



Construire dans l'argile : Regard croisé Franco-Belge

Construction d'une installation à enjeux sur l'Argile de Flandres :
Démarche de caractérisation et retours d'expérience



JST DU 17/03/2026

Cyril Simon (EDF) & Fahd Caira (Terrasol)

Sommaire

- Contexte
- Campagne de reconnaissance
- REX sur ouvrages existants
- Perspectives

Sommaire

- Contexte
- Campagne de reconnaissance
- REX sur ouvrages existants
- Perspectives

Contexte

- 2022, décision du gouvernement de construire 3 paires de tranches EPR2 en France, dont une à Gravelines à proximité de 6 tranches 900 MW existantes
- Des ouvrages lourds et étendus, nécessitant une bonne caractérisation géotechnique des formations géologiques en présence, notamment en terme de déformabilité



Contexte

- La qualité de la caractérisation des terrains et notamment de l'argile des Flandres, passe par le croisement de différentes sources d'information
 - ⇒ La connaissance historique des terrains de fondations des tranches 900 MW
 - ⇒ Une campagne de reconnaissance géotechnique dédiée sur le site EPR2
 - ⇒ Le retour d'expérience des tassements mesurés sous les tranches 900 MW et d'autres installations à proximité
 - ⇒ Une comparaison avec les données géotechniques et retours d'expériences d'ouvrages fondés sur l'argile de Londres
- Caractéristiques cibles
 - ⇒ Le taux de surconsolidation
 - ⇒ Le module de déformation
 - ⇒ Le coefficient de consolidation
 - ⇒ La résistance au cisaillement

Sommaire

- Contexte
- Campagne de reconnaissance
- REX sur ouvrages existants
- Perspectives

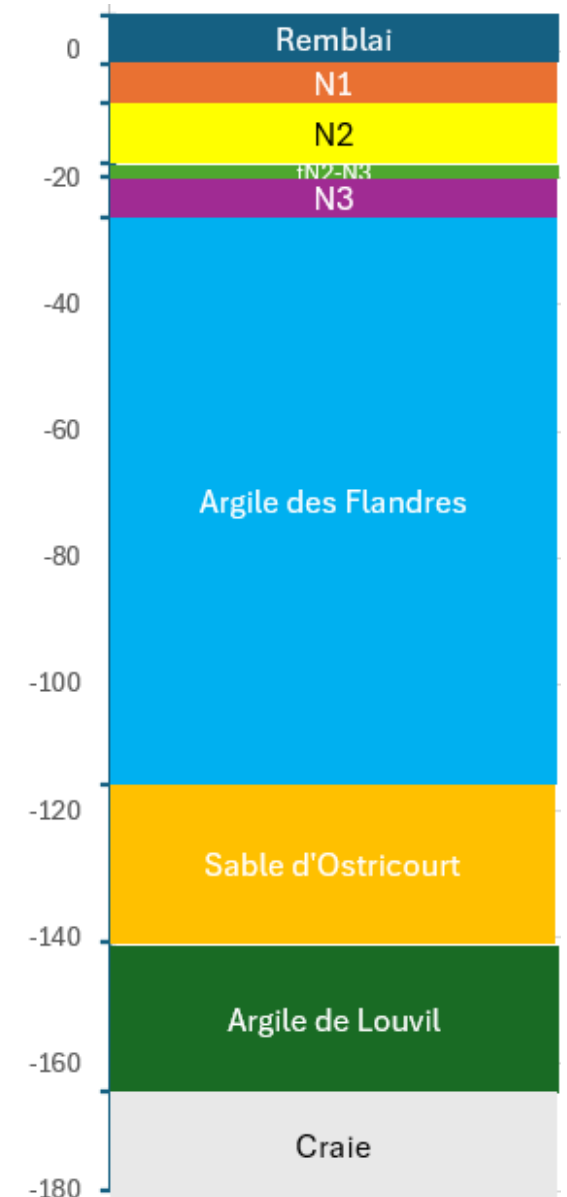
La campagne de reconnaissance

- 10 sondages carottés (de 60m à 200m de longueur)
- 5 piézomètres
- 65 sondages CPT-u et CPT-s (40m de profondeur en moyenne, et jusqu'à 60m)
- 262 essais pressiométriques sur 9 sondages (de 60m à 100m)
- Des essais géophysiques en forage :
 - ⇒ 2 essais cross-hole conventionnel (40m), 1 essai down-hole en ondes P et S associé à un des forages du cross-hole, 1 essai down-hole en onde P dans le sondage carotté de 200m, des acquisitions PSSL dans les sondages carottés profonds (120 et 200m)
 - ⇒ Diagraphies gamma ray
- Des essais en laboratoire :
 - ⇒ Triaxiaux, oedométriques, essais cycliques
 - ⇒ Avec des difficultés liées à la nature gonflante et fissurée de l'argile



La campagne de reconnaissance

- La colonne stratigraphique reconnue par le sondage carotté de 200 m
 - ⇒ Terrain naturel à +5.50 m NGFn
 - ⇒ Environ 31 m de sables quaternaires (N1 à N3), entrecoupés d'une passée argilo-limoneuse d'environ 2 m d'épaisseur
 - ⇒ 90 m d'Argile des Flandres
 - ⇒ Puis une alternance de Sables et d'Argiles
 - ⇒ La craie du Sénonien est atteinte à -164.50 m NGFn



La campagne de reconnaissance

- Rapport de surconsolidation
 - Essais oedométriques
 - ▲ Valeurs proposées par Josseaume (pour les 10-20 premiers mètres)
 - Corrélations avec essais CPT (Mayne 1991)

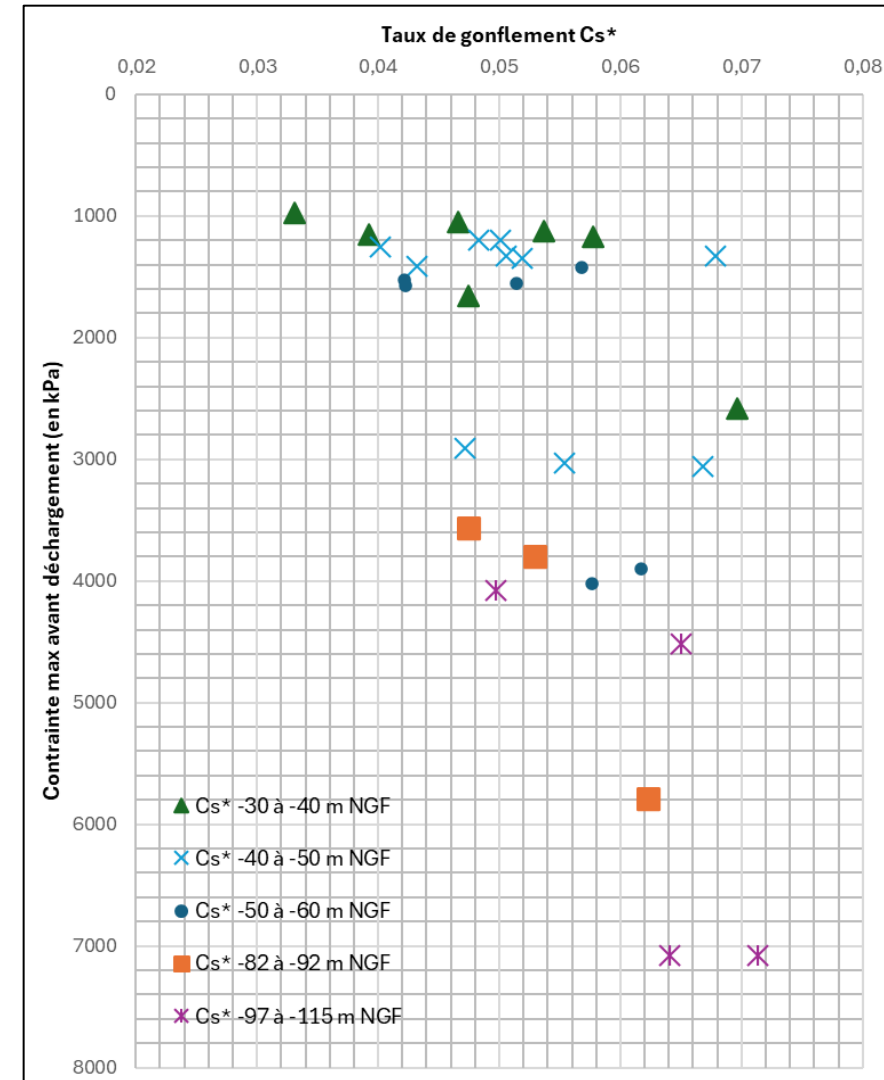
Correspond à un POP de l'ordre de 2200 à 2500 kPa



