

Journée technique du CFMS « optimisation des ouvrages »

7 avril 2022



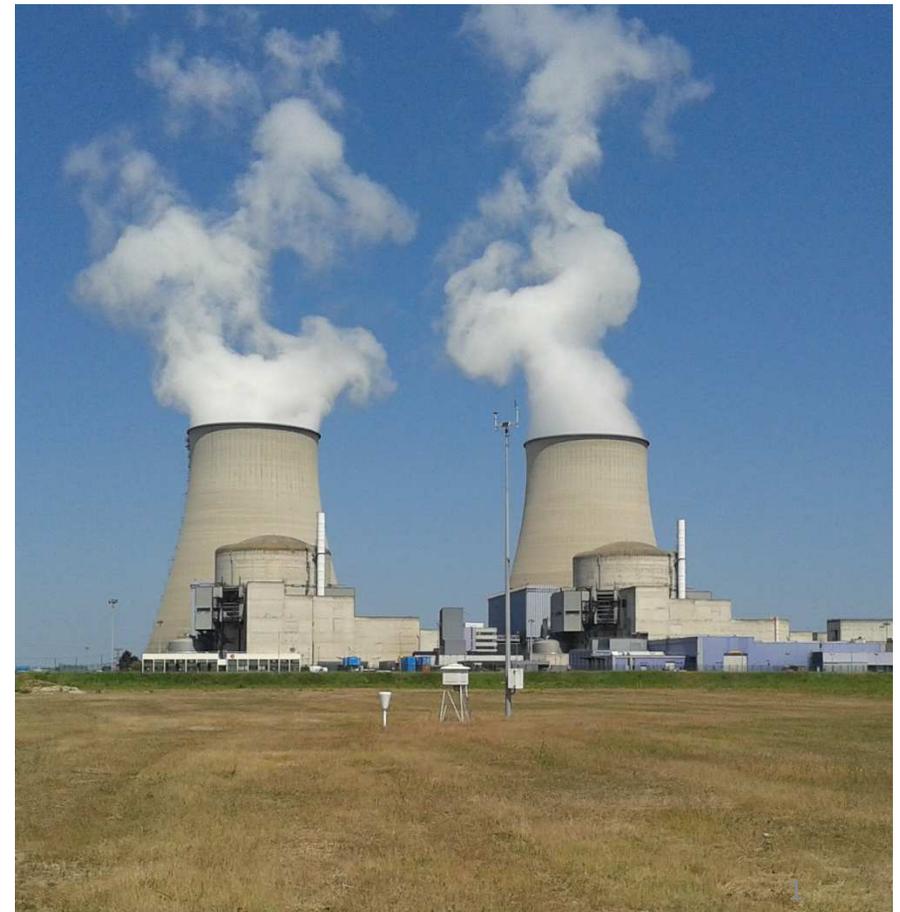
# Estimation du comportement d'un ouvrage neuf grâce au suivi et au calcul en retour d'ouvrages existants

B. Pelletier

*EDF S.A., France*

*Service de Géologie & Géotechnique*

*baptiste.pelletier@edf.fr*



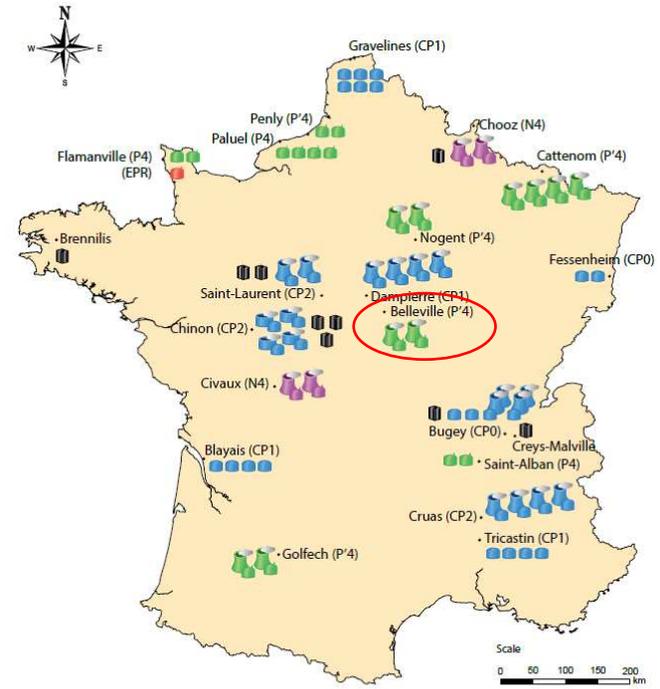
# Le groupe EDF et le parc nucléaire français

