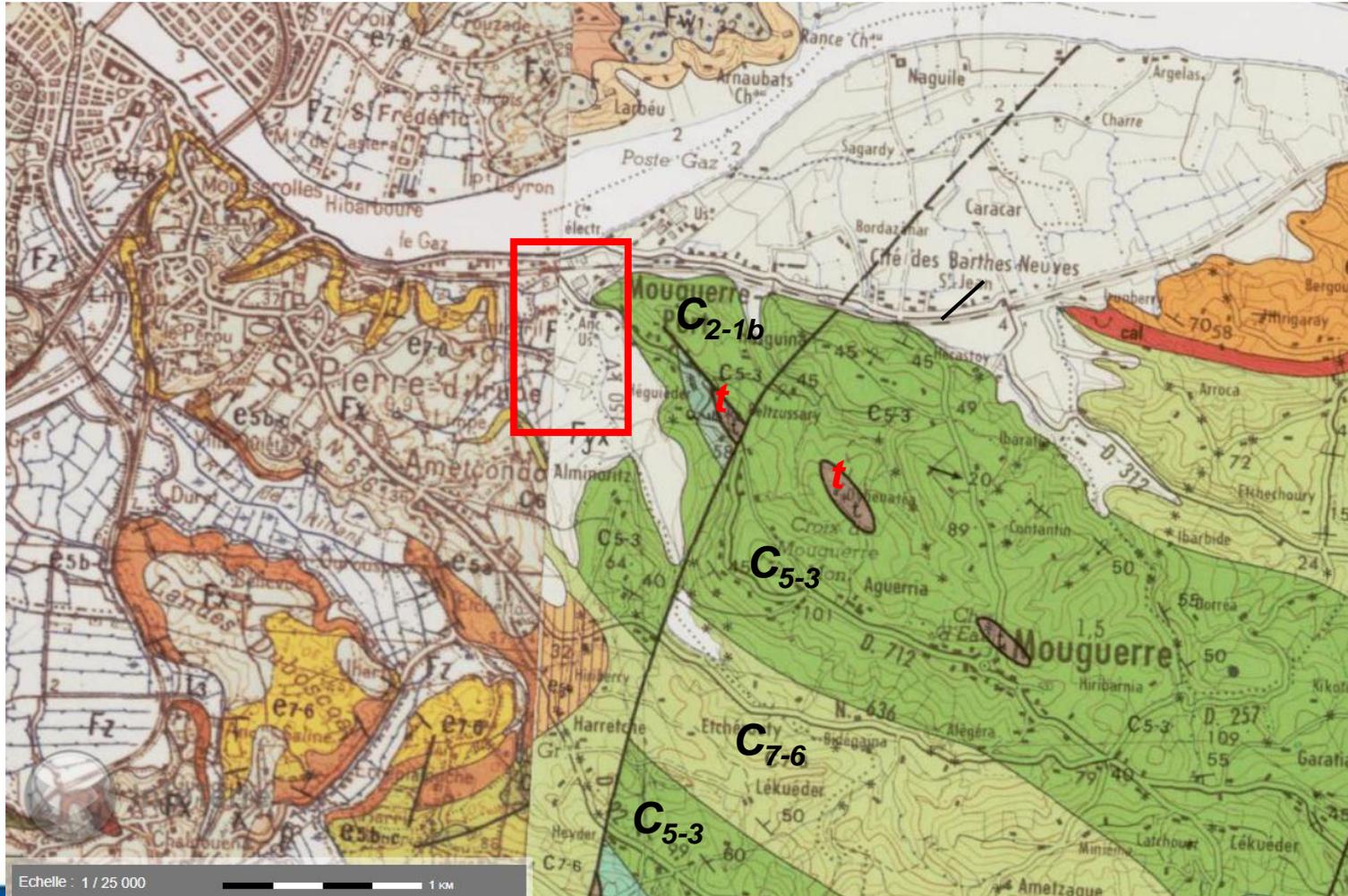


ZONE DE SISMICITE	CATEGORIE D'IMPORTANCE II	CATEGORIE D'IMPORTANCE III	CATEGORIE D'IMPORTANCE IV
2 (faible)	1,1	1,6	2,1
3 (modérée)	1,6	<u>2,1</u>	2,6
4 (moyenne)	2,4	2,9	3,4
5 (fort)	4	4,5	5



1. CONTEXTE DU SITE ET LES ENJEUX

Le contexte géologique



Fx : Terrasse alluviale de 40-50 m

Fyx : Würm final et post-glaciaire. Sables, argiles, tourbes

C₇₋₆ : Sénonien supérieur. Calcaires au sommet, flysch marno-gréseux à la base

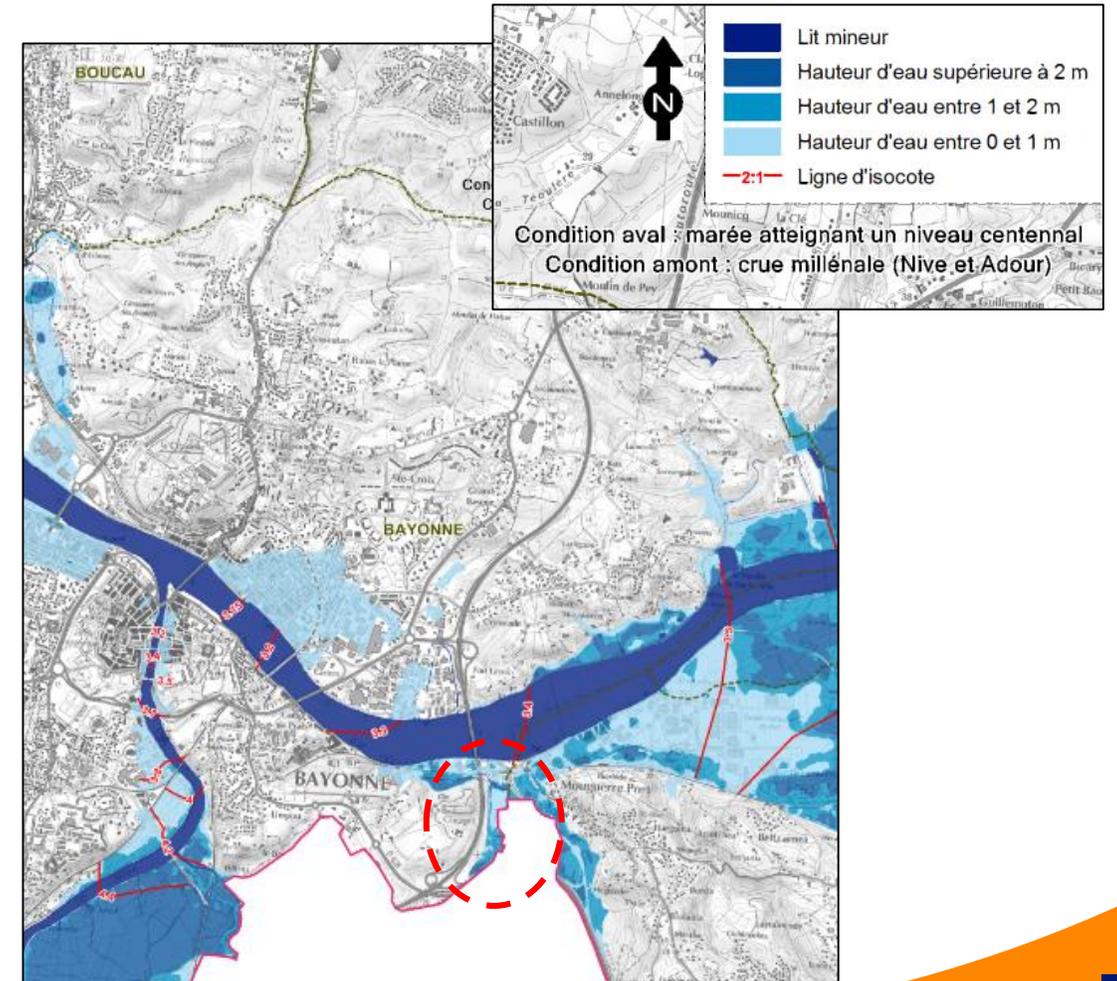
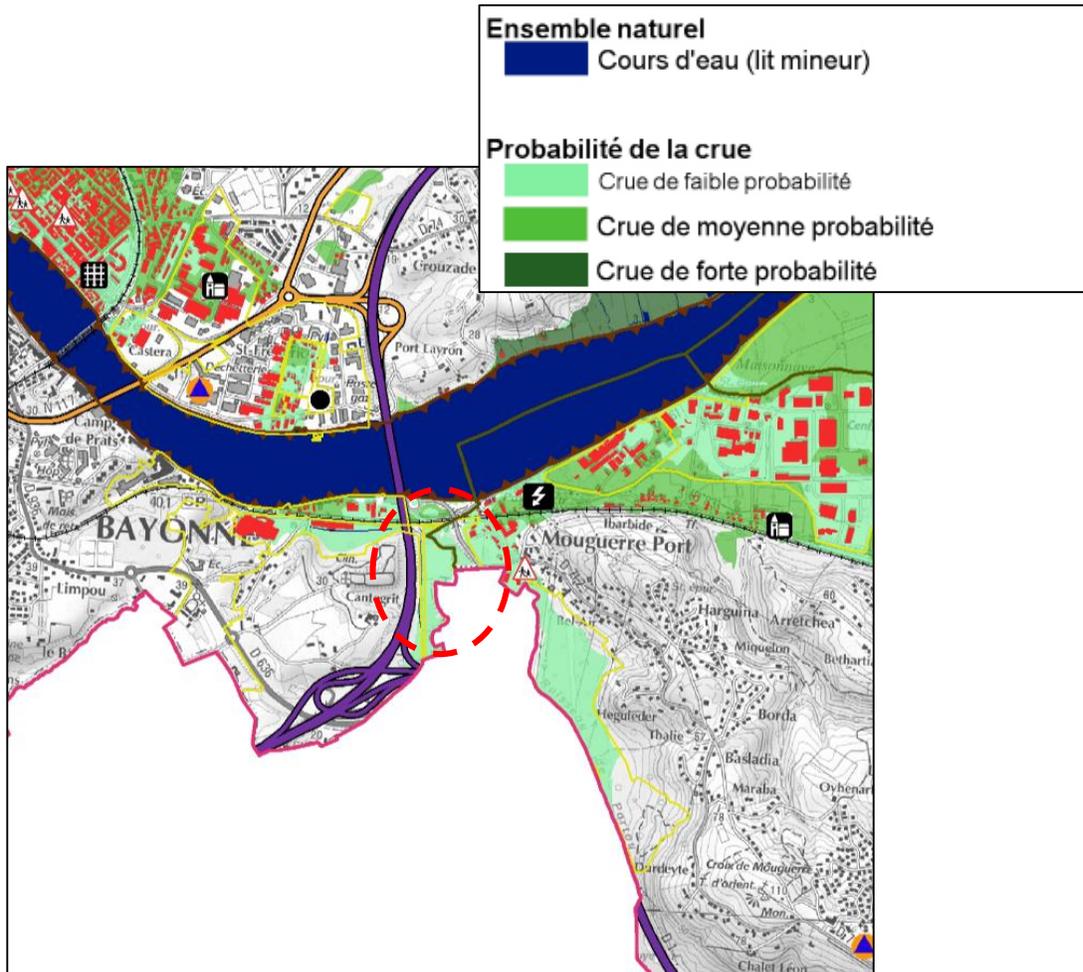
C₅₋₃ : Sénonien inférieur et Turonien. Calcaires de Bidache