La campagne de reconnaissance

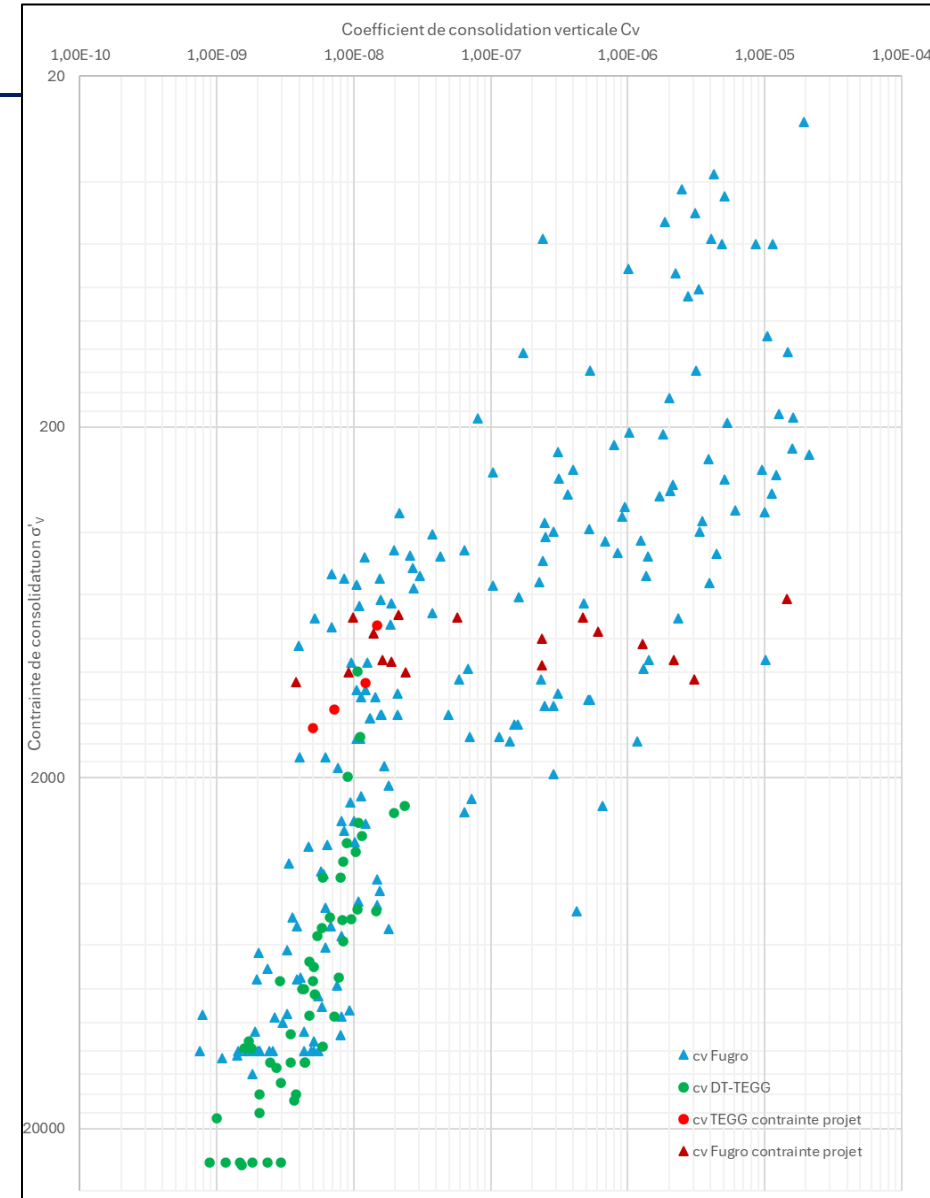
- Coefficient de compressibilité $Cs^* = Cs/(1+e_0)$
 - ⇒ Mesurés sur les boucles de déchargement/rechargement des essais oedométriques
 - ⇒ Dispersion des mesures entre 0,03 et 0,07
 - ⇒ La pente de la boucle dépend de la charge atteinte avant déchargement
 - ⇒ Ces valeurs sont surestimées (modules sous-estimés) par comparaison aux modules issus par corrélation avec des essais pressiométriques, pénétrométriques, de résistance au cisaillement
 - ⇒ La représentativité des mesures de compressibilité des argiles en laboratoire est réduite par les difficultés de prélèvement et par la gamme de déformation des essais.
 - ⇒ La comparaison avec l'analyse des tassements d'installations existantes est primordiale.

⚠ *Ce graphique n'est pas exprimé en fonction de la profondeur*



La campagne de reconnaissance

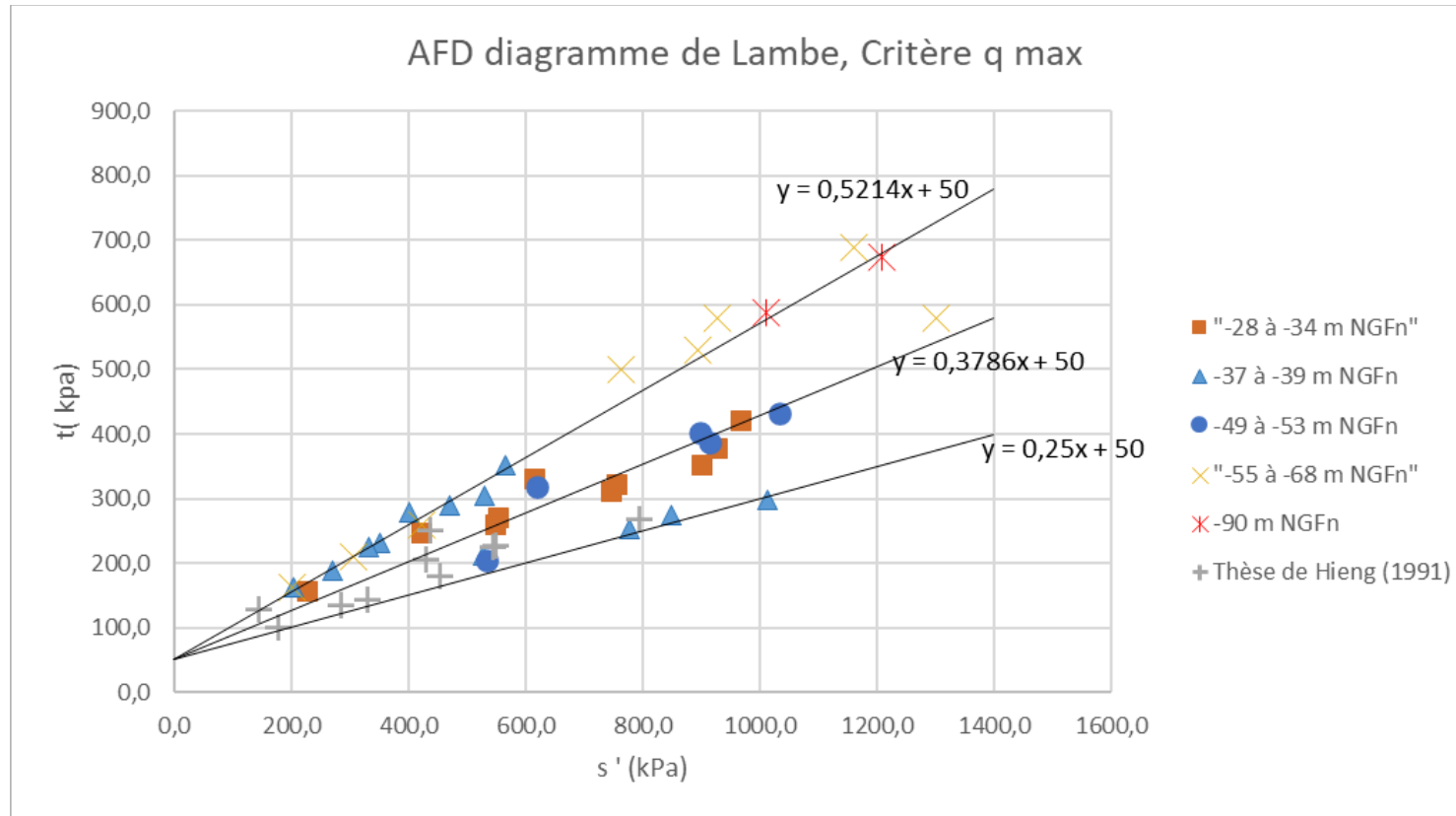
- Coefficient de consolidation verticale C_v
 - ⇒ Issus des essais oedométriques à différents paliers de chargement
 - ⇒ Diminution nette de C_v avec la contrainte
 - ⇒ Forte dispersion à faible contrainte (incluant la gamme de contraintes apportée par le projet)
 - ⇒ Les essais de dissipation au CPTu donnent les mêmes ordres de grandeur
 - ⇒ Ces mesures à petites échelles ne rendent pas compte de l'état de fissuration du massif.



Ce graphique n'est pas exprimé en fonction de la profondeur

La campagne de reconnaissance

- Résistance au cisaillement drainée
 - ⇒ Essais triaxiaux CU+u, 37 éprouvettes testées plus 9 éprouvettes de la thèse de Hieng

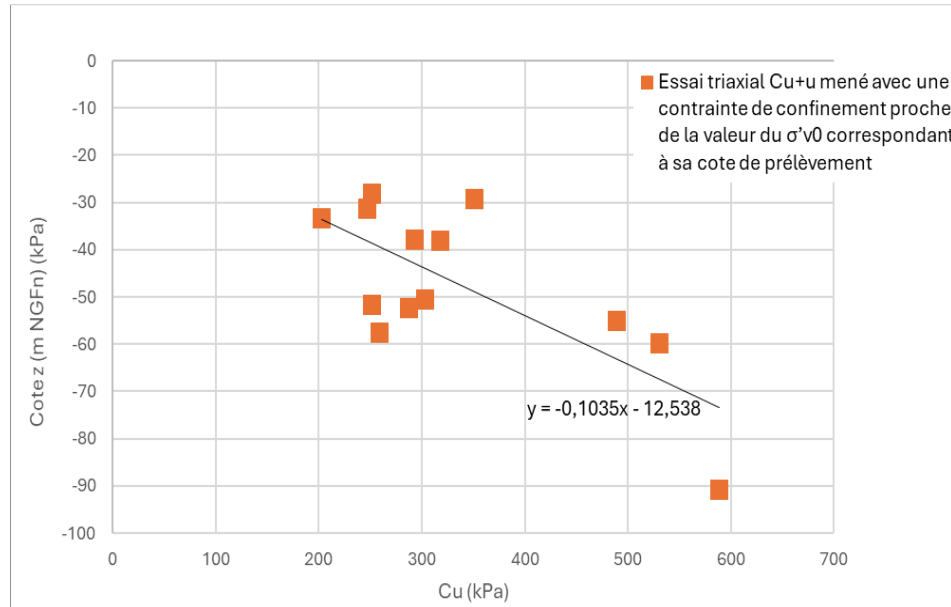


Donne en moyenne $c' \approx 55 \text{ kPa}$ $\varphi' \approx 23 \text{ à } 27^\circ$