EDF est l'un des plus grands électriciens mondiaux, et opère de nombreuses centrales nucléaires. En France, EDF a la charge de l'exploitation des 58 réacteurs en activité, répartis sur 19 sites.

Le Service de Géologie & Géotechnique est le département d'expertise interne dans les domaines de :

- la géologie
- la géotechnique
- l'hydrogéologie
- l'aléa sismique

Pour les sites existants ou en développement, en France et à l'international.



Power	900 MW	1 300 MW	1 450 MW	1 600 MW	Decommissioned
Type	CP0 CPY : CP1 CP2	P4 P'4	N4	EPR	<ul style="list-style-type: none"> <li>HWGCR (Brennilis)</li> <li>UNGG (Saint-Laurent A, Bugey 1, Chinon A)</li> <li>PWR (Chooz A)</li> <li>RNR Superphénix (Creys-Malville)</li> </ul>

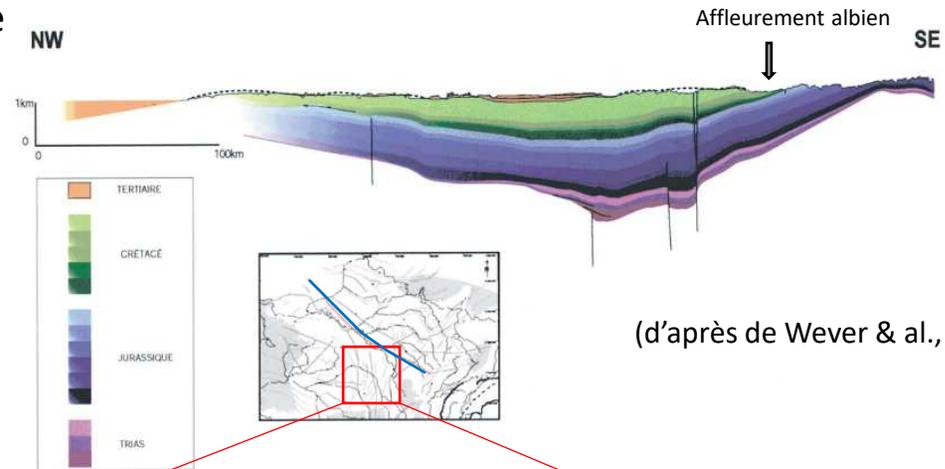
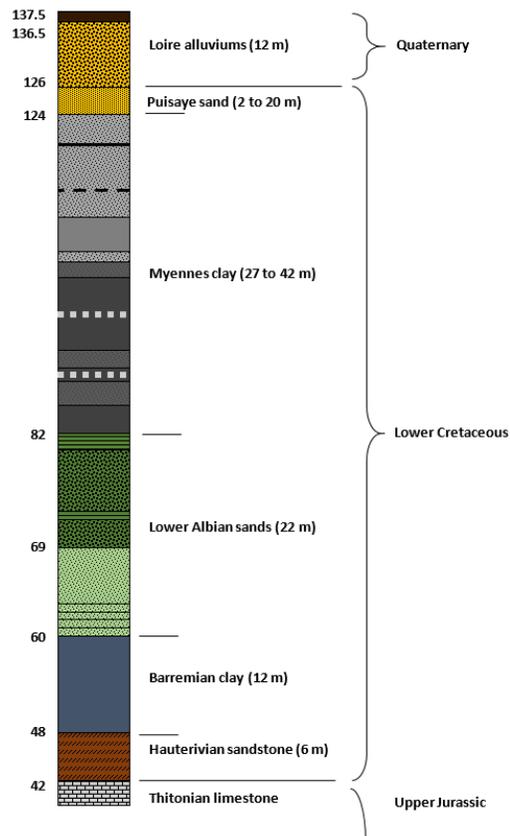