C_{2-1b} : Cénomaniens à Albiens supérieurs. Flysch de Mixe

t : Trias

1. CONTEXTE DU SITE ET LES ENJEUX

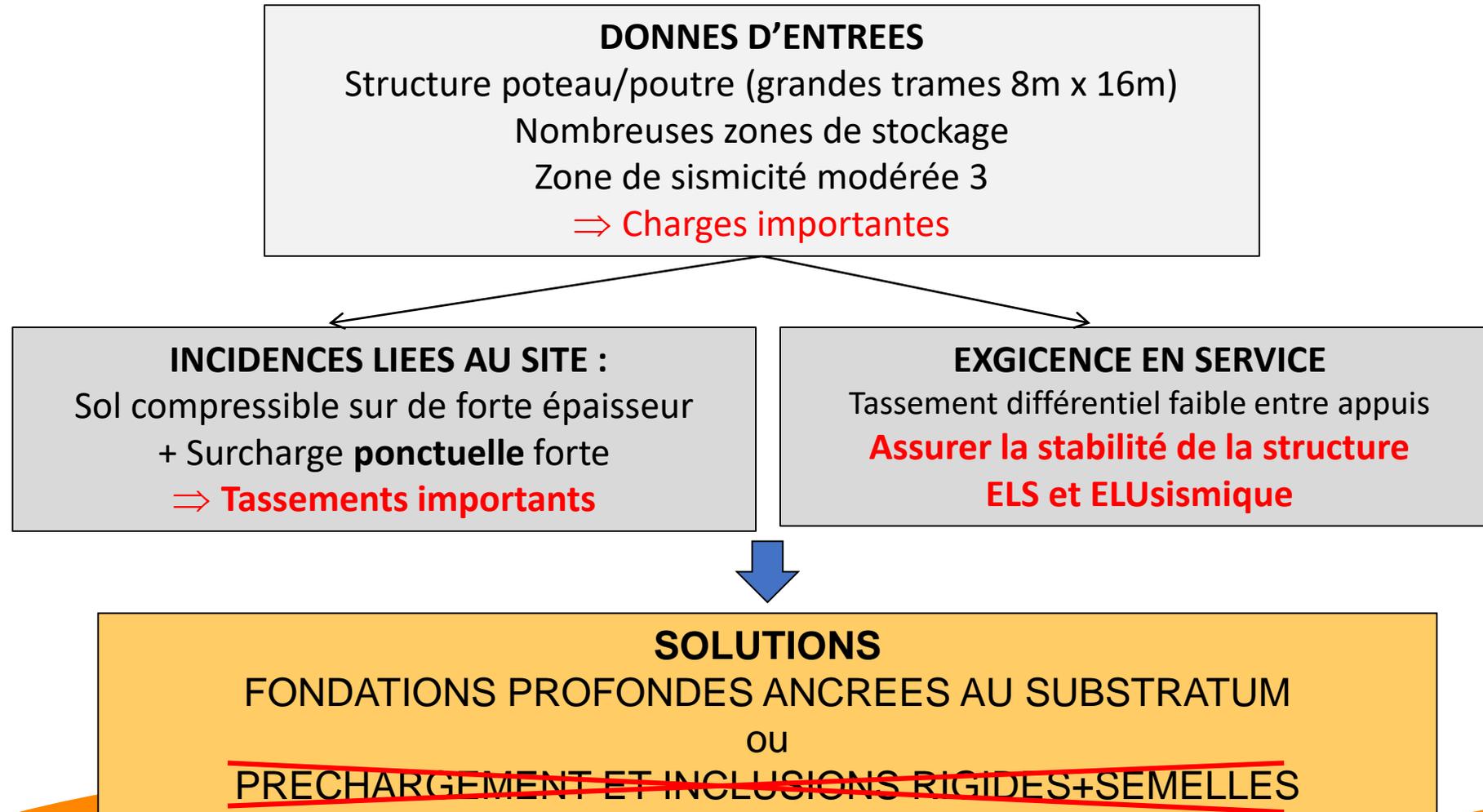
Le contexte topographique et risque inondation



<https://www.nouvelle-aquitaine.developpement-durable.gouv.fr/>

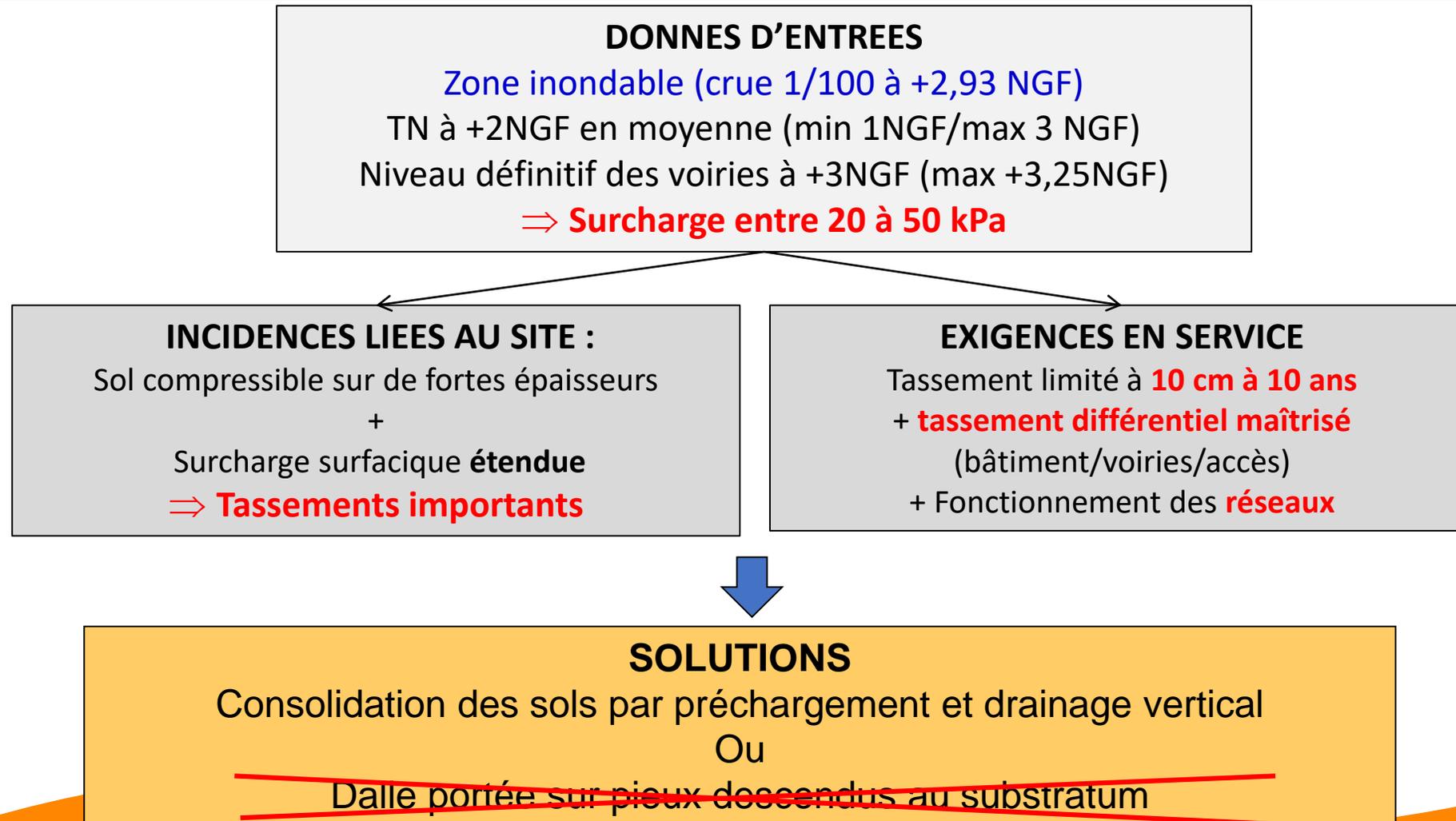
1. CONTEXTE DU SITE ET LES ENJEUX

□ BATIMENT : Solutions de fondations



1. CONTEXTE DU SITE ET LES ENJEUX

❑ VOIRIES/PARKING : Solution de traitement de sol



2. MODELE GEOTECHNIQUE

2. LE MODELE GEOTECHNIQUE

Paramètres géotechniques

Il est utile de rappeler les paramètres géotechniques qui gouvernent les tassements car ils ont orienté la stratégie du programme des investigations géotechniques au stade des études de conception.

Les données issues des investigations géotechniques in situ :

- la **géométrie des formations** (épaisseurs des couches), H_i, \dots, H_n [m]
- l'**état de consolidation initial** des sols $OCR = \sigma'_p / \sigma'_{v0}$
- l'ensemble des paramètres issus des essais de pénétration statique à pointe piézocône : q_t [MPa] , $R_f\%$, $FR\%$, U_2 , B_q , t_{50} [s] et les valeurs corrélées.
- le **niveau piézométrique** Z_{eau} [NGF]
- les **conditions aux limites** (toit du substratum, frontières des écoulements)

2. LE MODELE GEOTECHNIQUE

Paramètres géotechniques

Les données issues des essais en laboratoire :

- L'indice des vides e_0
- Le poids volumique déjaugé du sol $\gamma_h, \gamma' \text{ [kN/m}^3\text{]}$
- Le coefficient de consolidation $C_v \text{ et } C_r \text{ [m}^2\text{/s]}$
- L'indice de compression du sol $C_c/(1+e_0)$
- L'indice de recompression $C_s/(1+e_0)$
- La pression de préconsolidation $\sigma'_p \text{ [MPa]}$
- L'indice de fluage $C_{ae} = (1+e_0) * C_a$
- La date de démarrage du fluage $T_0 \text{ [jours]}$

Les données issues de la conception du préchargement à contrôler en exécution :

- la charge de préchargement initiale $\Delta q \text{ [kPa]}$
- la géométrie des remblais de préchargement hauteur H_R et emprises
- le poids volumique des remblais $\gamma_R \text{ [kN/m}^3\text{]}$
- la durée des phases du préchargement $T \text{ [jours]}$
- la maille, la profondeur, le diamètre efficace des drains verticaux « a » [m]

2. LE MODELE GEOTECHNIQUE

Paramètres géotechniques

Compte tenu du nombre élevé de paramètres dans le modèle, il est essentiel d'avoir un modèle géotechnique suffisamment précis pour le dimensionnement des travaux de préchargement et l'analyse du comportement du sol lors du préchargement.

Une imprécision sur la géométrie des sols compressibles et la contrainte de préchargement rendrait difficile voire impossible le recalage du modèle.

De même les modèles de comportement (e_0 , C_c , C_v , C_α , T_0 ...), étant extrapolés à l'échelle d'une couche géotechnique, **il est nécessaire de procéder à des ajustements (variation du paramètre avec la profondeur, corrélations, etc...).**

Le calcul prévisionnel des vitesses et le calcul des amplitudes de tassement seront donc plus précis et les ajustements limités, pour un nombre significatif d'essais en laboratoire.

2. LE MODELE GEOTECHNIQUE

Investigations géotechniques

Pour faciliter les corrélations entre les essais en laboratoire et in-situ, les sondages carottés ont été doublés : **carottage + CPTu** voire triplés : **carottage + CPTu + pressiomètre**,

La stratégie d'investigation a été la suivante :

1^{er} phase (2010) : réalisation des **44 essais de pénétration statique** au piézocône CPTu, dont 28 tests de dissipation, **identification des différentes couches** de faciès silteux et de faciès sablonneux.

2^{ème} phase (2010): choix de l'implantation de **3 sondages carottés** et **position des échantillons intacts** par l'ingénierie de projet FUGRO (équipés en piézomètres).

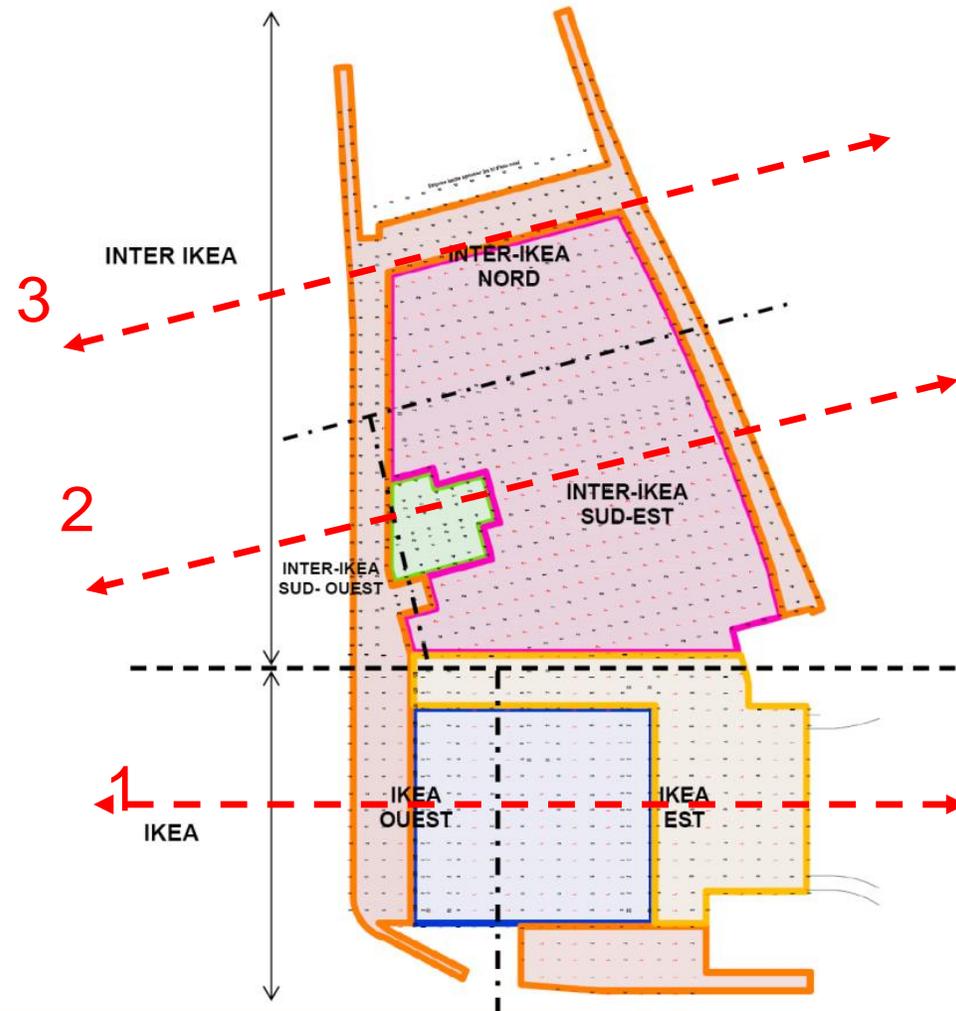
3^{ème} phase : Ouverture des échantillons et **définition du programme d'essais** par l'ingénierie (identification, compressibilité et fluage, cisaillement).

4^{ème} phase (2010) : réalisation des **sondages pressiométriques** en profondeur sous le refus des sondages CPTu.

+**Un suivi piézométrique** sur 12mois a été réalisé à plusieurs endroits du site avec des sondes automatisées (type Divers[®]) pour définir les niveaux d'eau.