La campagne de reconnaissance

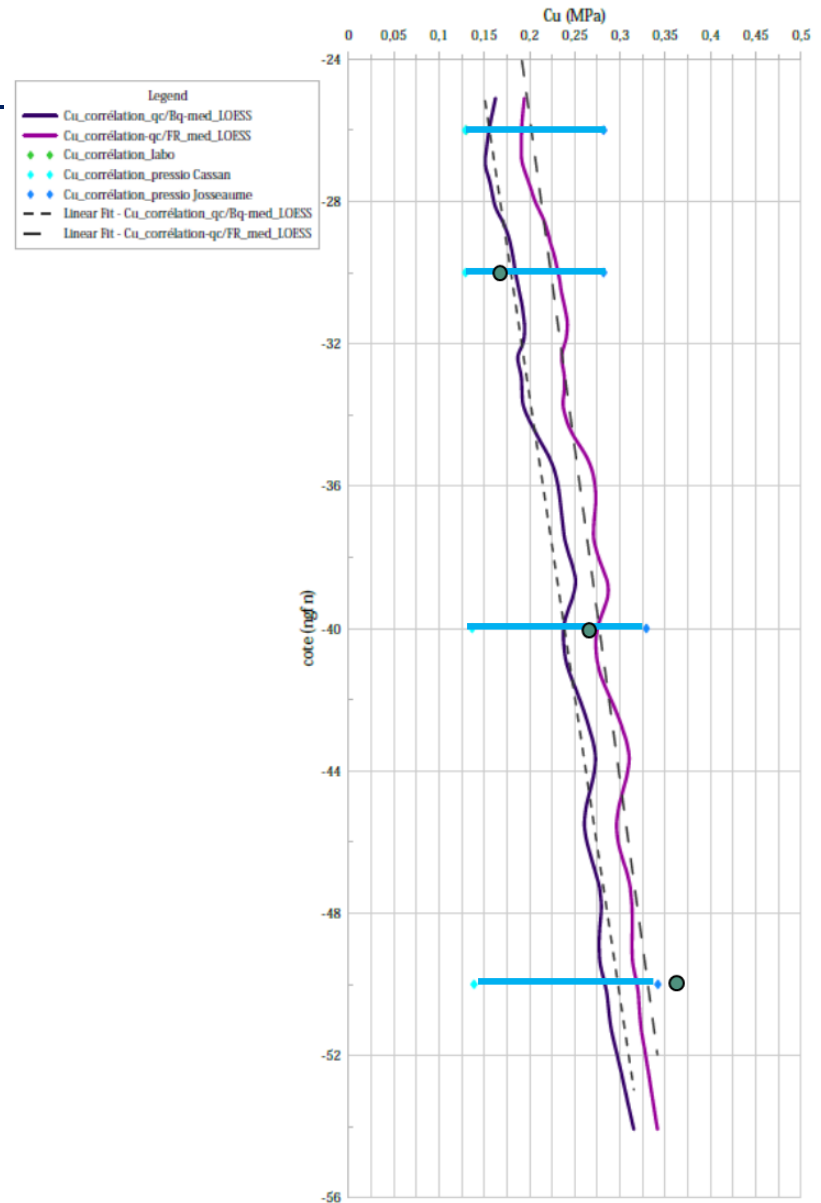
- Résistance au cisaillement non-drainée

- ⇒ Essais triaxiaux CU+u



- ⇒ Corrélations avec les essais in situ

- Cassan (PMT) : $Cu = pl^*/35 + 85$ kPa
- Josseaume (PMT) : $Cu = pl^*/5,5$
- Robertson 2012 (CPT)
- Mayne et Peuchen 2022 (CPT)

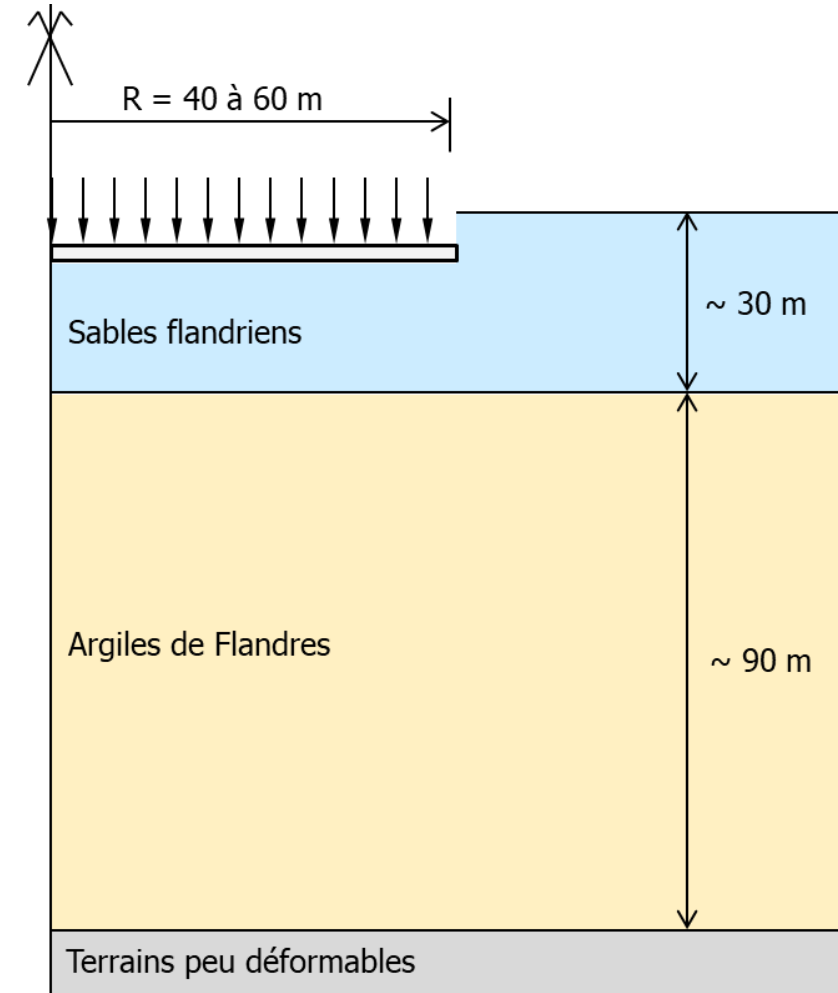


Sommaire

- Contexte
- Campagne de reconnaissance
- **REX sur ouvrages existants**
- Perspectives

Cadre général

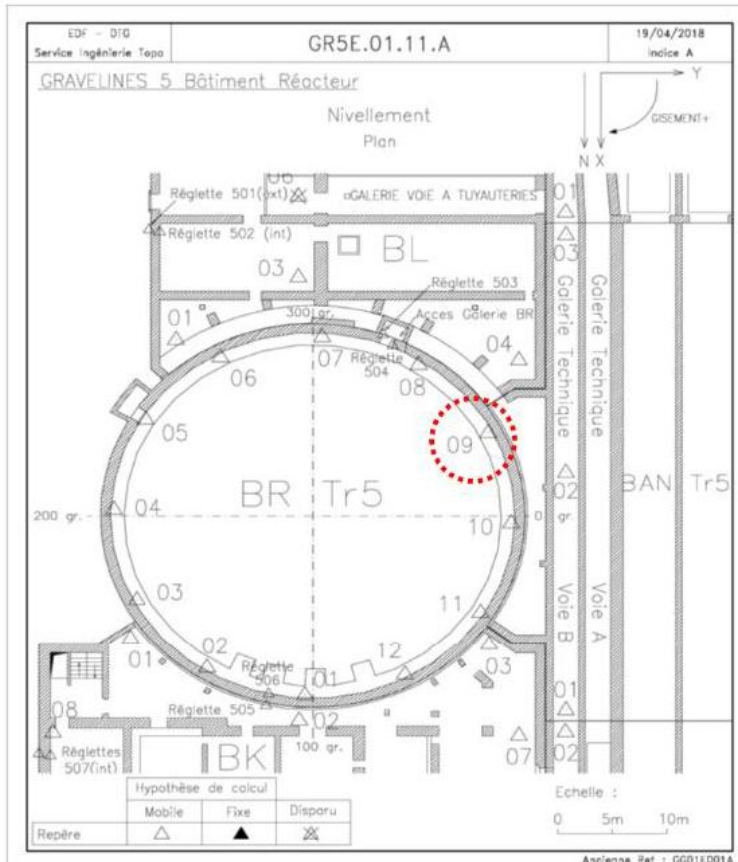
- Travail dans le domaine surconsolidé
 - ⇒ On peut parler d'élasticité (non-linéaire) et de module(s)
 - ⇒ Déformation généralement de quelques millièmes
 - ⇒ « Consolidation » (relativement) rapide $c_v \# E(\varepsilon) \times k_v / \gamma_w$
- Forte épaisseur
 - ⇒ Les tassements peuvent être importants
 - ⇒ Chargement hors domaine oedométrique
 - ⇒ Une part importante du tassement se produit à volume constant
- Une superstructure avec un fort taux de rigidité relative
 - ⇒ Comportement sensible aux effets d'interaction sol-structure
 - ⇒ La rigidité du terrain a un impact sur la demande de ferrailage
 - ⇒ La maîtrise des tassements, cumulés, est fondamentale