# Le site de Belleville – la géologie

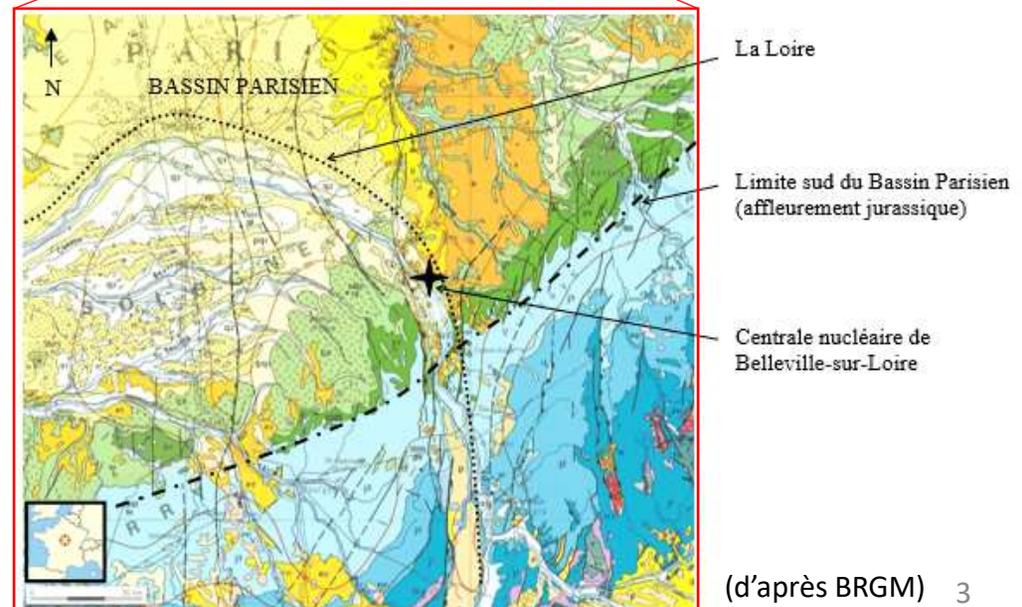
Site alluvial au bord de la Loire, à la limite sud du Bassin Parisien.

Les couches sous-jacentes remontent à l'Albien (et inférieur).

Log géologique typique du site de Belleville



(d'après de Wever & al., 2002)