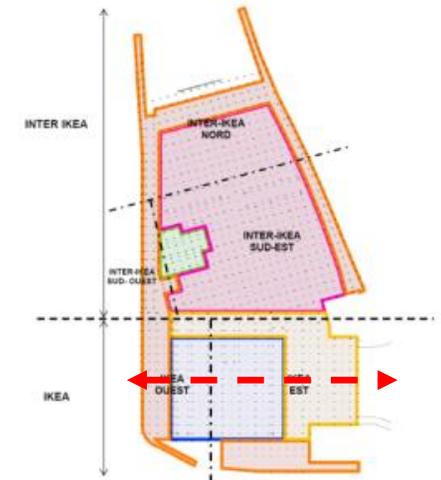
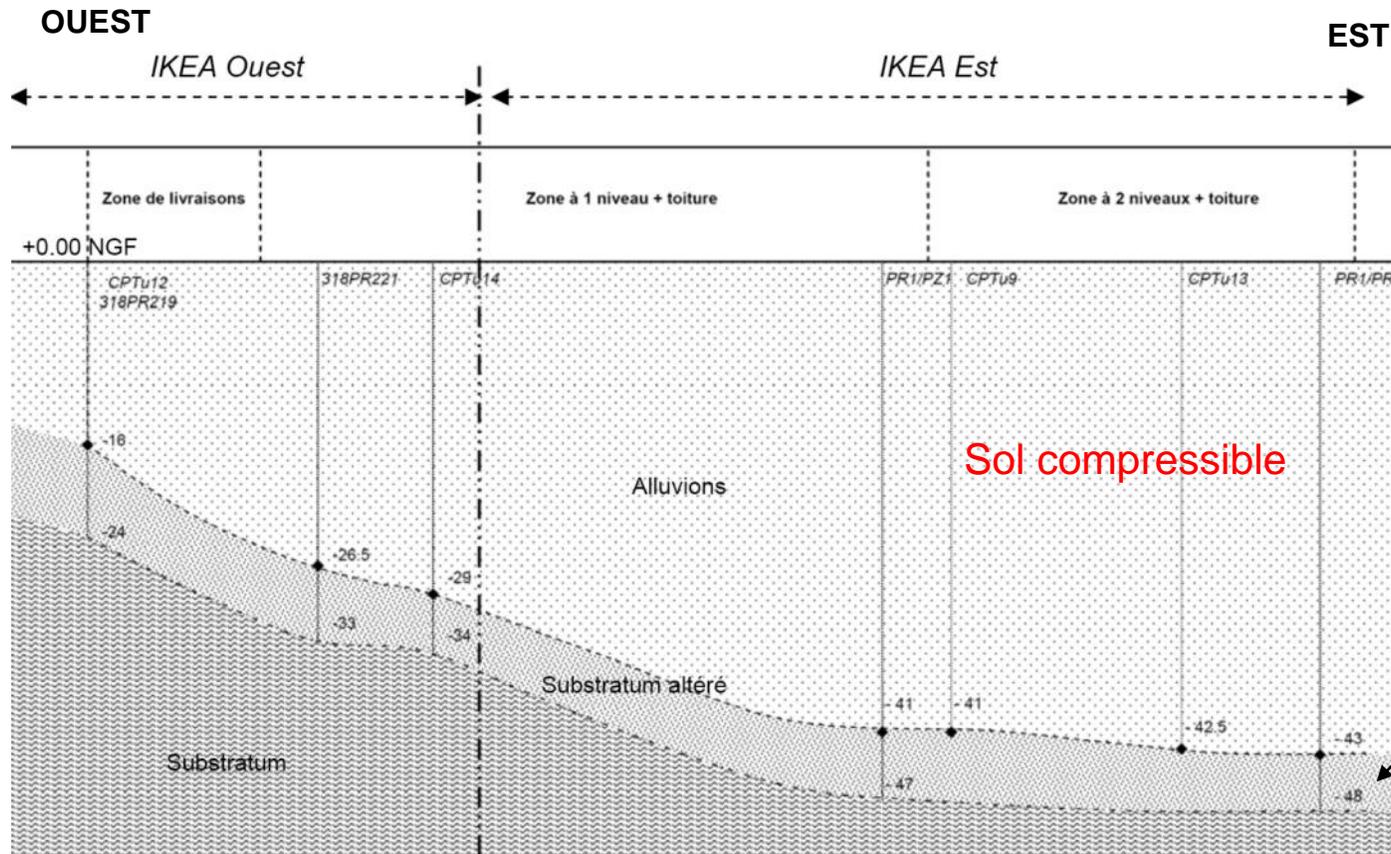
2. LE MODELE GEOTECHNIQUE

Localisation des profils transversaux



2. LE MODELE GEOTECHNIQUE

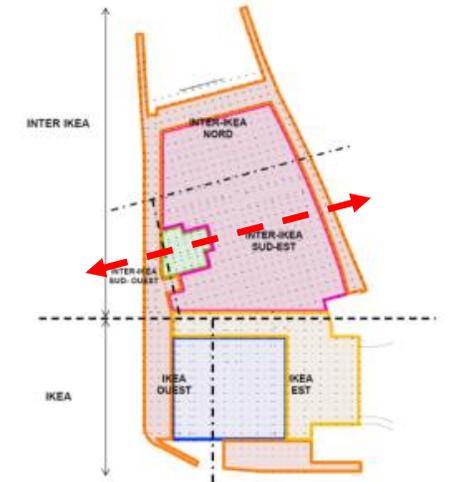
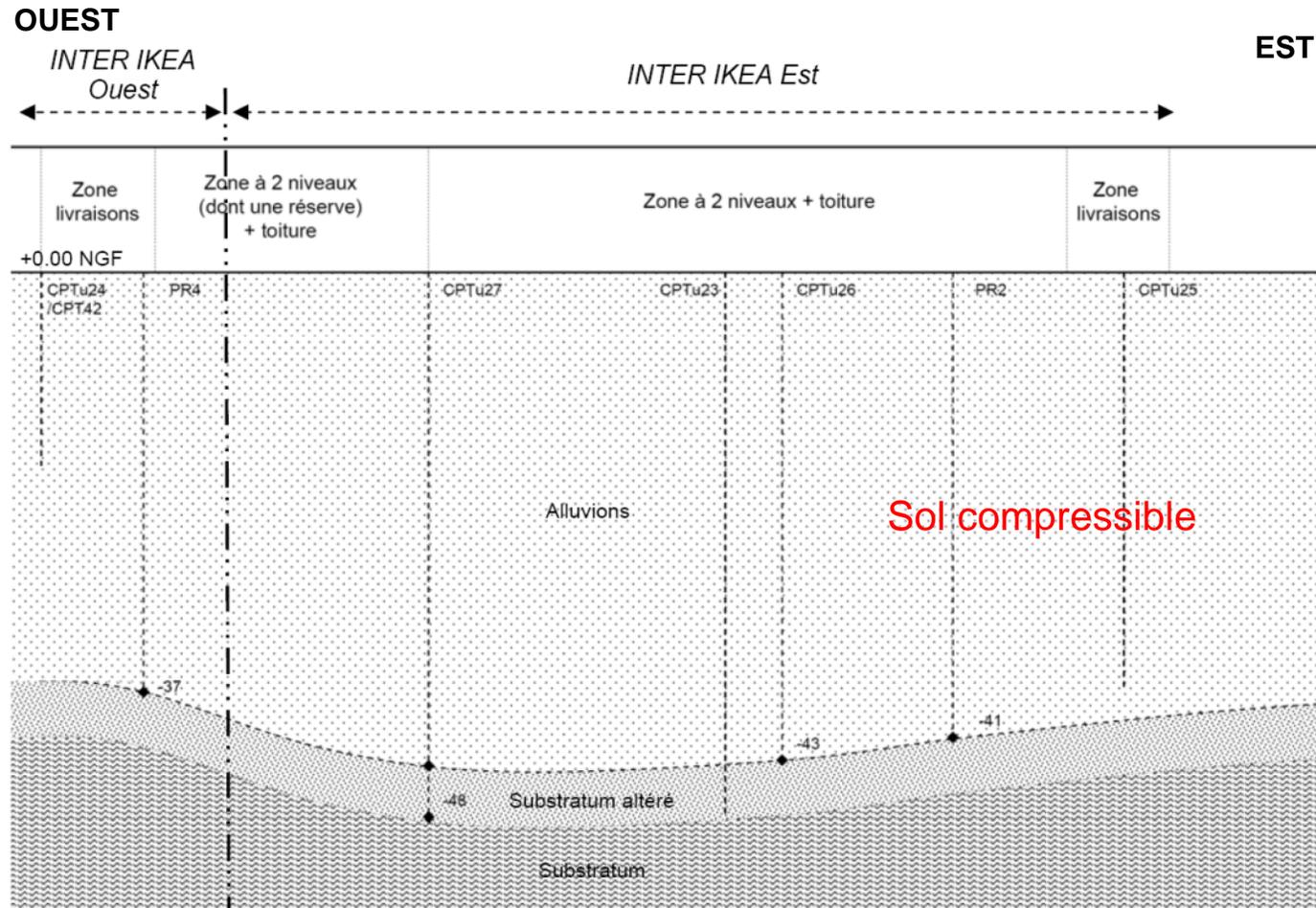
■ Profil 1 - Zone IKEA



Niveau altéré
d'épaisseur variable

2. LE MODELE GEOTECHNIQUE

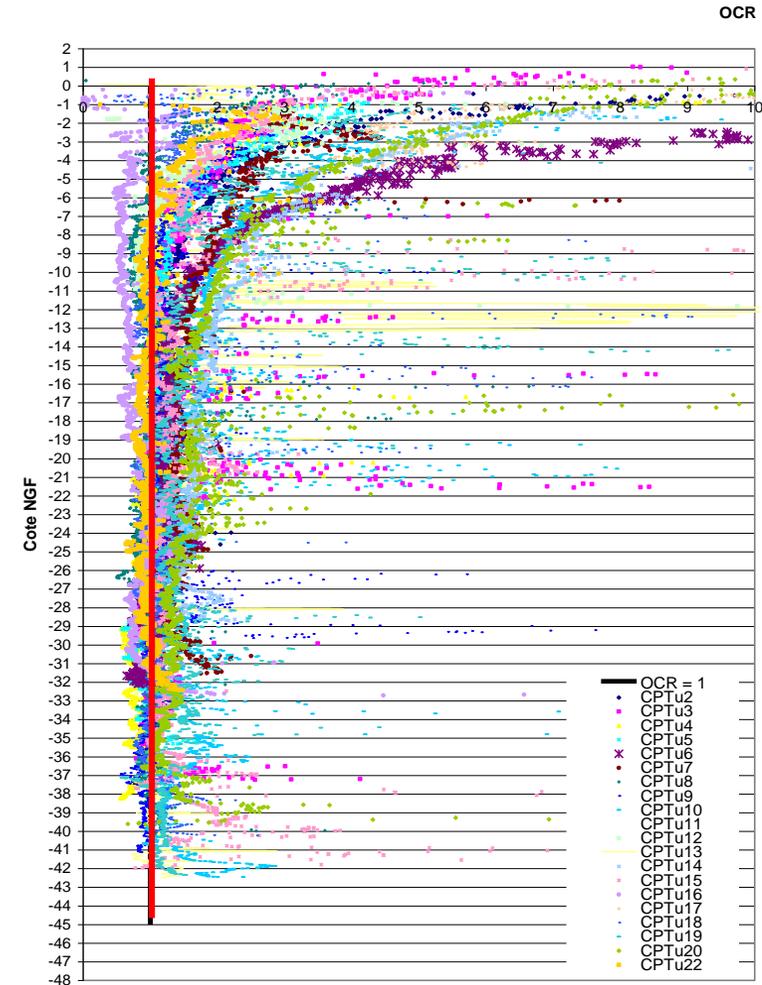
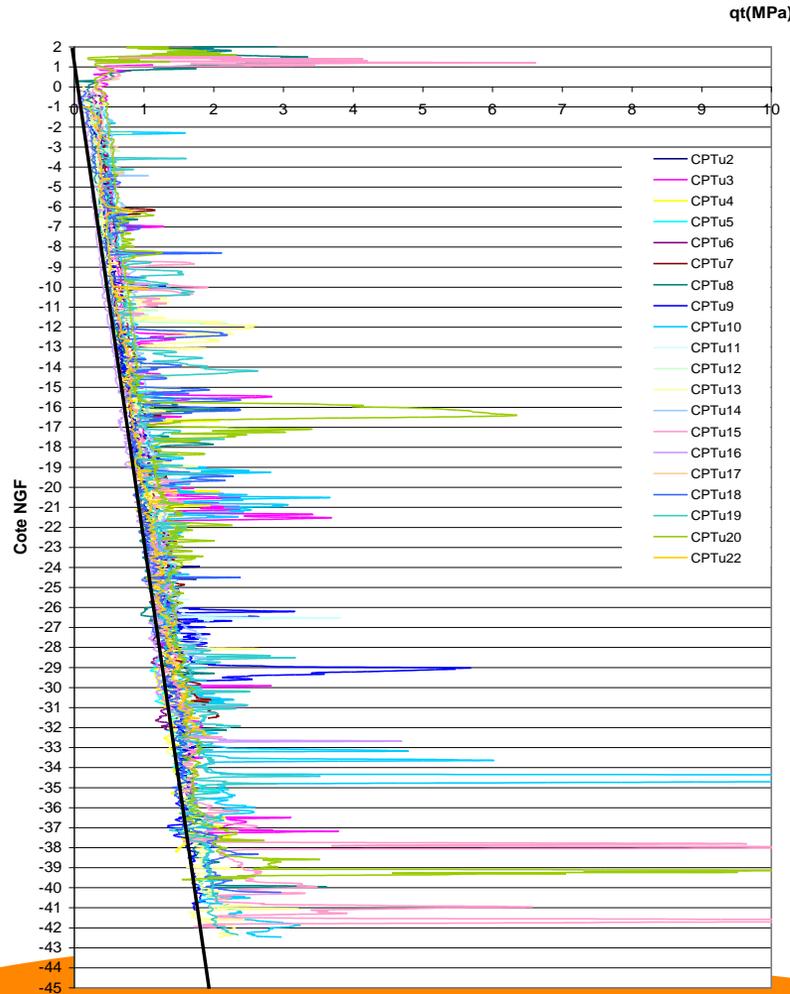
□ Profil 2 – Centre commercial IICB – Zone Sud