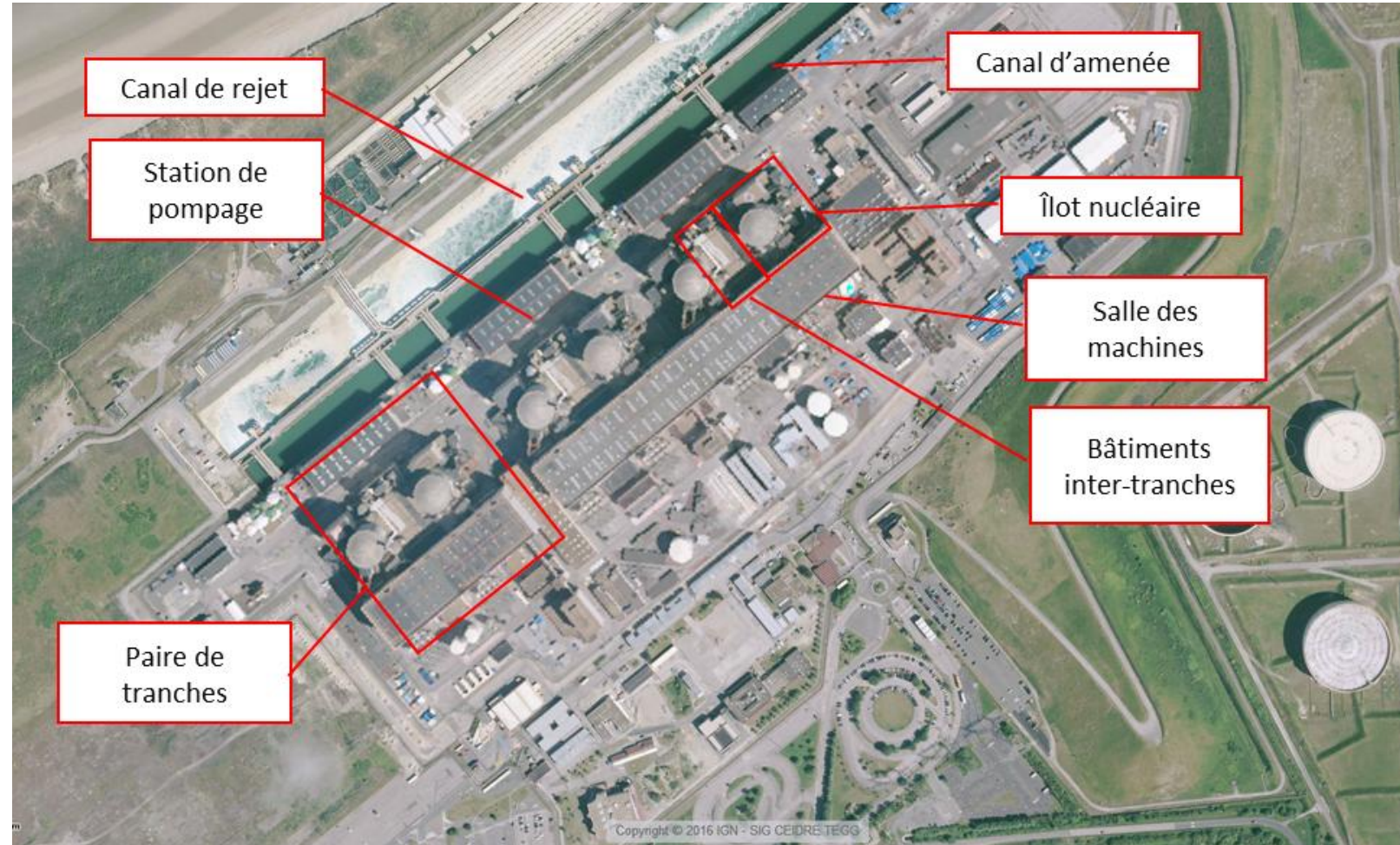
REX CNPE 900 MW

- Six îlots nucléaires 900 MW fondés sur radier général

$$\Delta\sigma_{\text{moy,nette}} \sim 250 \text{ kPa}$$

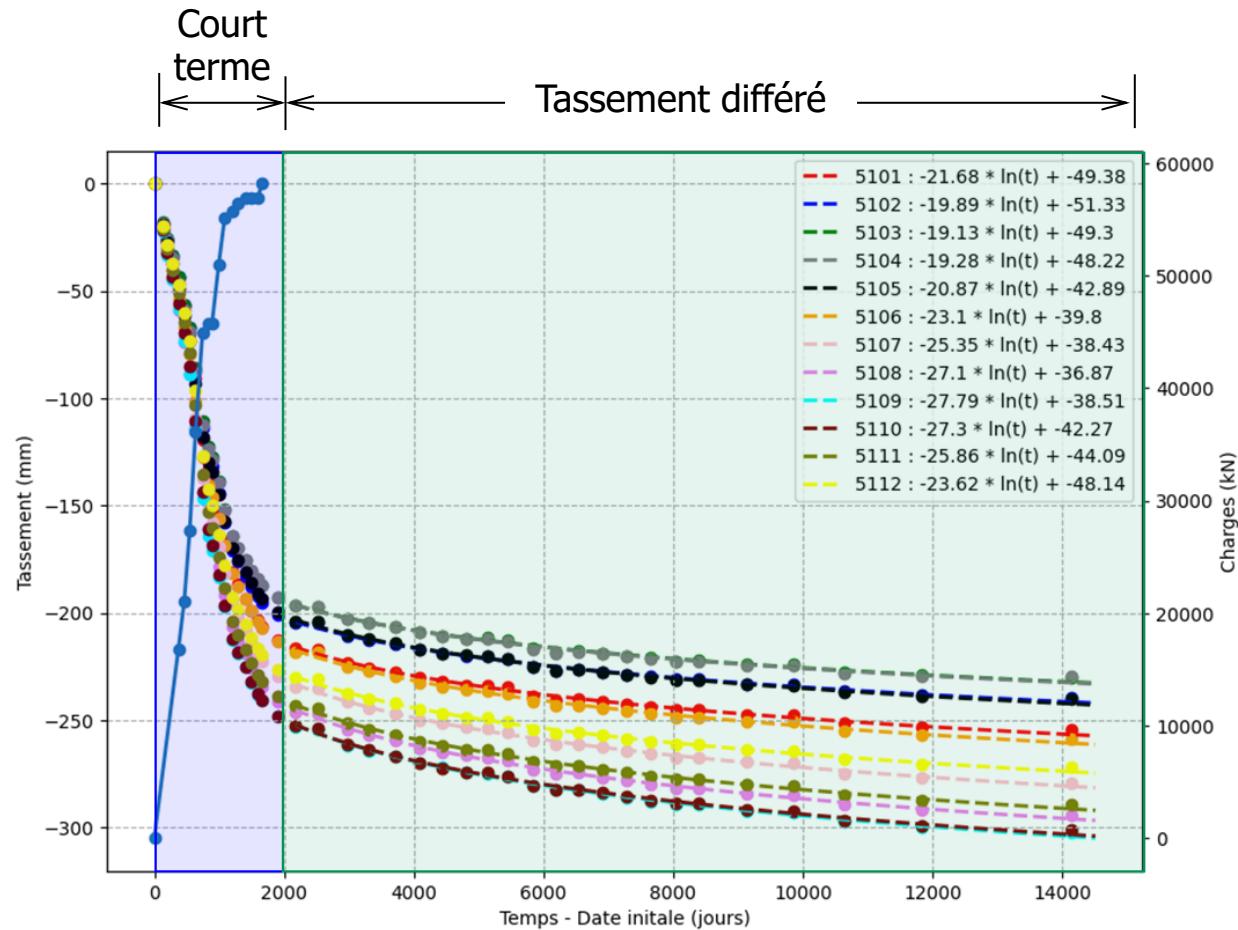


Suivi des tassements en différents points sous l'installation



REX CNPE 900 MW

- Suivi multi-points des tassements sur 30 à 40 ans