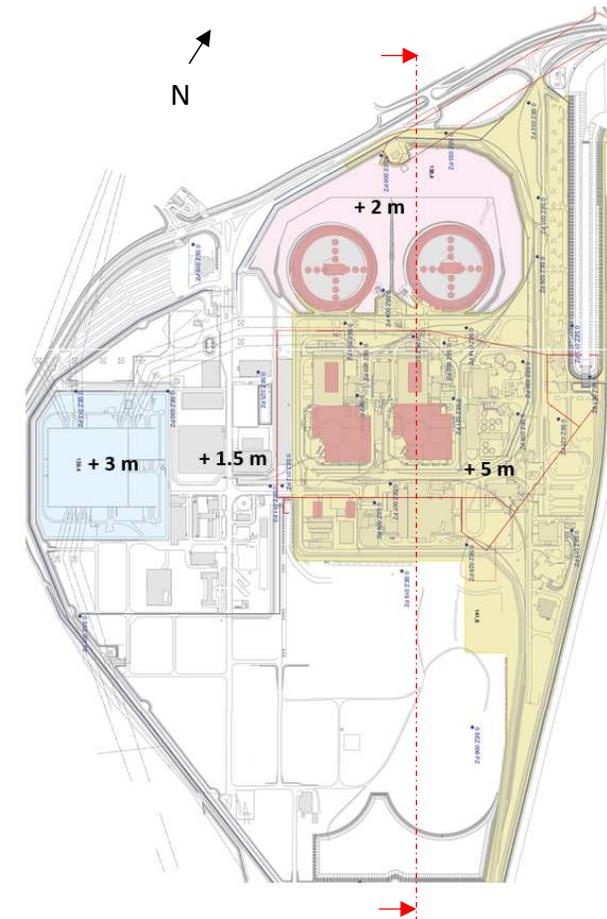
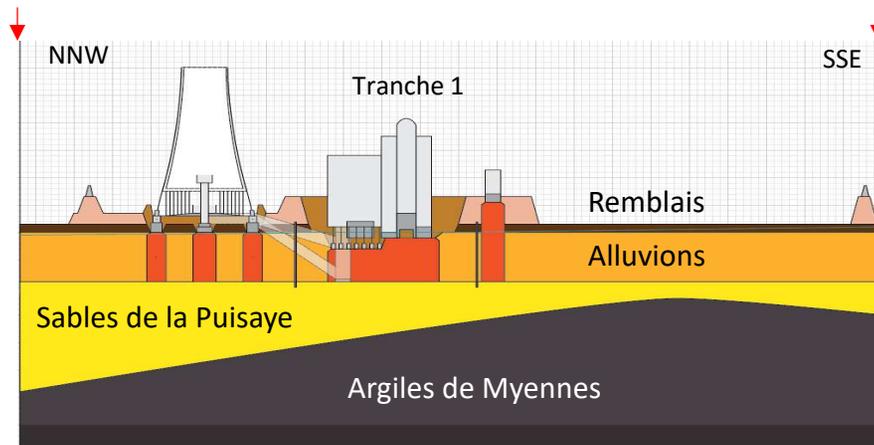


(d'après BRGM) 3

# Le site de Belleville – les terrassements

En raison des niveaux d'inondation pris en compte, une plateforme principale en remblais été créée (en jaune).

Sous les principaux bâtiments (les plus lourds), les alluvions ont été vibrocompactées (en rouge).



Emprise des plateformes du site

# Les bâtiments et le chargement

Les radiers sont profondément encastrés (jusqu'à 7,7 m sous le niveau de la plateforme).

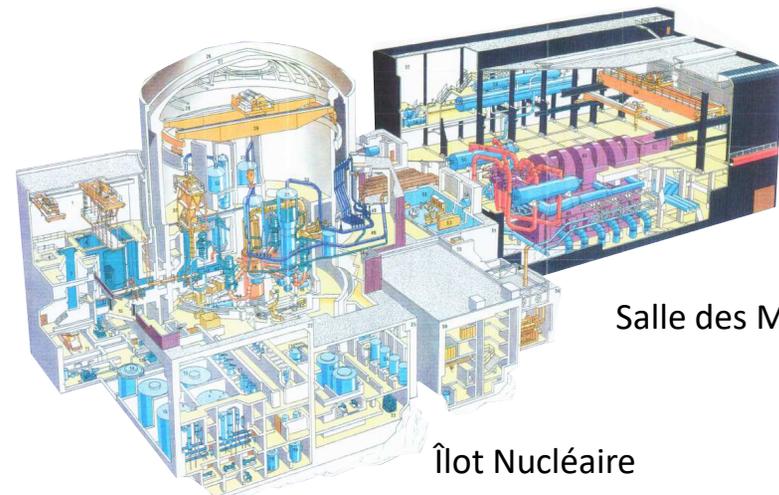
Les ouvrages lourds sont concentrés dans une zone de 1 ha environ.

En tout, l'Îlot Nucléaire pèse 260 000 t.