Niveau altéré
d'épaisseur variable

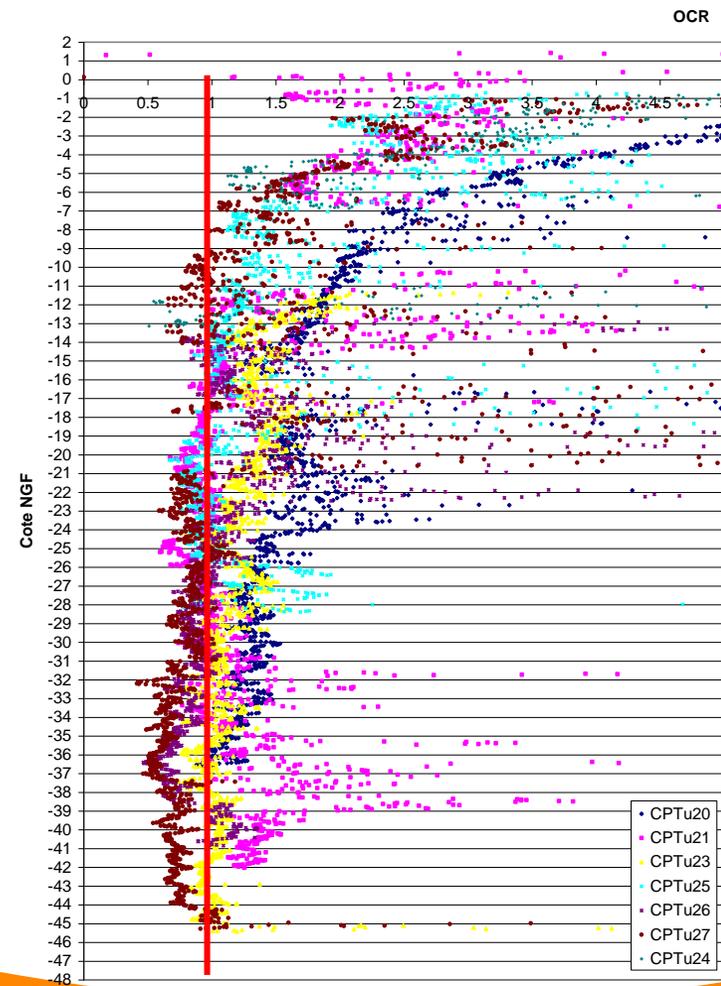
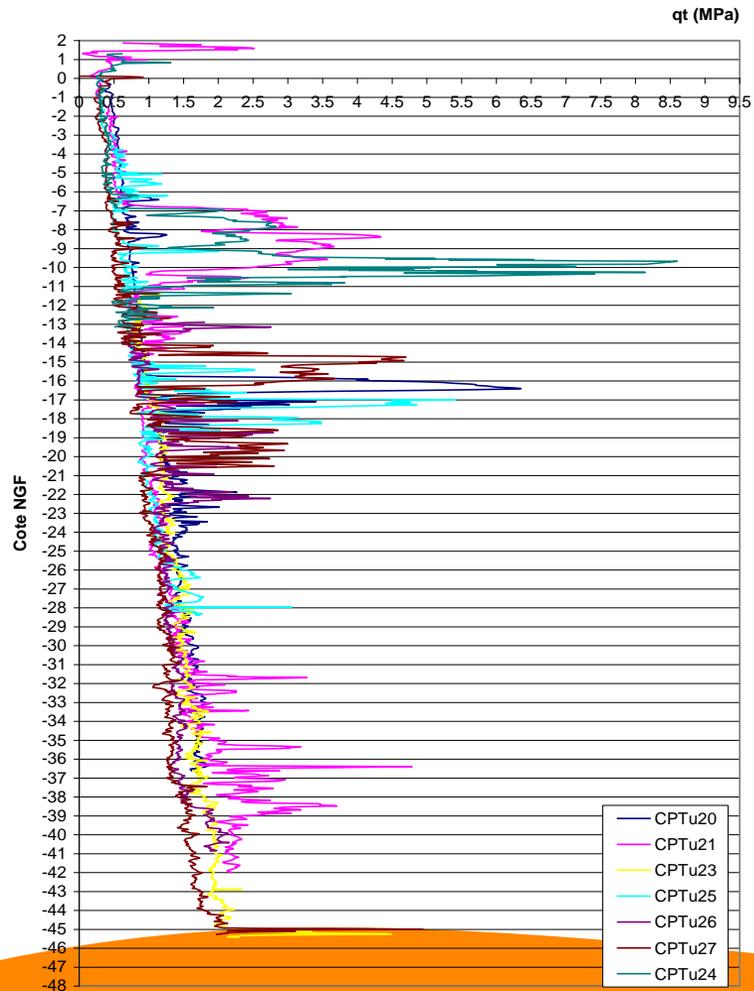
2. LE MODELE GEOTECHNIQUE

Profils CPT - Zone IKEA



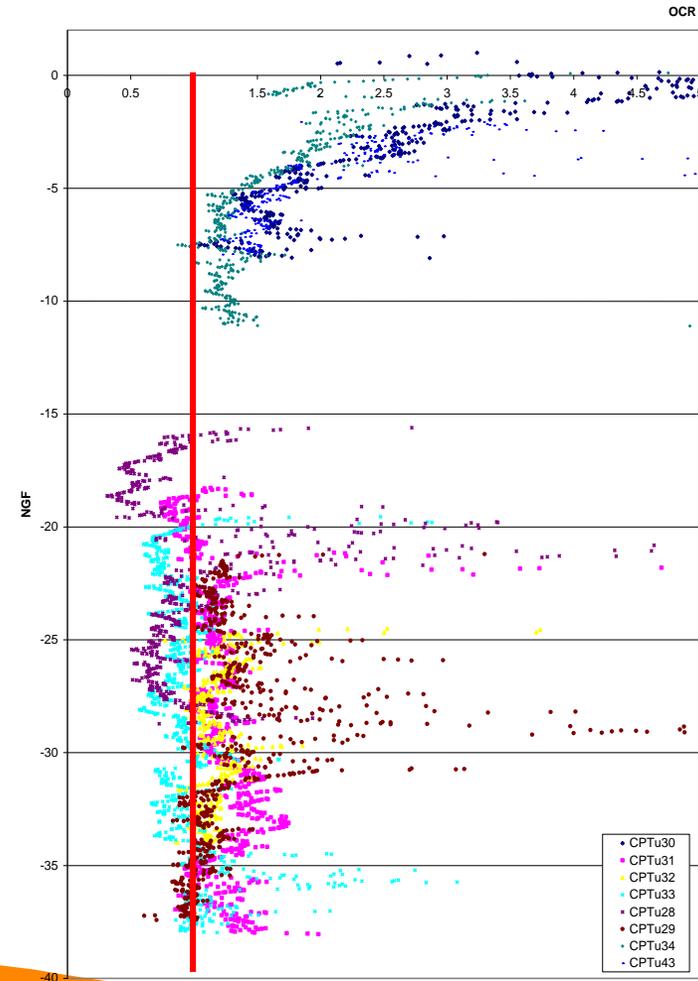
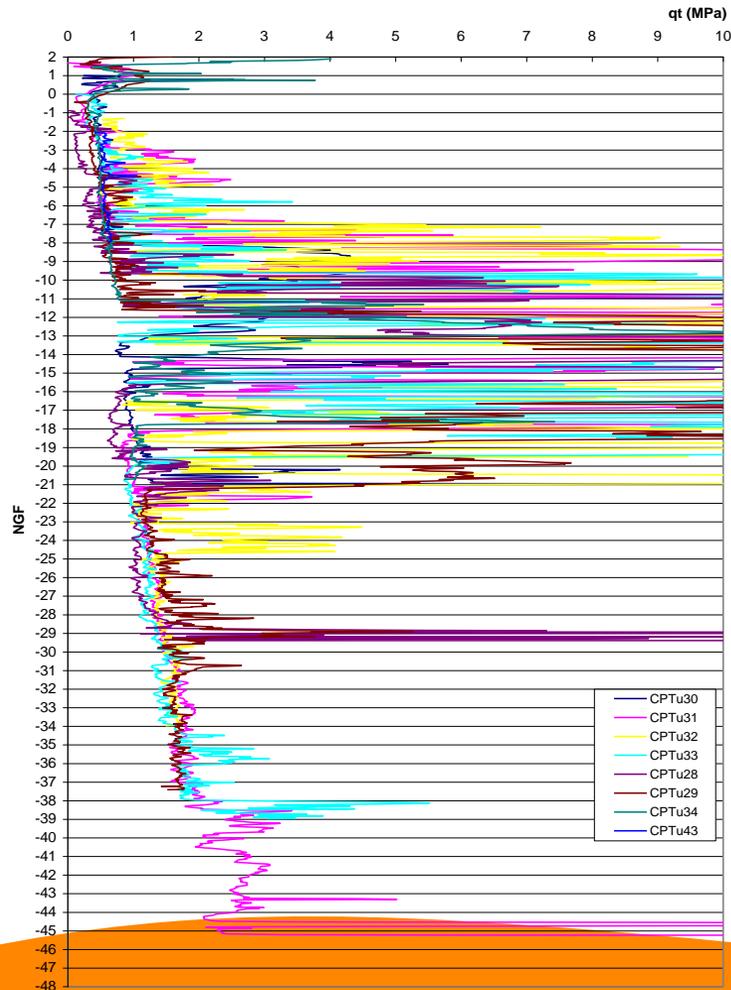
2. LE MODELE GEOTECHNIQUE