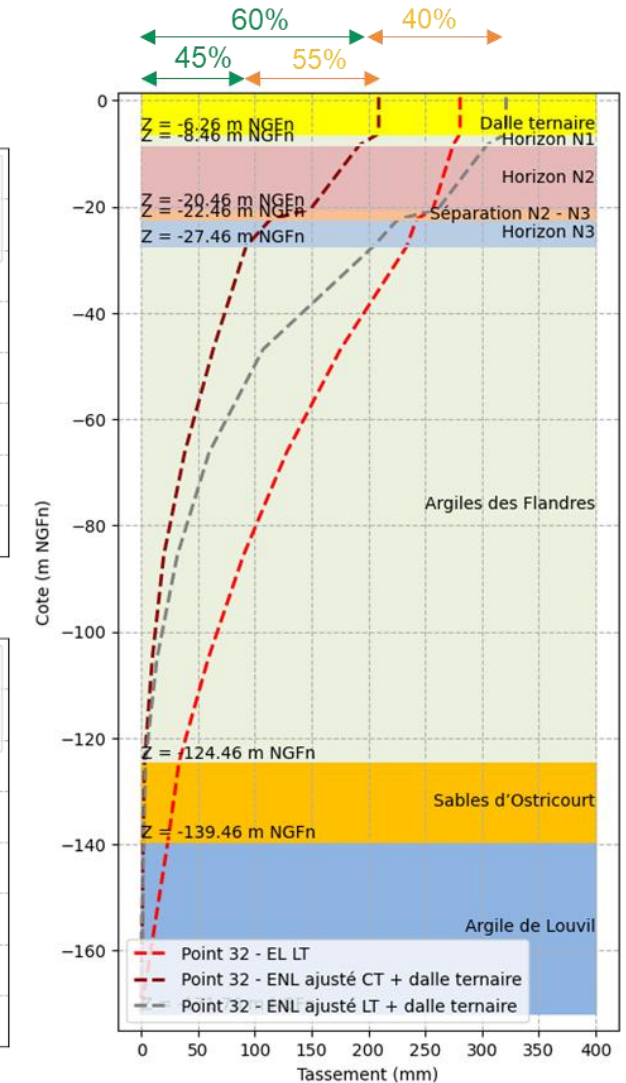
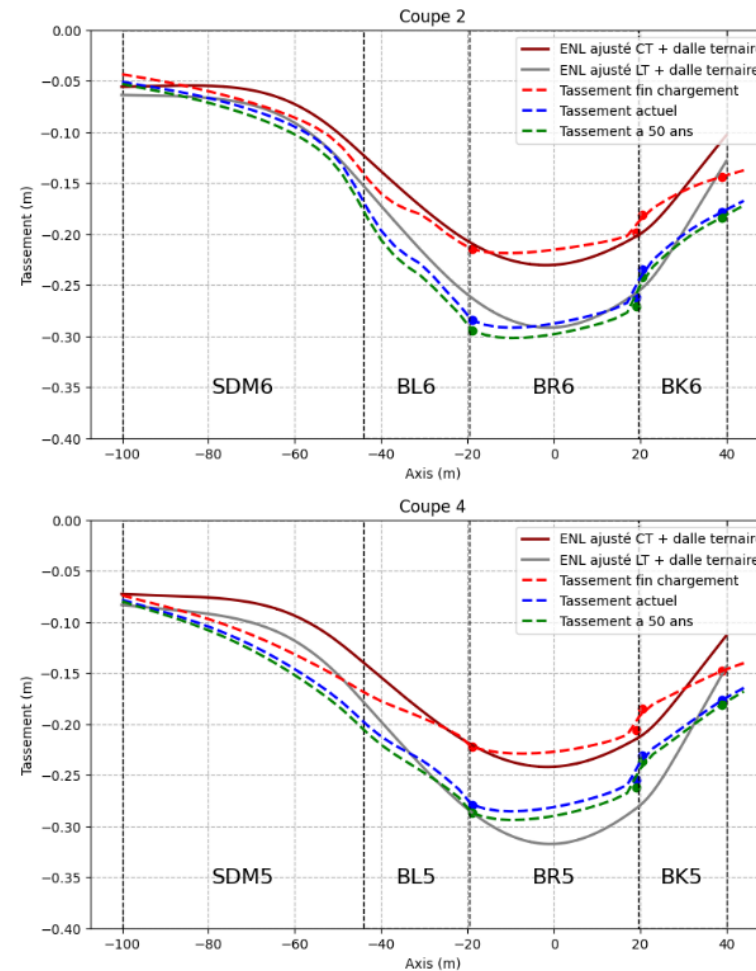
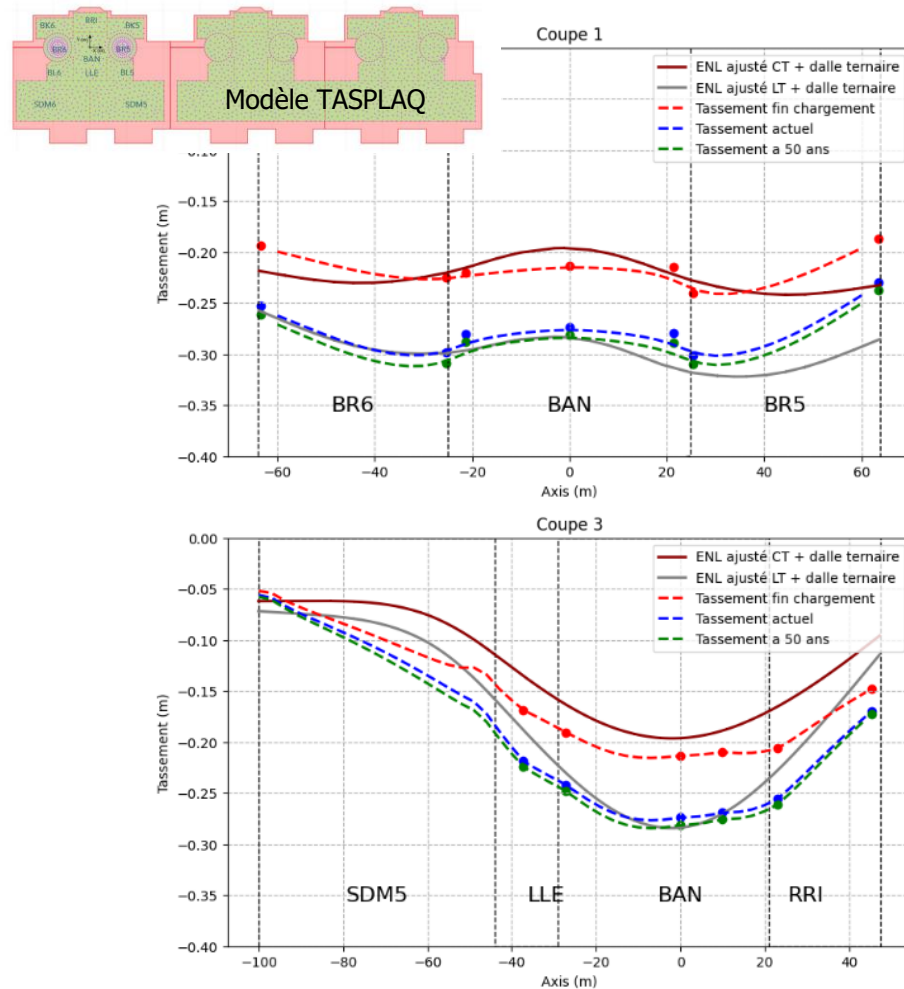
	Court terme (5 – 6 ans)	Long terme (35 – 40 ans)	Différé (Delta)
BR1	23 cm	29 cm	6 cm
BR2	16 cm	22 cm	6 cm
BR3	20 cm	25 cm	5 cm
BR4	15 cm	21 cm	6 cm
BR5	21 cm	27 cm	6 cm
BR6	22 cm	28 cm	6 cm