Le radier du réacteur fait 2,8 m d'épaisseur.

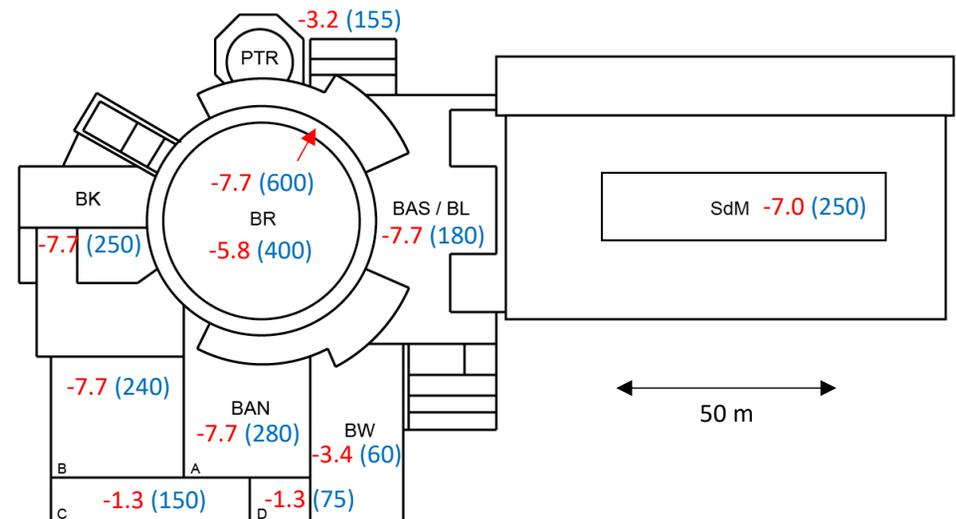
Le Bâtiment Réacteur (BR) à lui seul pèse 100 000 t.

Les 5 m de remblais de la plateforme représentent une contrainte de 95 kPa.



Salle des Machines

Îlot Nucléaire



Profondeur (en m, en rouge) et charge (en kPa, en bleu) des radiers de la Tranche 1

# Étude prédictive des tassements

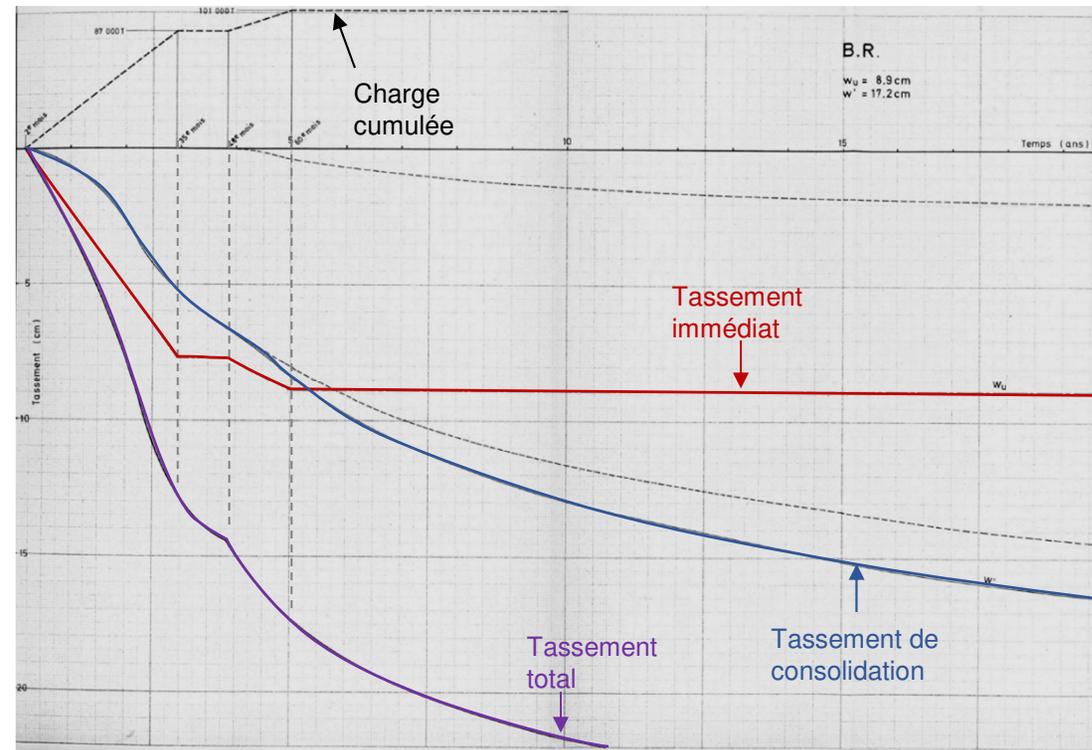
Les calculs ont été faits en 1979.