Profils CPT_ Forum commercial IICB



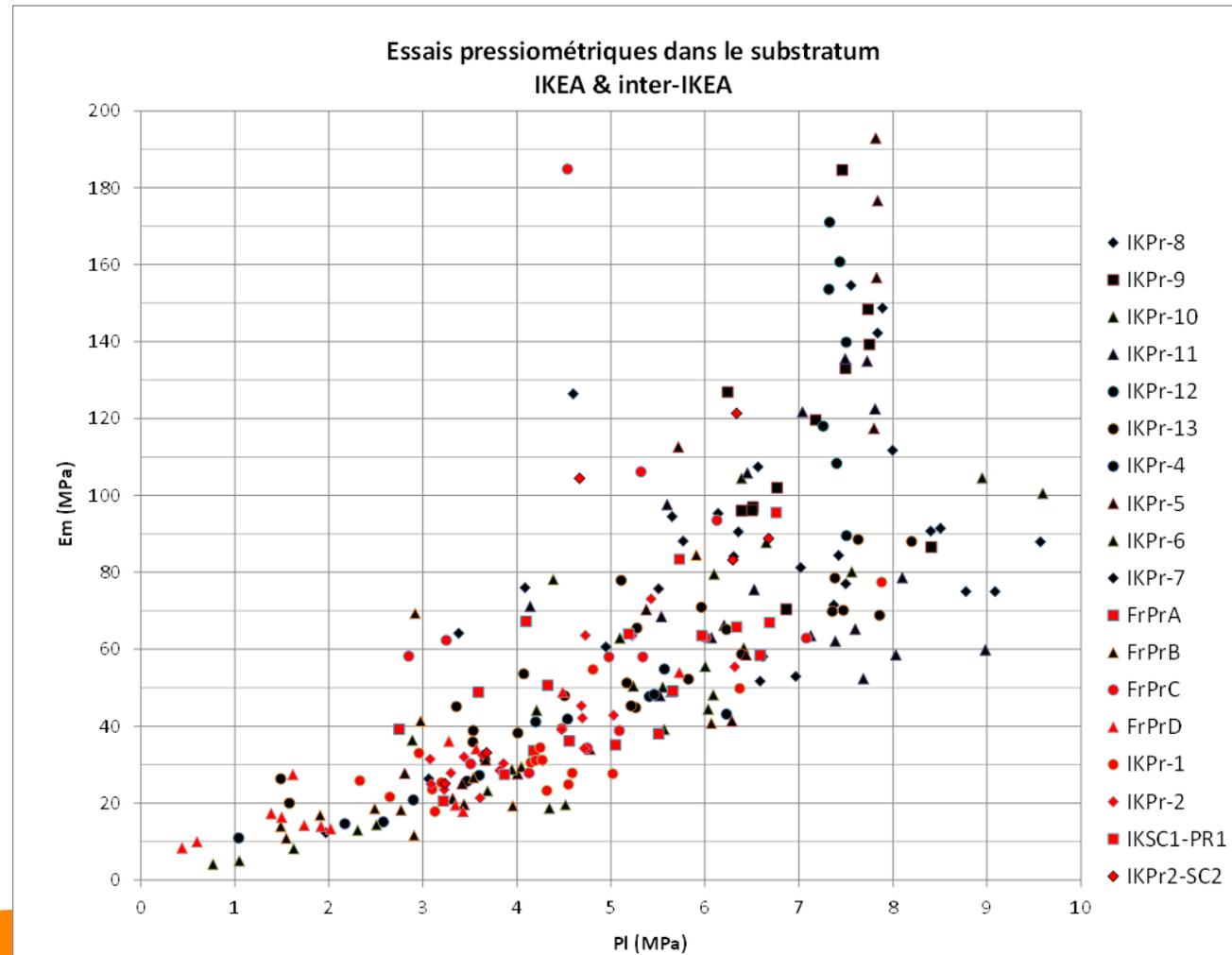
2. LE MODELE GEOTECHNIQUE

Profils CPT - Parking Nord



2. LE MODELE GEOTECHNIQUE

❑ Résultats des sondages pressiométriques – IKEA & IICB

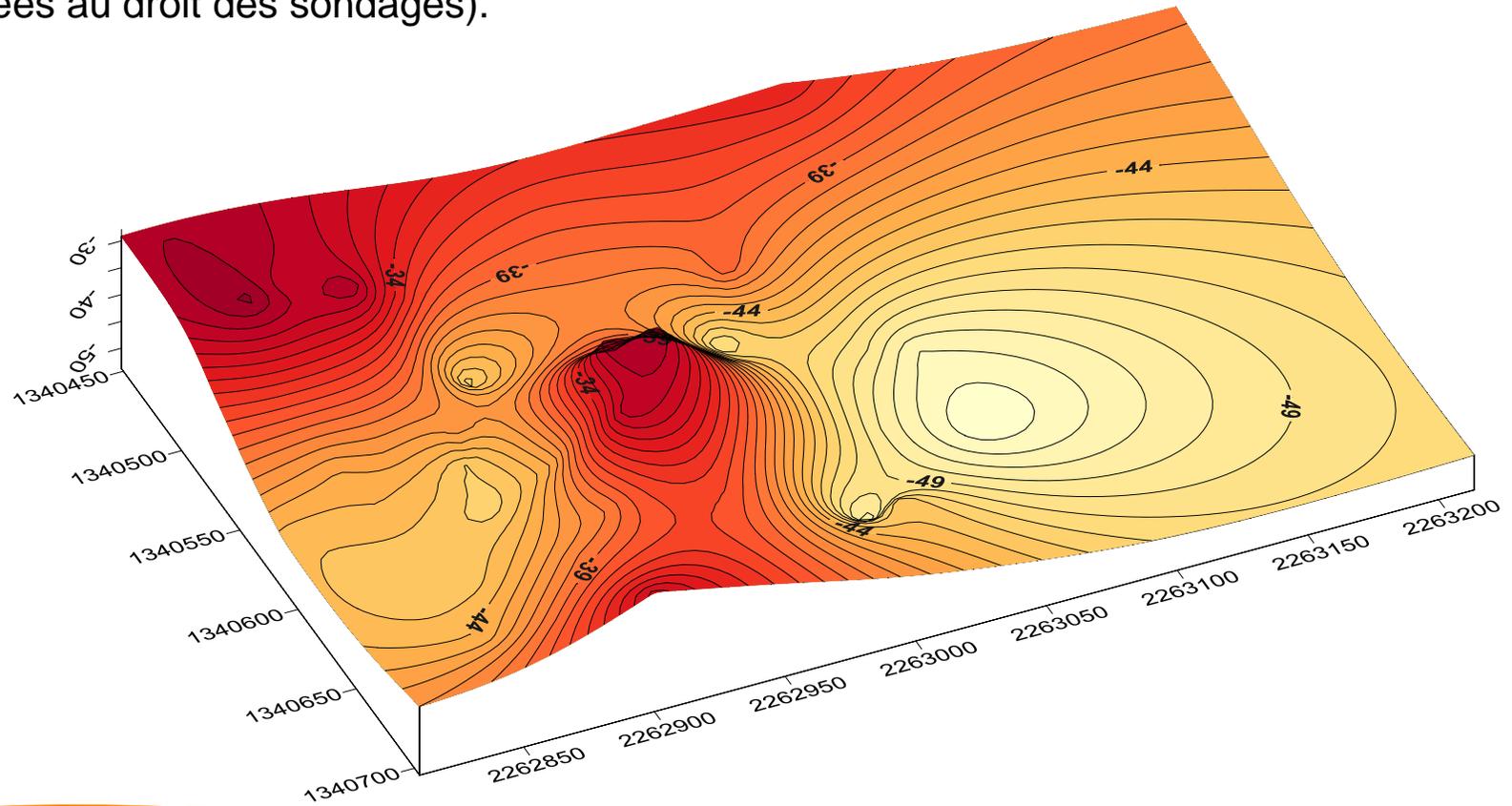


3. MODELISATION SIG / SURFER

3. MODELISATION SIG / SURFER

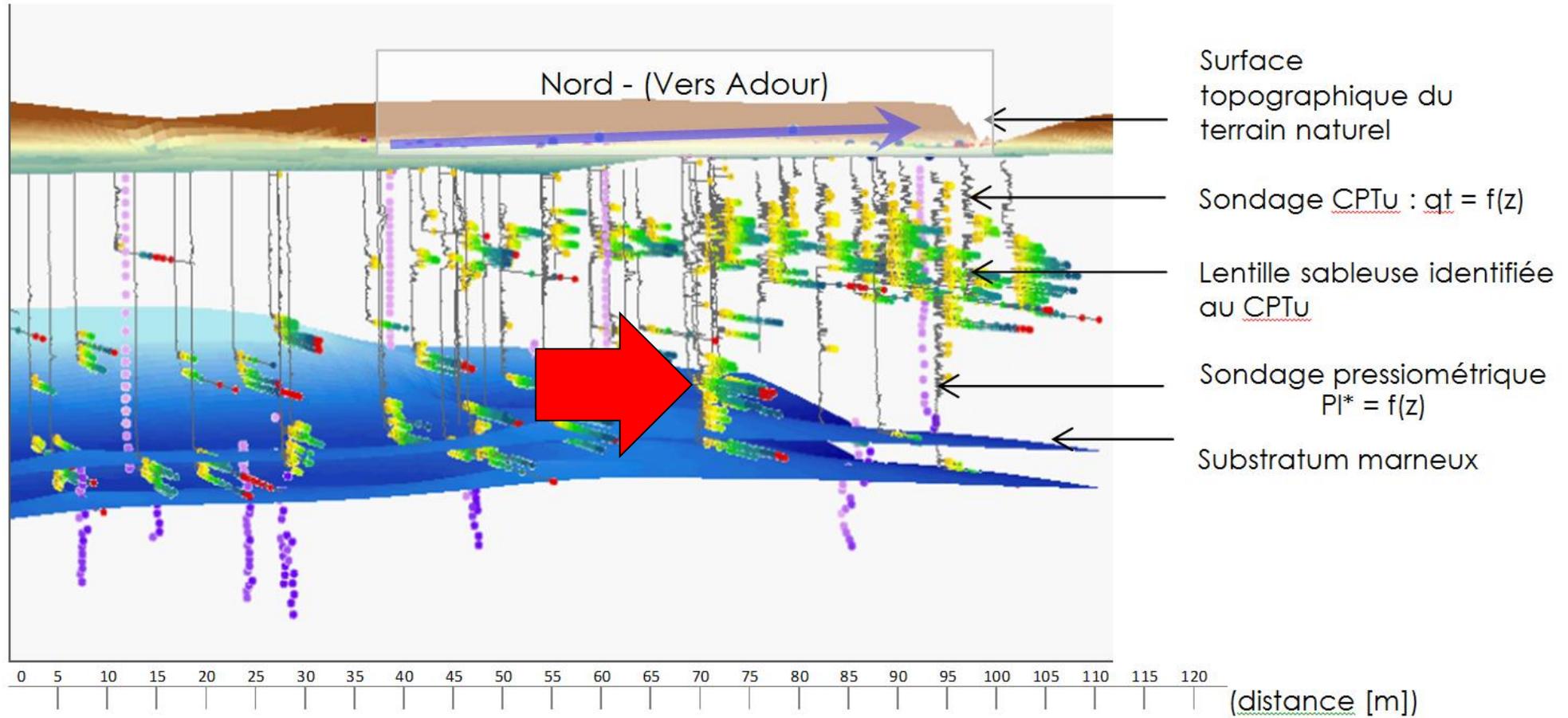
■ Carte SURFER

Vue 3D du toit du substratum (isohypses du toit du substratum par extrapolation des cotes relevées au droit des sondages).