Vitesse des tassements

- ⇒ Moyenne sur 30 ans 1,5 à 2,0 mm/an
- ⇒ Actuelle 0,5 à 1,0 mm/an

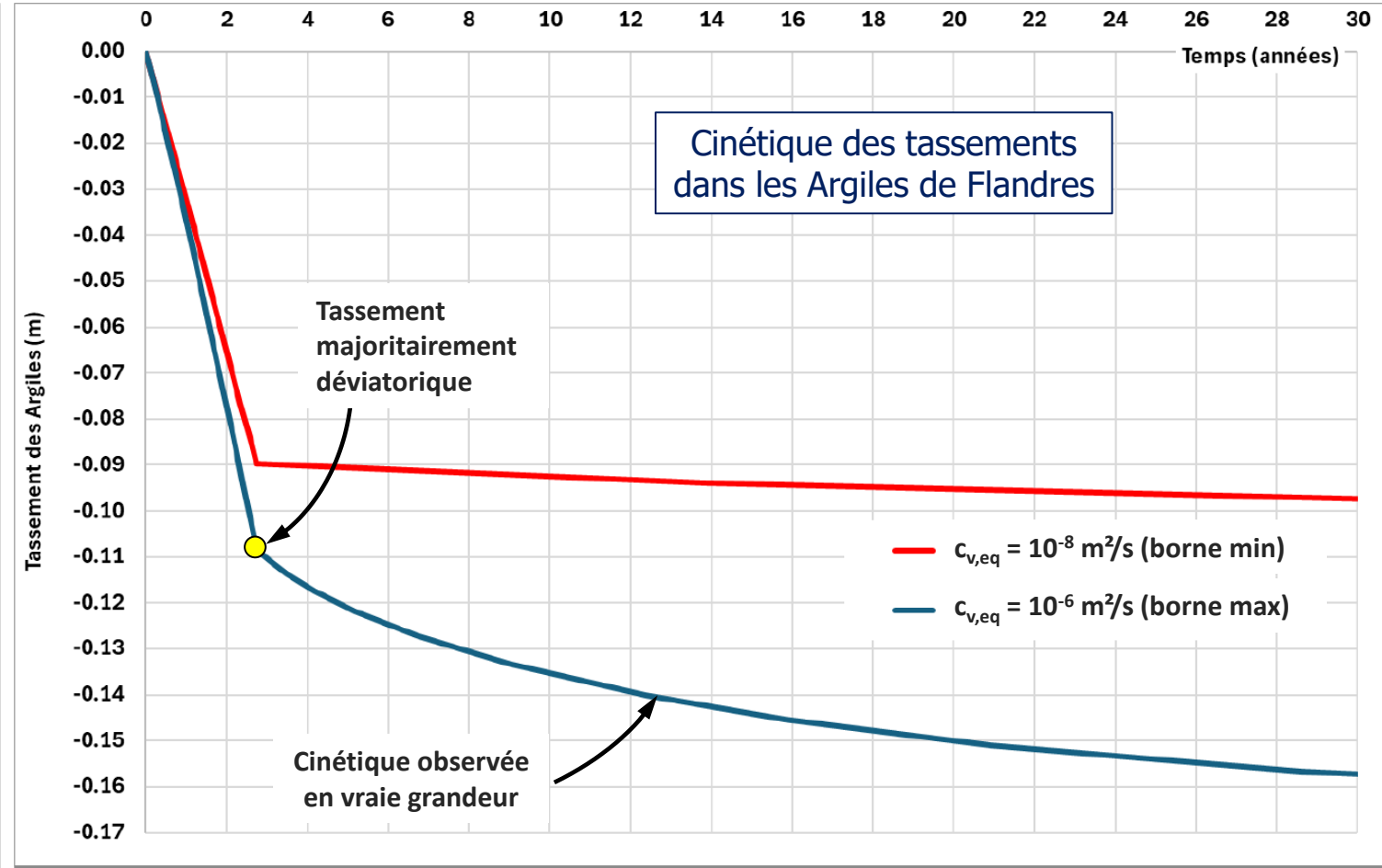
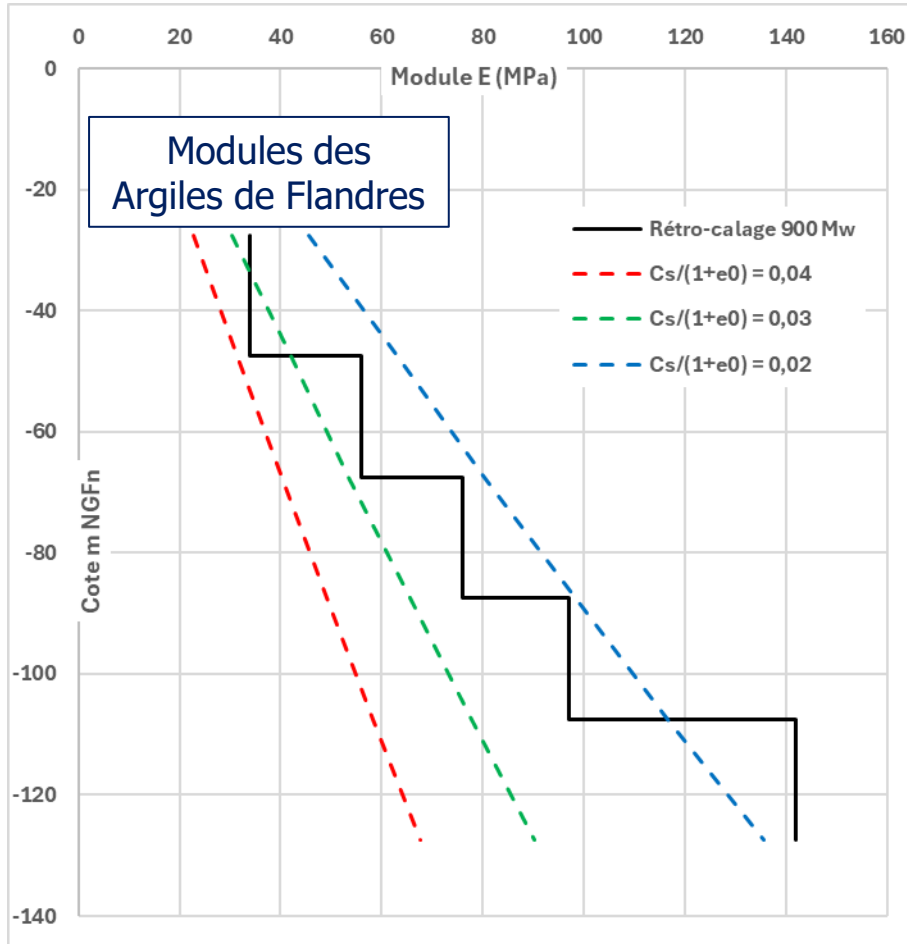
REX CNPE 900 MW

- Rétro-calage d'un modèle élastique non-linéaire



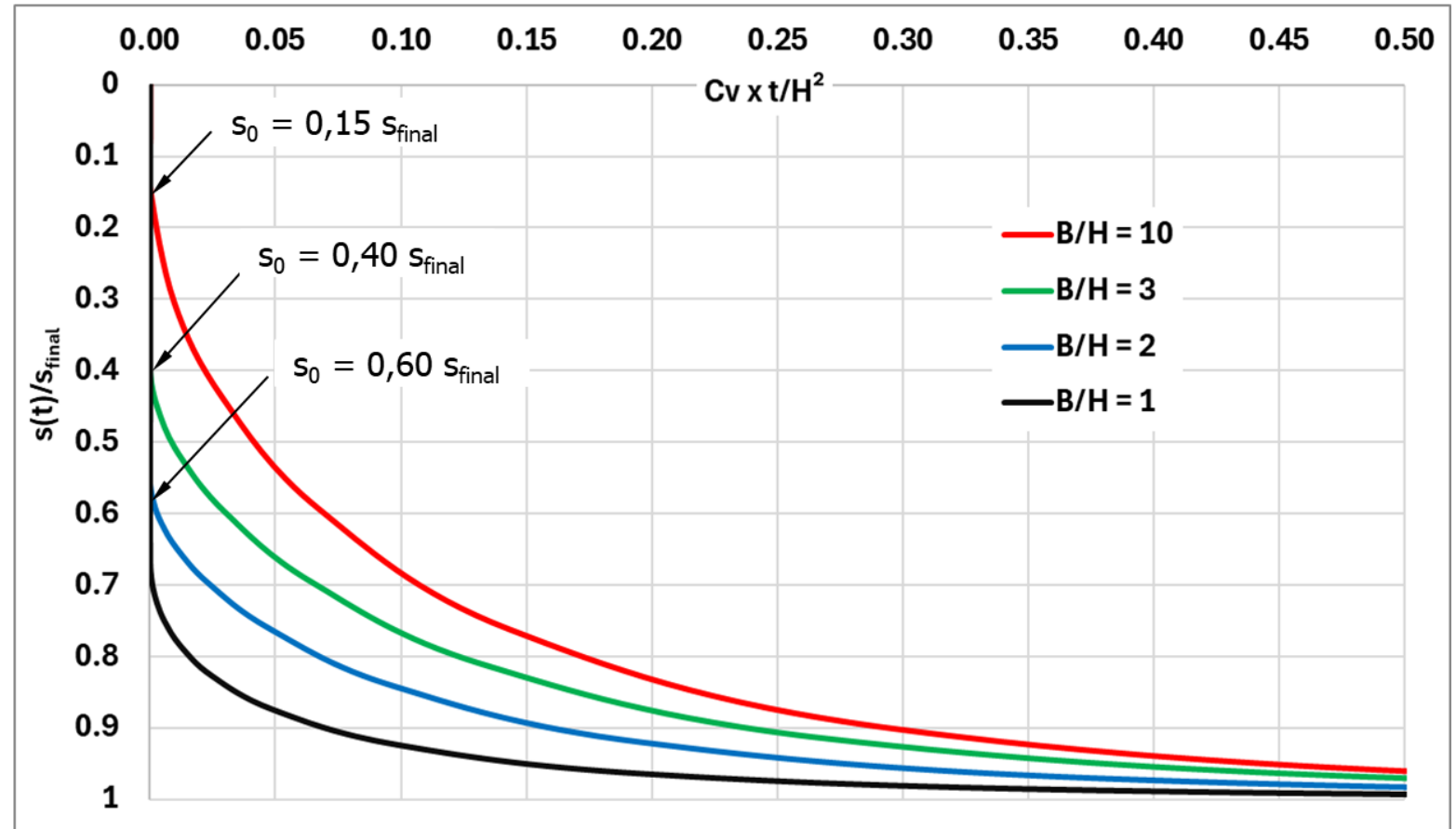
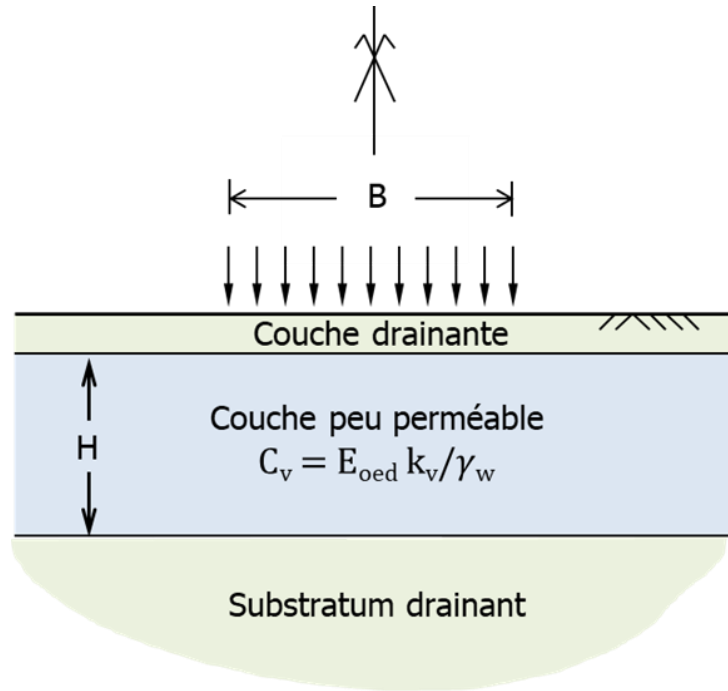
REX CNPE 900 MW