3. MODELISATION SIG / SURFER

▣ Modélisation SIG - ARCGIS

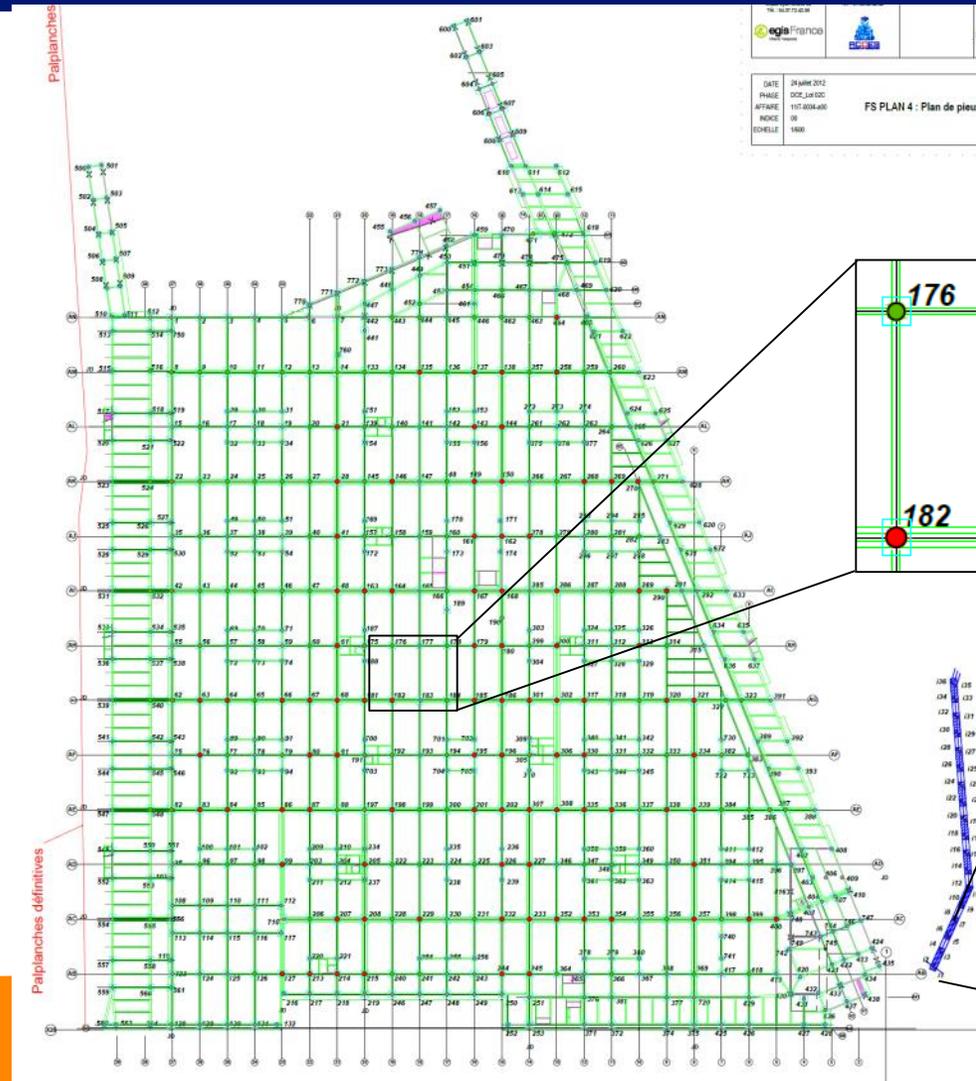


4. CONCEPTION

**L'apport des modélisation dans la justification des
fondations profondes**

4. CONCEPTION

Extrait du plan de fondation du forum commercial IICB

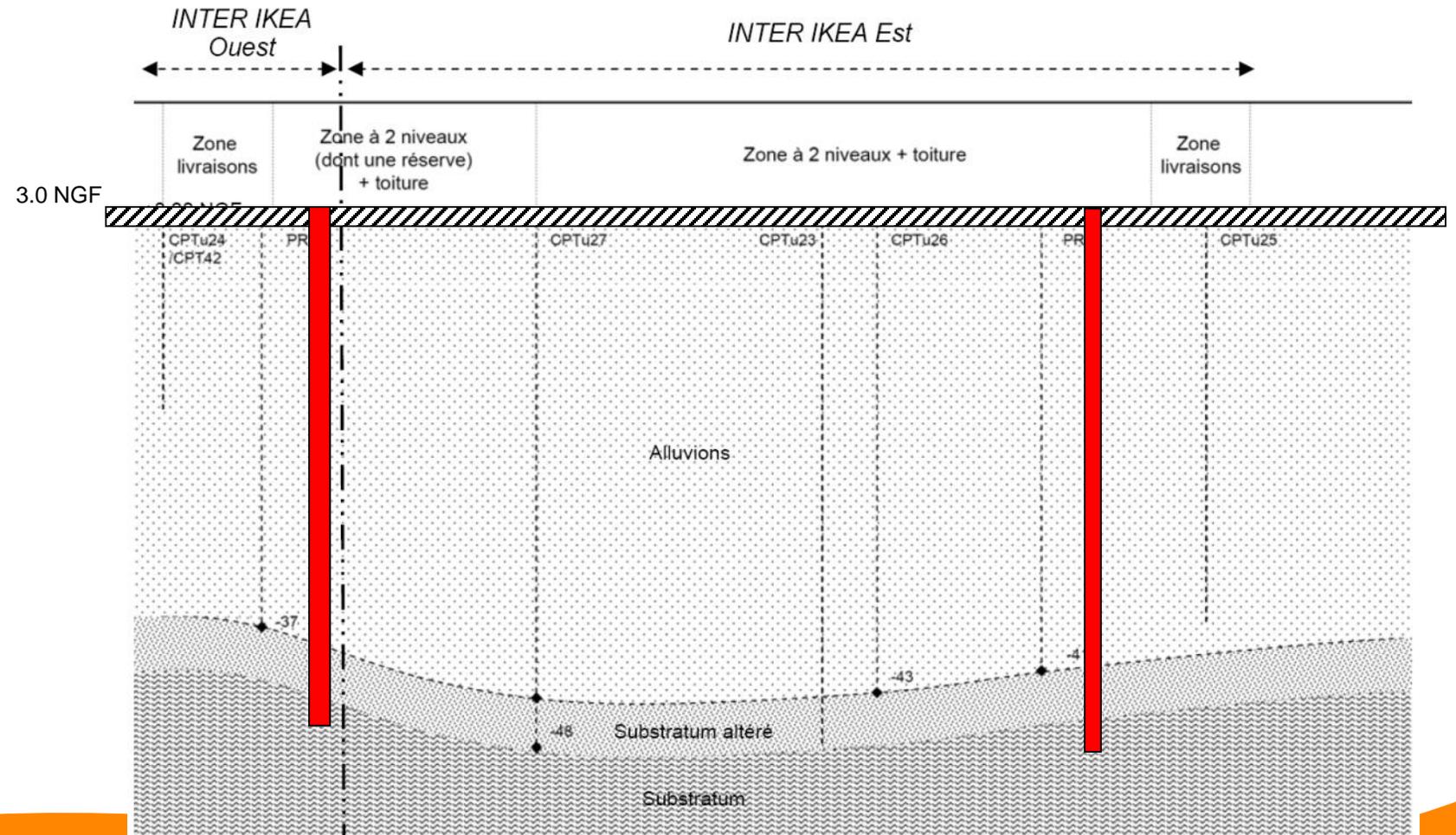


4. CONCEPTION

▣ Type de fondations et principe de dimensionnement

▣ Pieux type foré boue ancrés dans le substratum marno-calcaire

▣ Diamètres : Ø 100cm / 120cm / 140cm



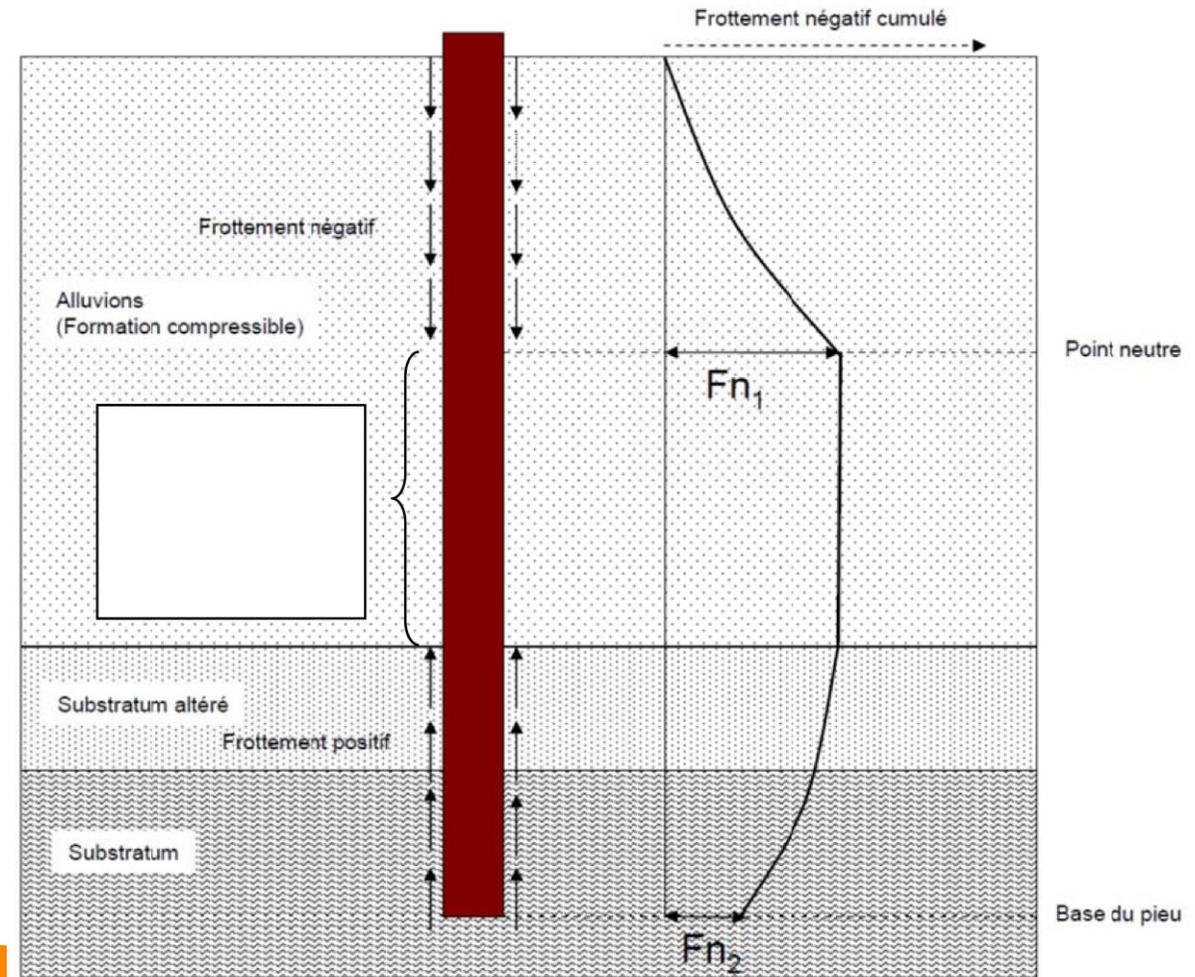
4. CONCEPTION

□ Type de fondations et principe de dimensionnement

Frottement négatif

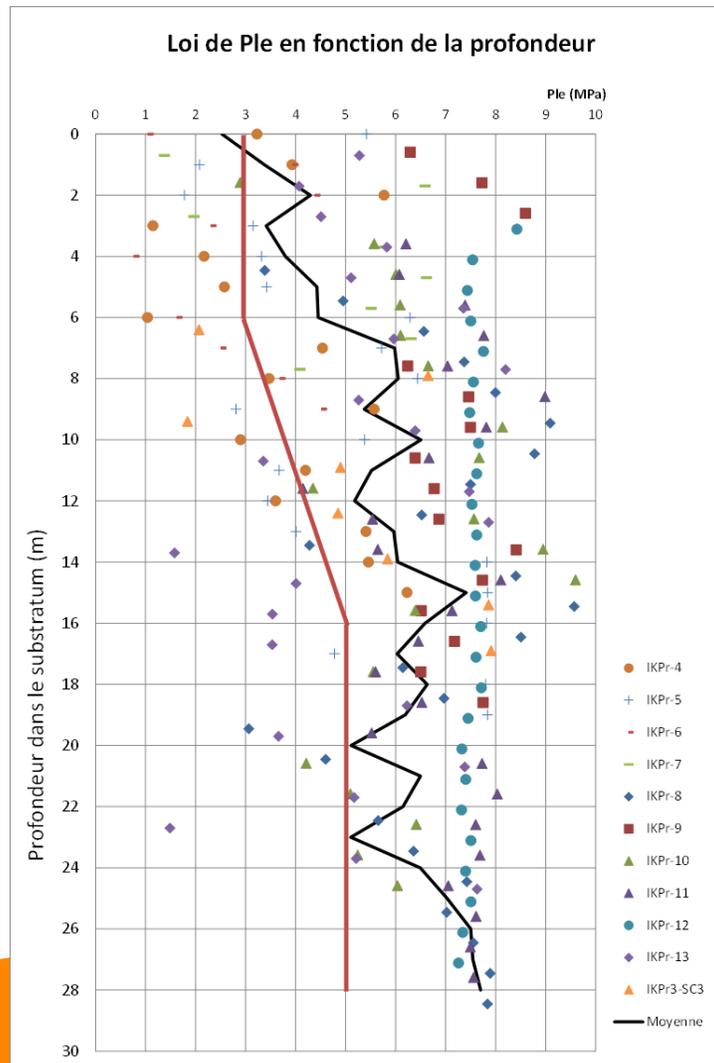
Géométrie des lentilles sableuses ?

Charges maximales liées au frottement négatif n_1 (tonnes)	Diamètre des pieux		
	100 cm	120 cm	140 cm
	37 t	54 t	75 t



4. CONCEPTION

□ Etablissement d'une loi de pression limite équivalente (Ple)



- Les essais sont calés en profondeur à partir du toit du substratum marno-calcaire,
- Le fractile à 20% permet d'établir une fourchette basse des valeurs mesurées
- Une valeur constante de Ple est retenue dans la zone d'altération
- Un accroissement linéaire de la valeur de Ple est retenu jusqu'à une valeur limite de 5 MPa.

4. CONCEPTION

■ Etablissement d'une stratigraphie type par bloc structurel

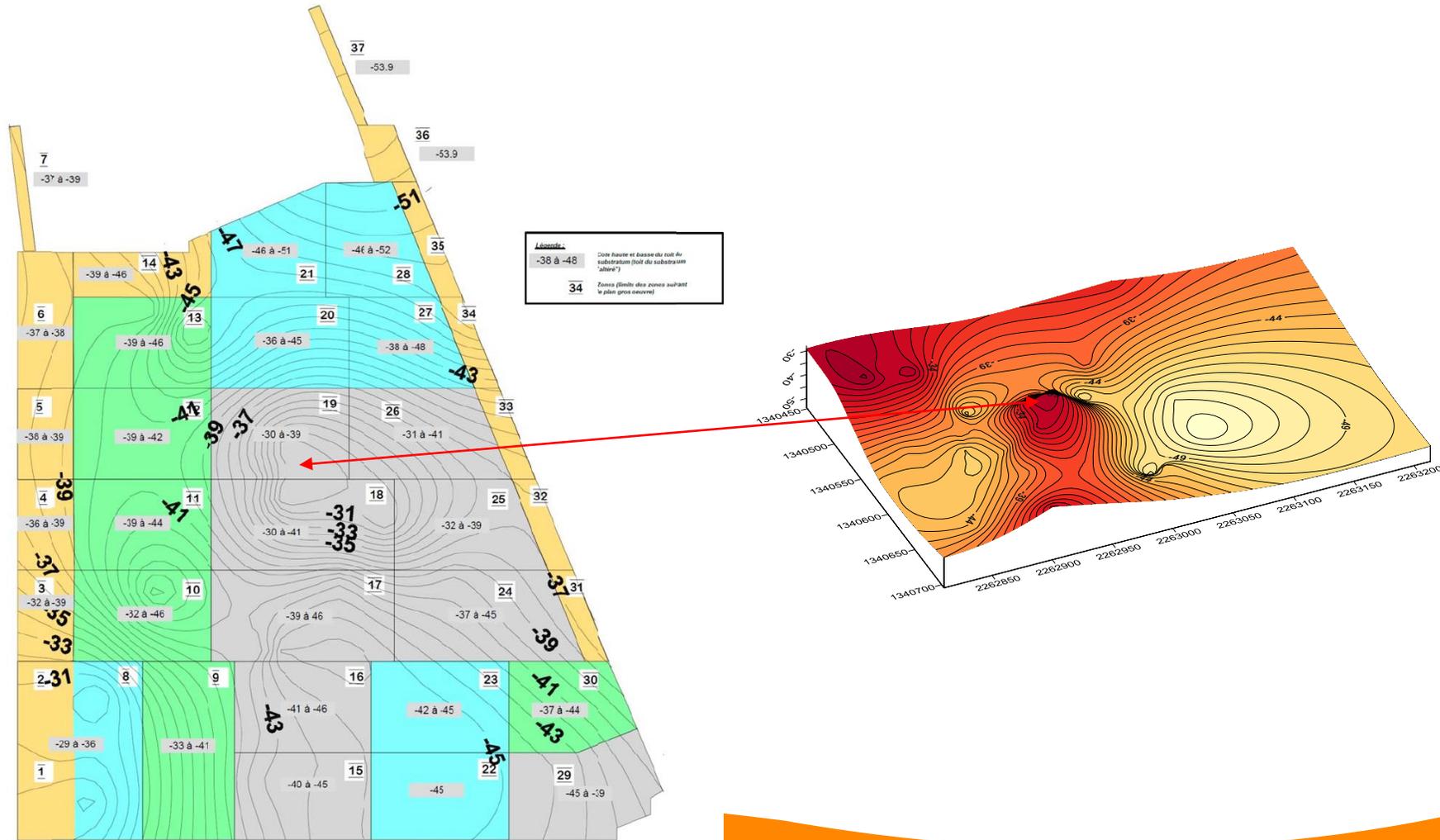


Figure 3 : Le découpage du site INTER-IKEA avec cotes haute et basse du substratum

4. CONCEPTION

Position du toit du substratum marno-calcaire

Zone	Sondages de référence	TN (NGF)	Profondeur Atteinte (NGF)	Toit du substratum (NGF)	Toit du Substratum « sain » (NGF)	GEOMETRIE DES COUPES DE CALCUL
						Toit du substratum (NGF)
1, 2, 8	(IKCPu42)	2	-20.7	<-20,7	/	-36
	CPU013	3.61	-29.1	≈-29	/	
	CPU017	1.9	-32.1	-27.6	/	
	SD07	1.66	-53.4	-31.1	-34.3	
3	(IKCPu24)	3.3	-13.2	<-13,2	/	-39
	(CPU09)	2.77	-37.0	-34.7	/	
4, 11	CPU05	2.73	-39.7	-40.0	/	-39 (zone 4)
						-44 (zone 11)
5, 12	(IKCPu34)	3.9	-20.7	<-20,7	/	-39 (zone 5)
	CPU02	2.92	-39.8	<-39,8	/	
	IKCPu29	2.6	-37.4	<-37,4	/	-42 (zone 12)
	(IKPr-5)	3.6	-58.3	-37.4	-41.4	
6, 14, 13	IKCPu33	3	-39.0	-38	/	-39 (zone 6)
	SD04	2.77	-57.6	-39.2	-42.2	-46 (zones 14,13)
	IKPr-12	3.19	-76.5	-48.7	-51.5	
7	IKCPu37	3.6	-23.6	<-23,6	/	-39
	(CPU013)	3.61	-29.1	≈-29	/	
	(CPU014)	2.75	-43.2	-41.9	/	
	(CPU017)	1.9	-32.1	-27.6	/	
9	(IKPr8)	2.64	-71.9	-42.9	/	-41
	CPU09	2.77	-37.0	-34.7	/	
	IKCPu27	3.1	-45.7	-45.4	/	
	IKPr-4	3.1	-63.8	-47	-51.9	
10	IKPr8	2.64	-71.9	-42.9	-46.9	-45
	IKCPu21	2.9	-47.2	-44.1	/	
15	CPU014	2.75	-43.2	-43.1	/	-46
	IKCPu23	2.6	-46.6	-45.4	/	
	(SD02)	2.84	-52.3	-46.2	(<-48,2)	
	IKSC3	2.6	-64.5	-47	(-48,4)	
16	CPU010	2.64	-42.7	-41.6	/	-45
	IKCPu26	2.9	-45.0	-43.1	/	
	SD02	2.84	-52.3	-46.2	(<-48,2)	

18, 19	IKCPu28	2.1	-29.4	-29.1	/	-41 (zone 18)
	CPU06	2.69	-29.1	-28.8	/	
	CPU07	2.82	-32.7	-30.2	/	
	SD05	3.06	-48.0	-34.9	-38.4	
20	IKPr11	3.1	-59.0	-30.3	-34.9	-39 (zone 19)
	CPU03bis	2.94	-43.6	-43.6	/	
	SD01	2.95	-52.1	-44.1	-46.1	
21	IKCPu32	1.7	-34.0	<-34	/	-45
	(CPU01)	3.03	-50.5	-49.0	/	
22, 23	(IKCPu32)	1.7	-34.0	<-34	/	-51
	CPU015	2.88	-45.9	-45.6	/	
24, 25, 31, 32	SD03	2.76	-58.0	-45.7	<-48,2	-45
	CPU011	2.36	-44.5	-42.1	/	
	CPU08	2.32	-37.2	<-36,8	/	
	IKCPu25	2.3	-36.6	<-36,6	/	
	IKPr-9	2.4	-63.6	-40	-44.6	
	IKPr-10	2.4	-66.2	-40	-44.6	
	IKPz2					
26, 33	SD06	2.47	-43.2	-36.7	-48.5	-42
27, 34	CPU04	1.77	-38.8	-37.4	/	-48
	IKPr-6	1.8	-65.8	-51	-55.2	
28, 35	IKPr-13	1.28	-75.4	-50	-50	-51 (zone 28), -50 (zone 35)
29, 30	IKCPu20	2.4	-44.6	-43.6	/	-45 (zone 29)
	CPU016	2.21	-39.3	-38.8	/	
36	IKCPu35	1.6	-54.8	-53.9	/	-53.9
37	IKCPU38	3.3	-25.9	<-25,9	/	-53.9

4. CONCEPTION

→ QUANTITATIF

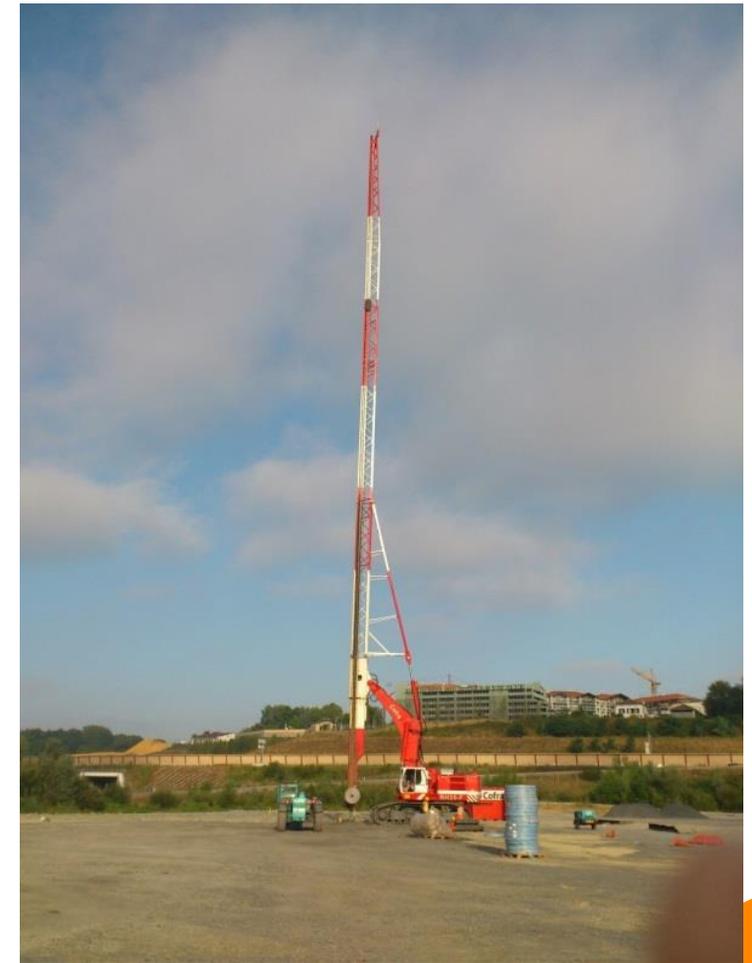
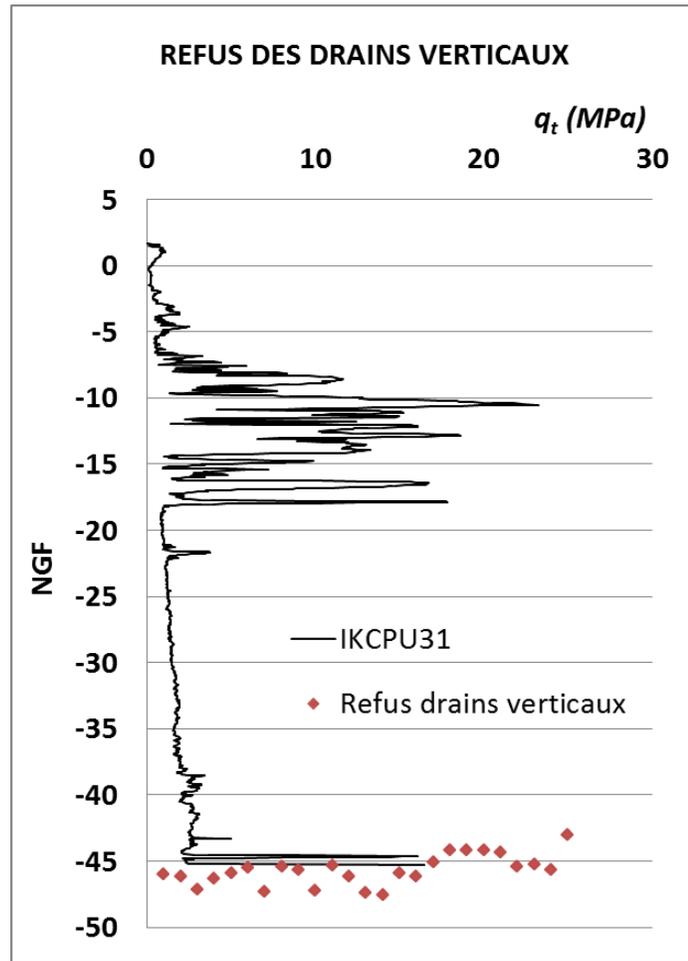
	IKEA		INTER-IKEA	
	U	ml	U	ml
∅ 100 cm	139	6 500	384	21 100
∅ 120 cm	140	6 650	114	6 800
∅ 140 cm	70	3 600	89	5 600
TOTAL	349	16 750	587	33 500

5. CONFRONTATION AVEC L'EXECUTION

- Préchargement & consolidation
- Pieux

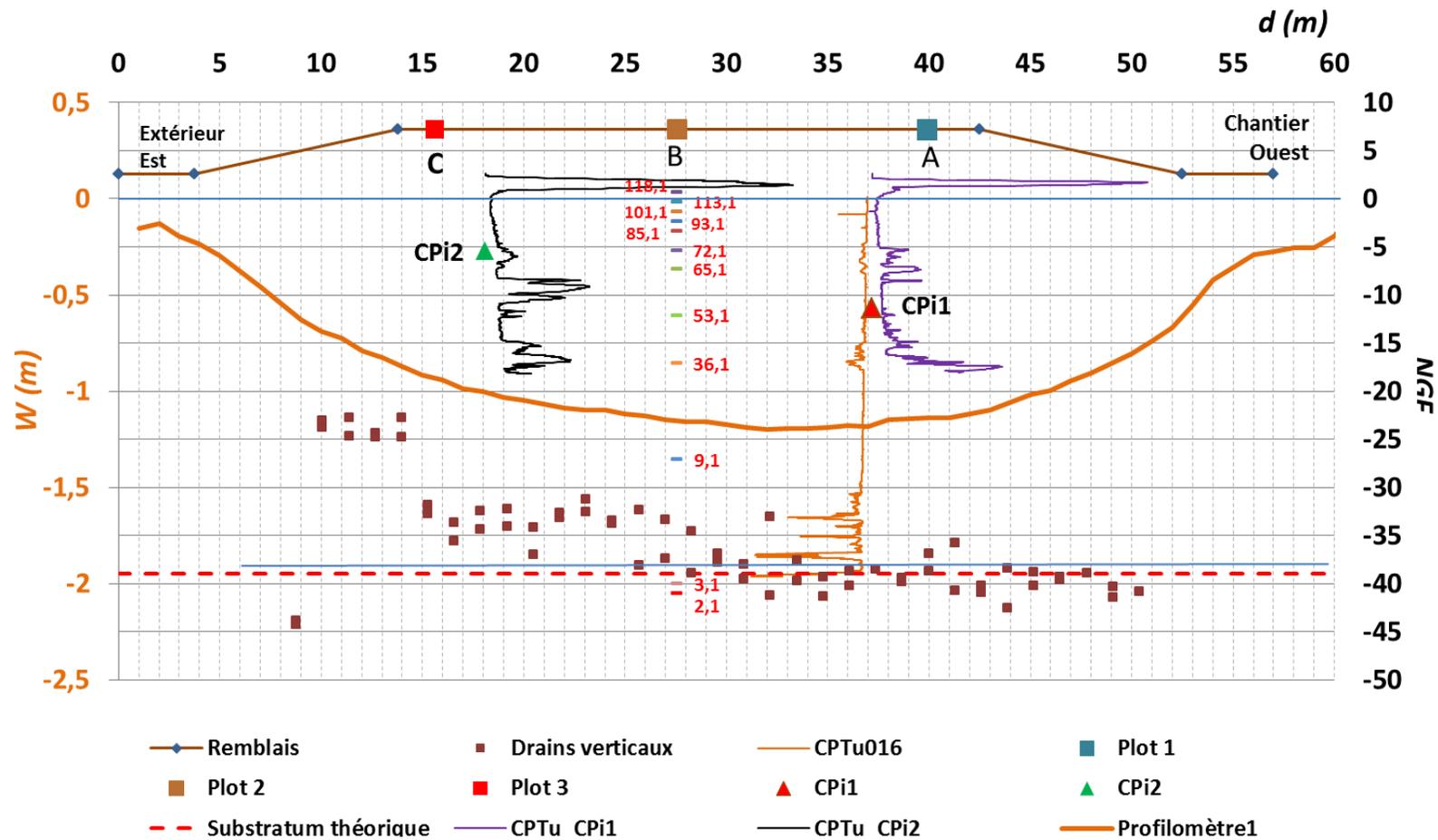
5. CONFRONTATION AVEC L'EXECUTION

→ Préchargement : adéquation refus des drains verticaux / profondeur du substratum