- Lien avec les essais laboratoire



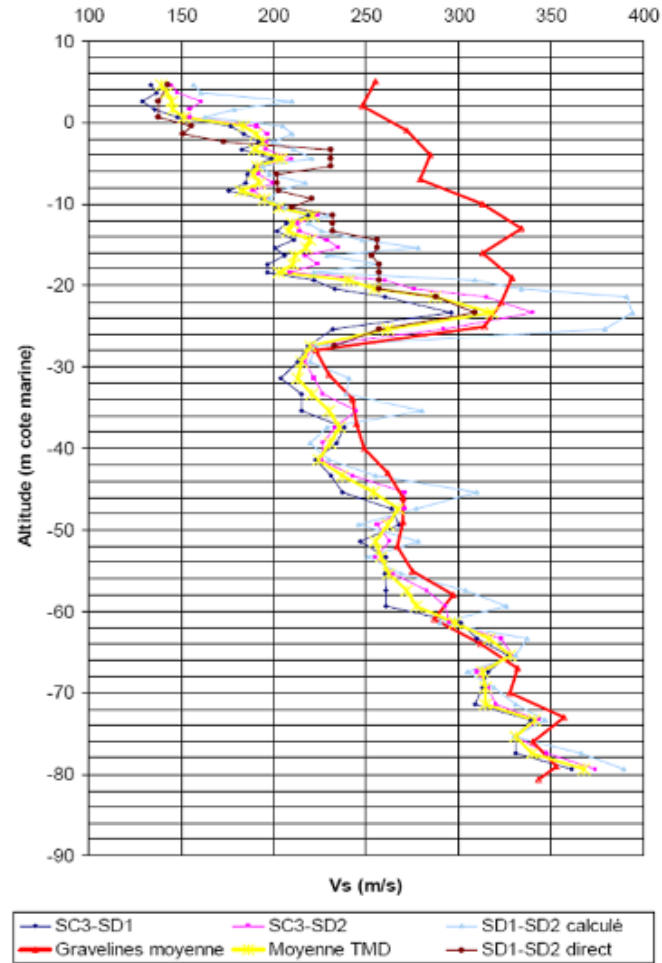
REX CNPE 900 MW

- Lien avec la théorie de la consolidation... bi-dimensionnelle



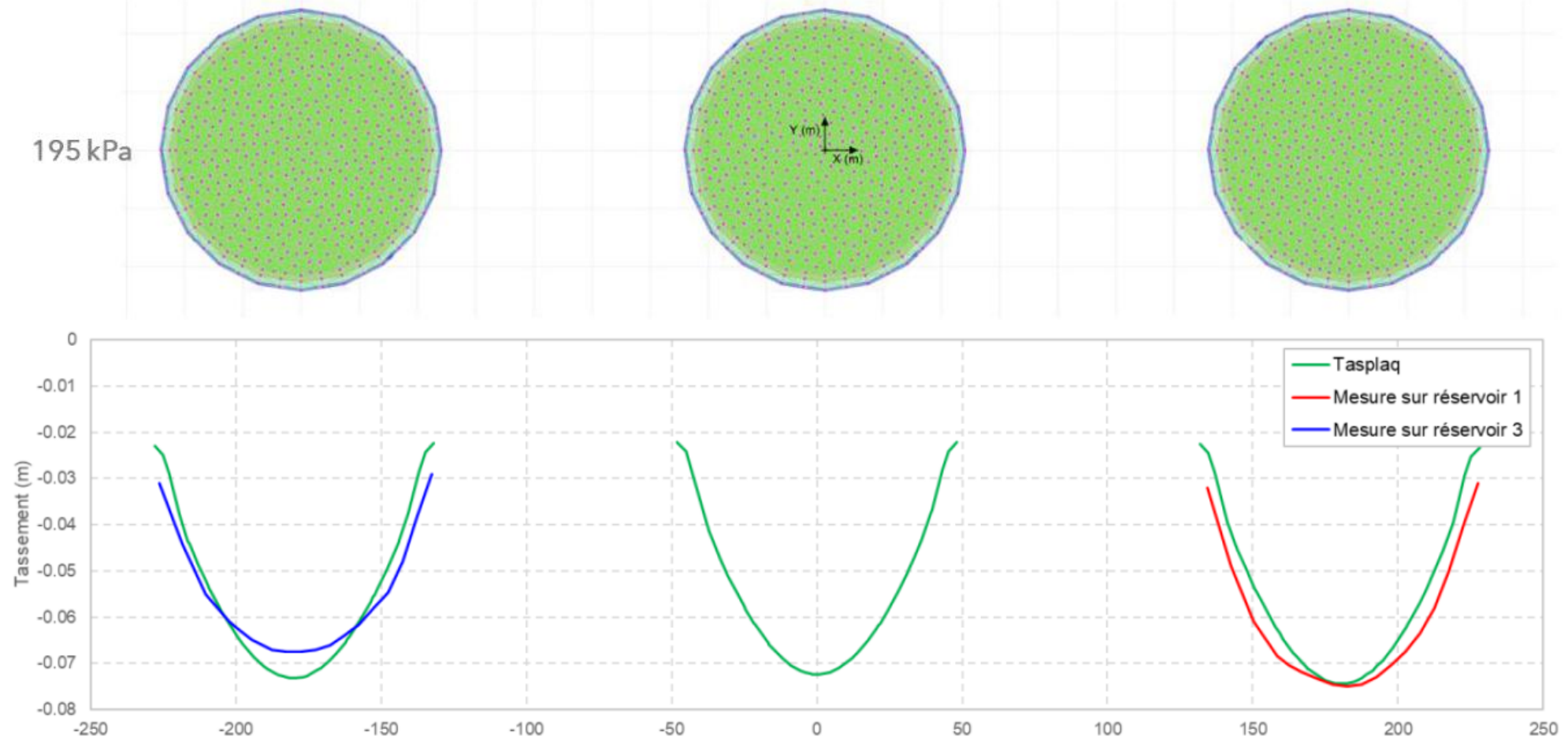
REX Dunkerque LNG

- Construction de trois réservoirs méthaniers de 90 m de diamètre (200 kPa)



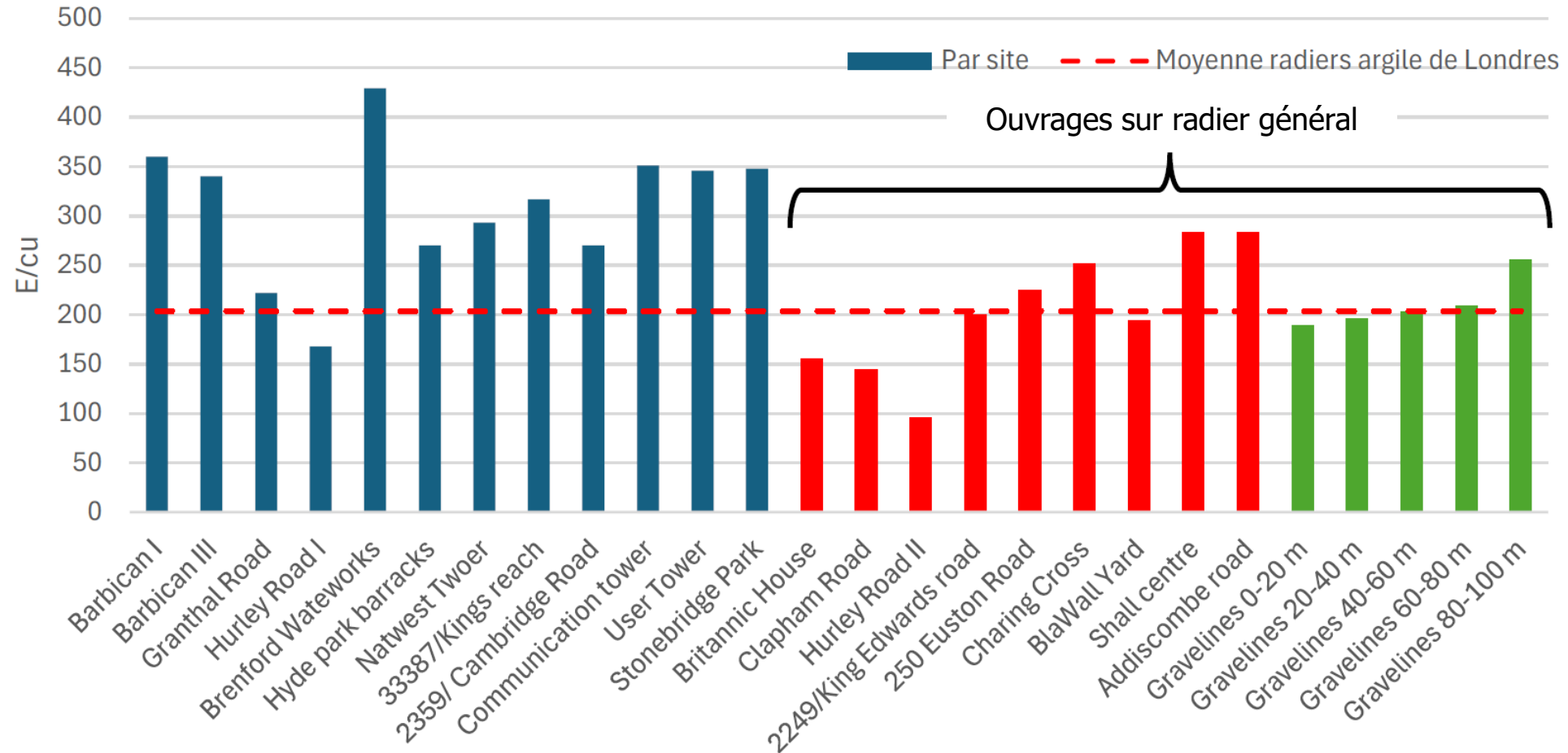
REX Dunkerque LNG

- Evaluation du modèle de comportement sur l'Hydro-test des réservoirs (200 kPa)