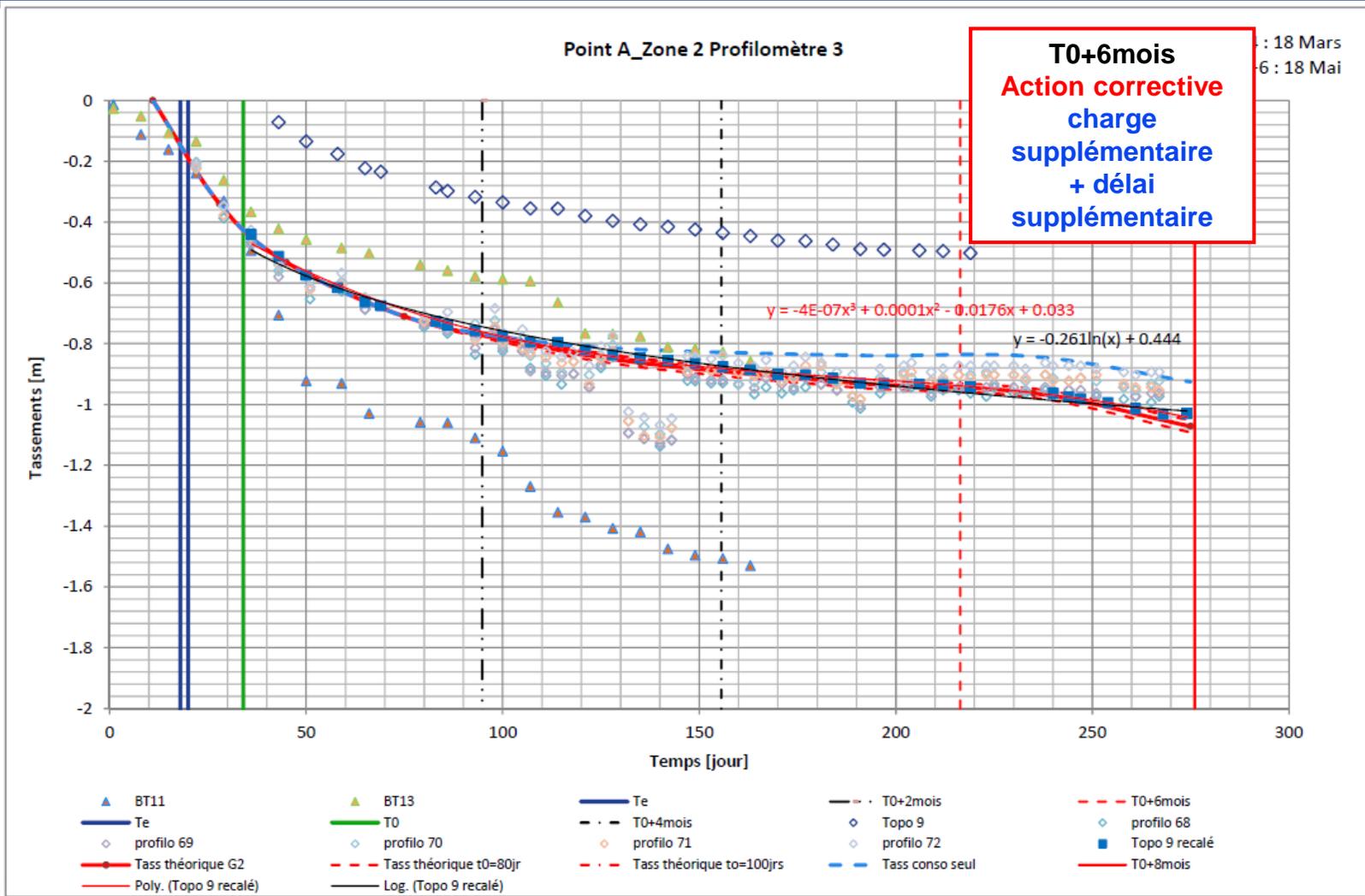
5. CONFRONTATION AVEC L'EXECUTION

→ Préchargement : Profil de tassement et géométrie du substratum



5. CONFRONTATION AVEC L'EXECUTION

→ Préchargement : Recalage et action corrective

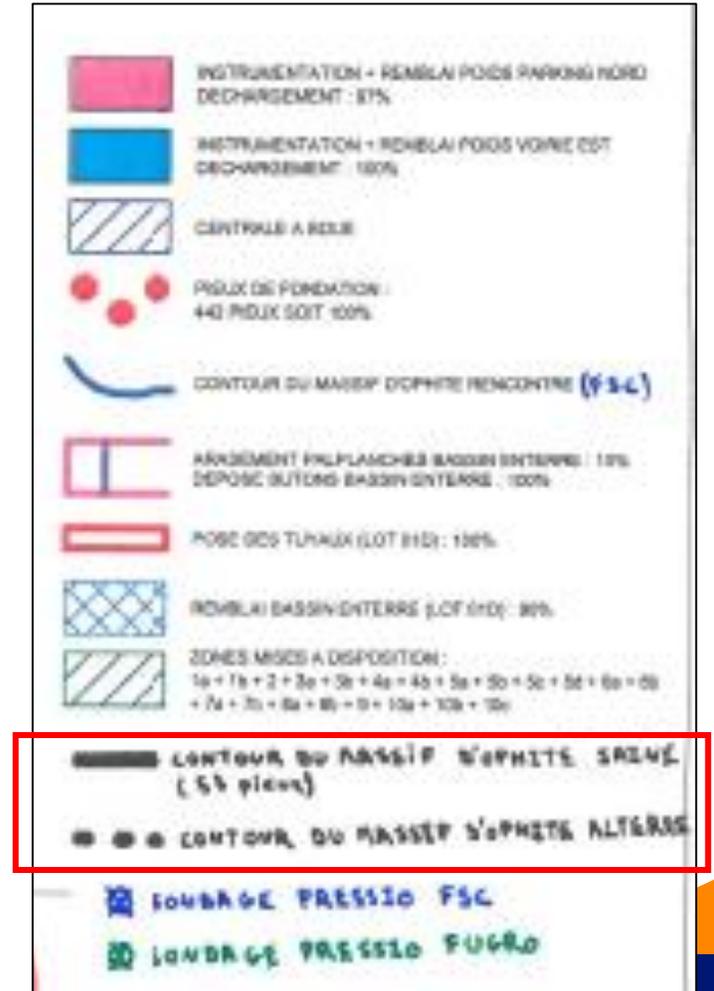
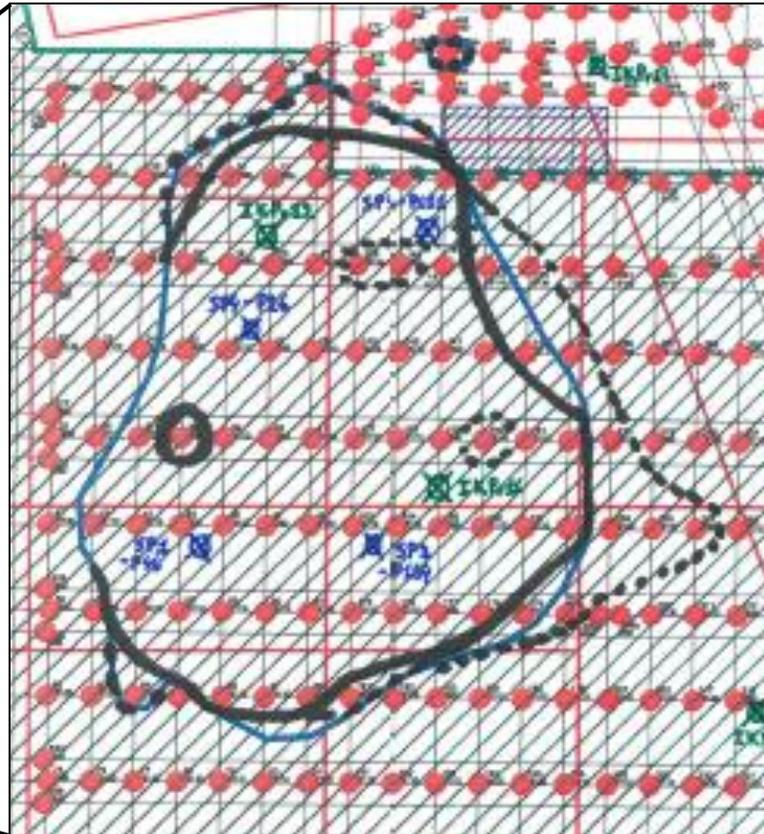
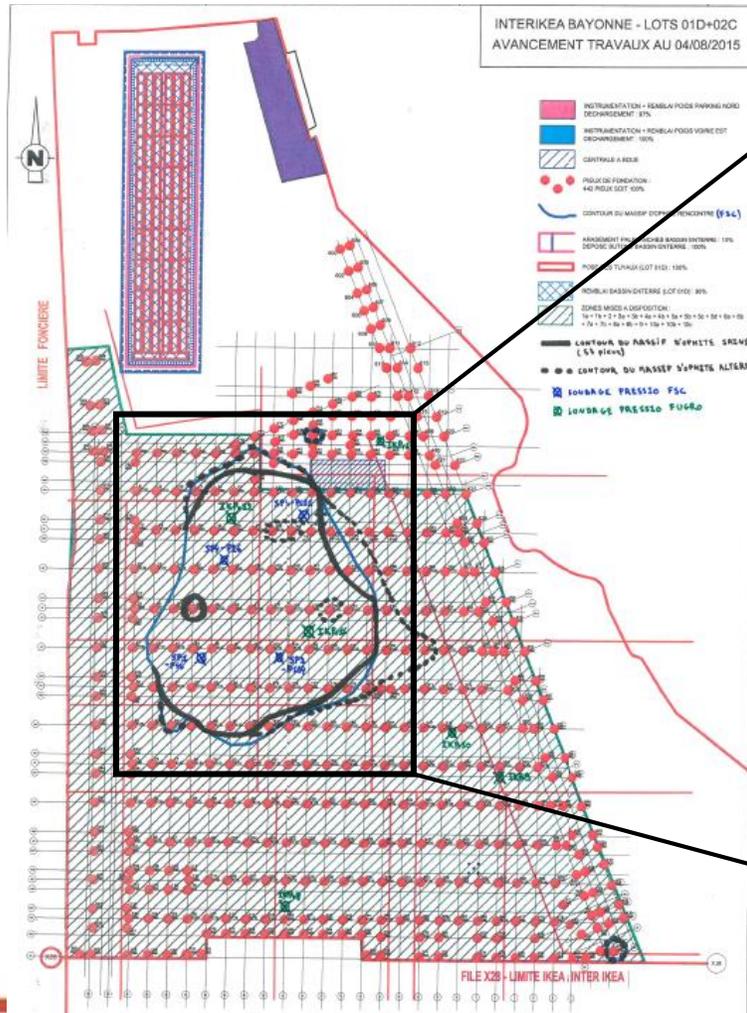


Résultats	préchargement		
temps	U	wc	W moyen
MOIS	%	cm	cm
0	0,0	0,0	0,0
0,6	40,4	34,1	34,1
1,2	63,1	53,3	53,3
2,2	84,2	71,0	71,0
3,2	93,2	78,6	79,8
4,2	97,1	81,9	86,3
6,0	99,4	83,9	93,0
7,5	99,8	84,2	96,3
8,8	99,9	84,3	107,2

temps	W moyen
MOIS	cm
0,0	0,0
0	0,0
12	0,0
18	0,0
24	0,1
36	1,1
48	2,5
60	3,9
80	5,9
120	9,2

5. CONFRONTATION AVEC L'EXECUTION

→ Aléa sur le modèle du substratum (nature, dureté, abrasivité,...)



5. CONFRONTATION AVEC L'EXECUTION

→ Comparaison avec les quantités réellement exécutées

		Marché (G2 Fugro)	réalisé selon FSC (G3 FSC)	Différence G2-G3 FSC
TOUS PIEUX	nb pieux	449	442	7
	longueur pieux totale (ml)	26 621	25 591	1 030
diam 100 ou équivalent (90cm exécuté par FSC)	nb pieux	288	254	/
	Long. (ml)	16 616	14 231	2 385
diam 120 ou équivalent (110cm exécuté par FSC)	nb pieux	136	160	/
	Long. (ml)	8 445	9 611	-1 166
diam 140 ou équivalent (130cm exécuté par FSC)	nb pieux	25	29	/
	Long. (ml)	1 560	1 750	-190

6. CONCLUSION

1. Avantages des modélisations

- Permet de vérifier la cohérence du modèle (géométrie des formations, épaisseur d'altération),
- Permet d'établir un zonage / bloc structurel avec les méthodes d'extrapolation proposées,
- Permet d'établir des profils types pour le dimensionnement avec :
 - Des niveaux d'encastrement optimisés,
 - Une estimation du frottement négatif par diamètre et par zone,
 - Possibilité d'affiner le zonage par la réalisation de nouveaux sondages.

2. Points importants

- Il faut un nombre de sondages suffisant et régulier,
- Il est nécessaire d'apporter des corrections en limite du modèle (voir imposer les limites).