REX Argile de Londres

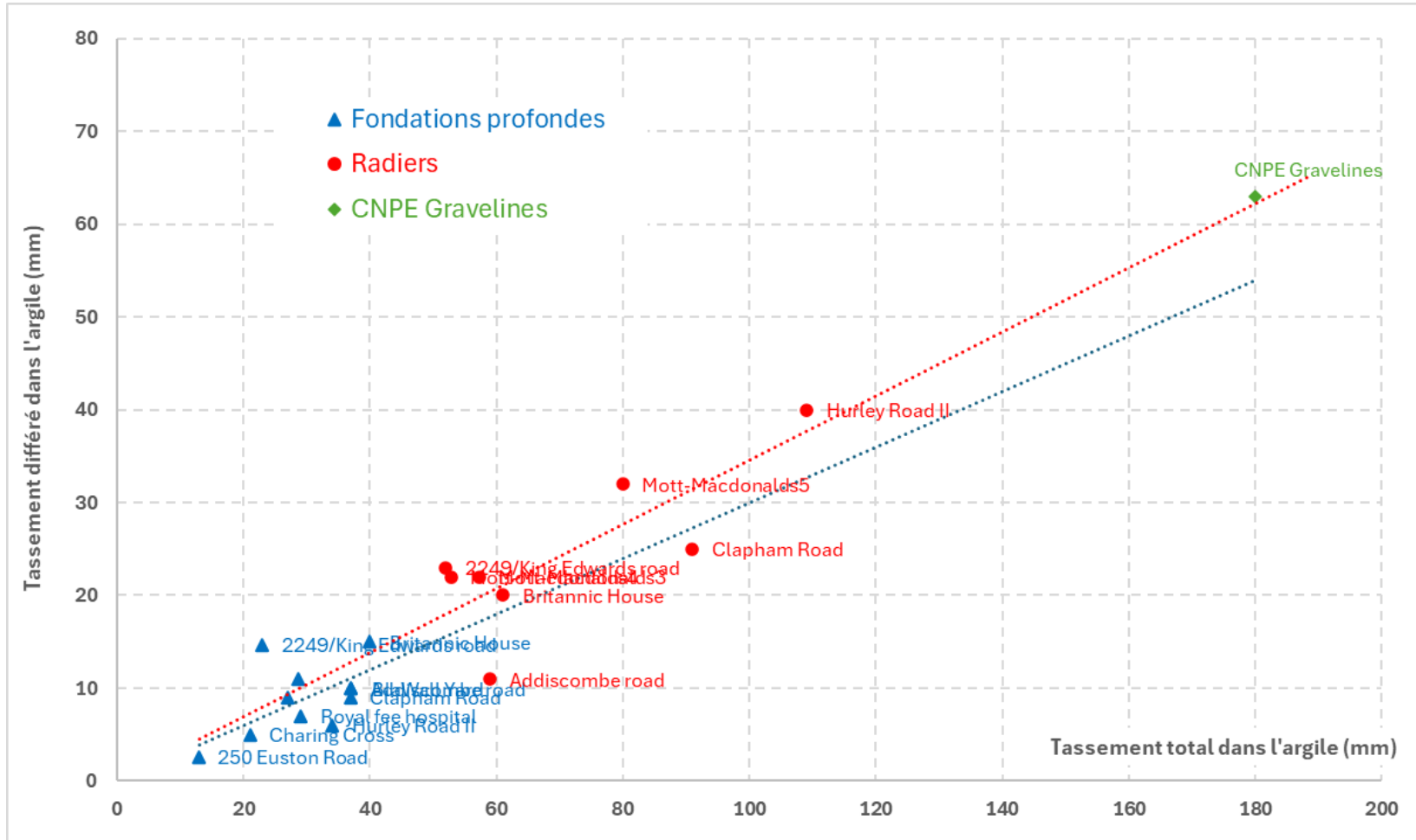
- Vis-à-vis du module de déformation (normalisé par c_u)



ARUP, 1988. Settlement of structures on overconsolidated clay (Internal report No. 5294/19/PH/DPN/BS/CM)

REX Argile de Londres

- Vis-à-vis de la part « différée » des tassements dans les Argiles



Sommaire

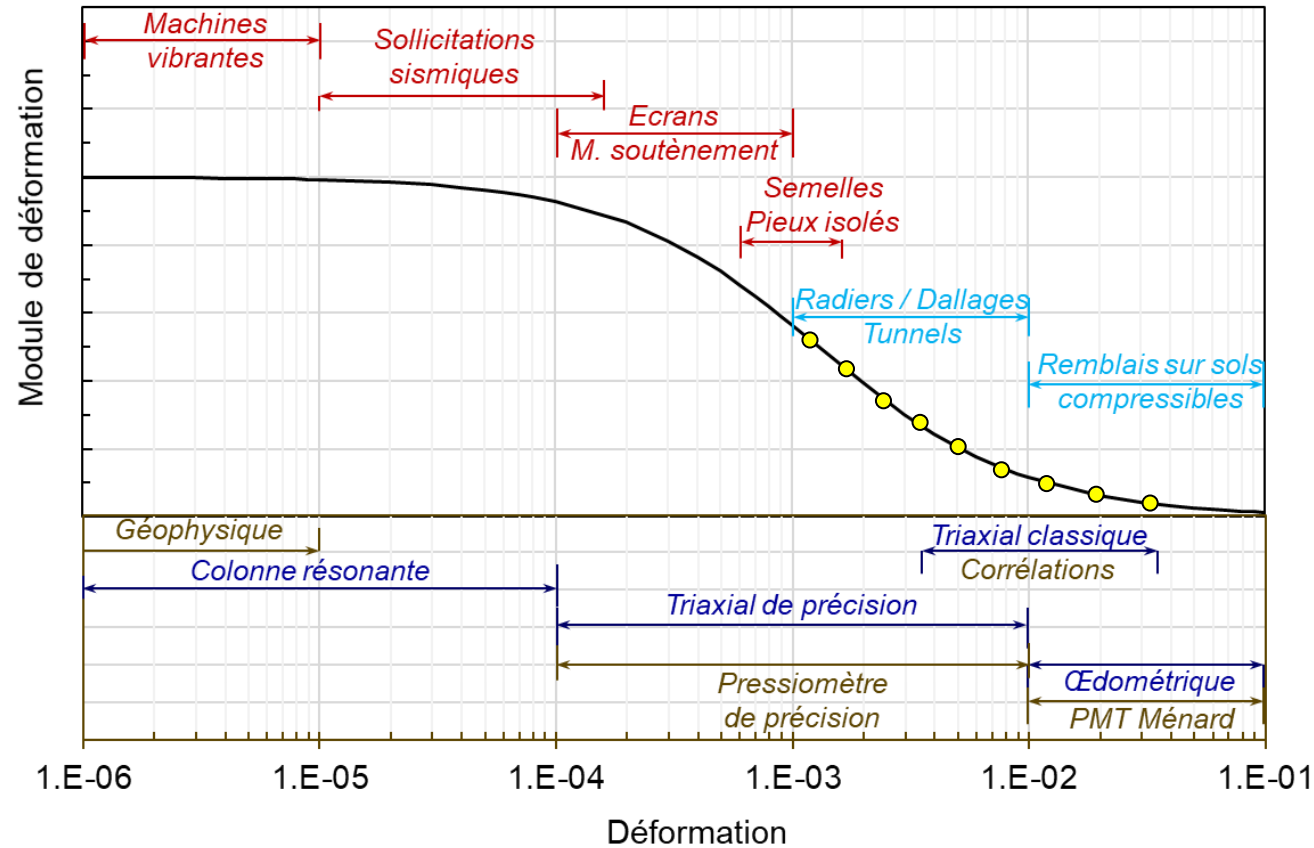
- Contexte
- Campagne de reconnaissance
- REX sur ouvrages existants
- Perspectives

Perspectives

- Caractérisation de l'Argile de Flandres sur le site de Gravelines
 - ⇒ Les mesures en laboratoire donnent une estimation par défaut des modules et vitesses de consolidation
 - ⇒ Les mesures de tassement en vraie grandeur permettent de fiabiliser le modèle géotechnique

Déformation prépondérante
 Déviatorique
 Volumique et/ou déviatorique

Type d'essai
 Sur le terrain
 Laboratoire



Perspectives

- Caractérisation de l'Argile de Flandres sur le site de Gravelines
 - ⇒ Les mesures en laboratoire donnent une estimation par défaut des modules et vitesses de consolidation
 - ⇒ Les mesures de tassement en vraie grandeur permettent de fiabiliser le modèle géotechnique
- Application au projet EPR2
 - ⇒ Garantir une rigidité minimale compatible avec les critères de conception de la superstructure
 - ⇒ Faire travailler les sols support dans un domaine élastique éprouvé
 - ⇒ Limiter l'impact de l'hétérogénéité des Sables superficiels



Merci pour votre attention



Cyril Simon
cyril.simon@edf.fr



Fahd Cuirra
fahd.cuirra@setec.com

REX CNPE 900 MW

- Répartition des tassements dans le temps et en profondeur
 - ⇒ Tassomètres multi-points permettant d'isoler...
 - ... le tassement produit dans les niveaux sableux à court terme
 - ... le soulèvement lié aux travaux de terrassement
 - ⇒ Comportement différé des terrains en place
 - Transition N2-N3 consolidation rapide (faible épaisseur) mais fluage potentiel (0,1 à 1 cm)
 - Argile des Flandres « consolidation » au bout de 30 à 50 ans et amorce progressive du fluage (1 mm/an)
 - ⇒ Au total à long terme
 - Des sables hétérogènes avec des tassements acquis majoritairement à court terme (5 à 13 cm)
 - Une Argile de Flandres homogène avec des tassements atteignant les 16 cm au bout de 40 ans