Le tassement total  $s$  est la somme des :

- tassement immédiat  $s_u$   
(avec des modules court terme  $E_u$  et  $\nu = 0.5$ )
- tassement de consolidation  $s'$   
(avec des modules long terme  $E'$  et  $\nu'$ , basés sur les essais œdométriques et l'accroissement de contrainte  $\sigma'_2 - \sigma'_1$  apporté par les ouvrages)

$$E' = \frac{(1 + \nu') \cdot (1 - 2\nu')}{1 - \nu'} \cdot E_{oed}$$

$$E_{oed} = - \frac{\sigma'_2 - \sigma'_1}{e_2 - e_1} \cdot (1 + e_1)$$

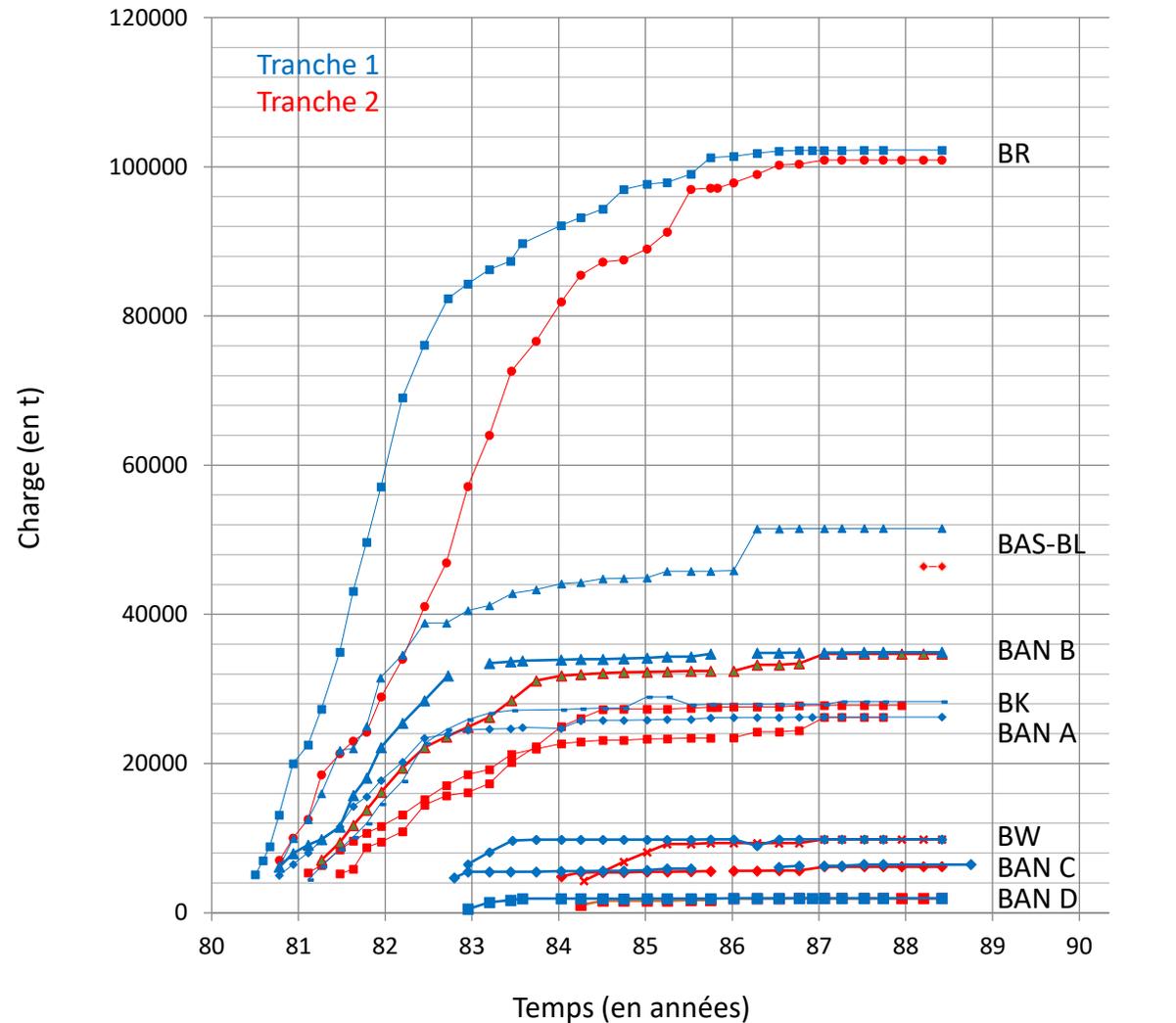


Résultats de l'étude prédictive de 1979 – tassement calculé pour le BR (en mm) en fonction du temps (en années).

Les résultats pour le Bâtiment Réacteur (BR) sont :

$s_u = 89 \text{ mm}$ ,  $s' = 172 \text{ mm}$ , et  $s = s_u + s' = 261 \text{ mm}$  pour chaque tranche à 20 ans

# Le suivi du chargement



Chargement du BL

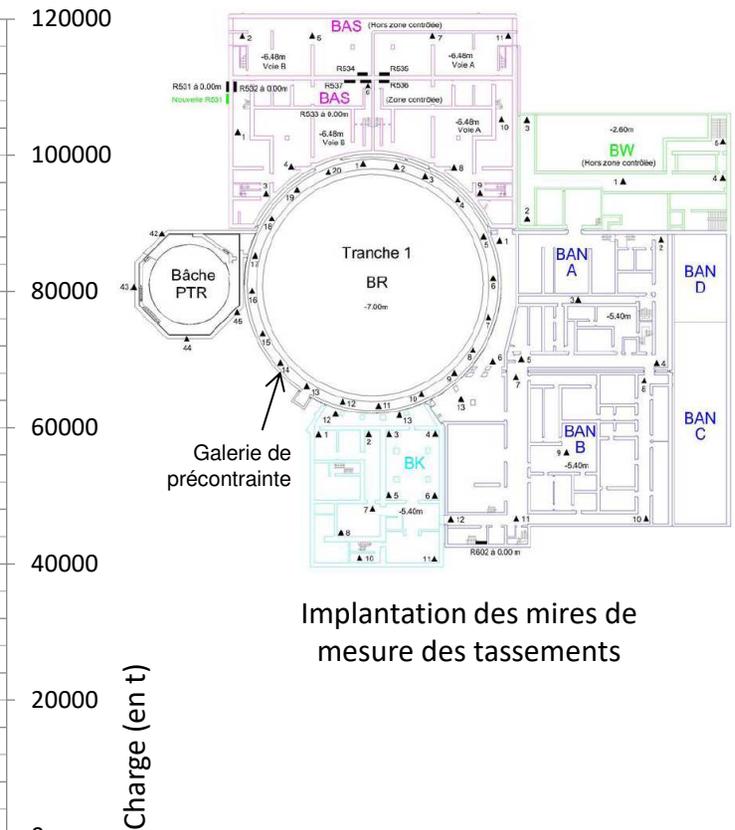
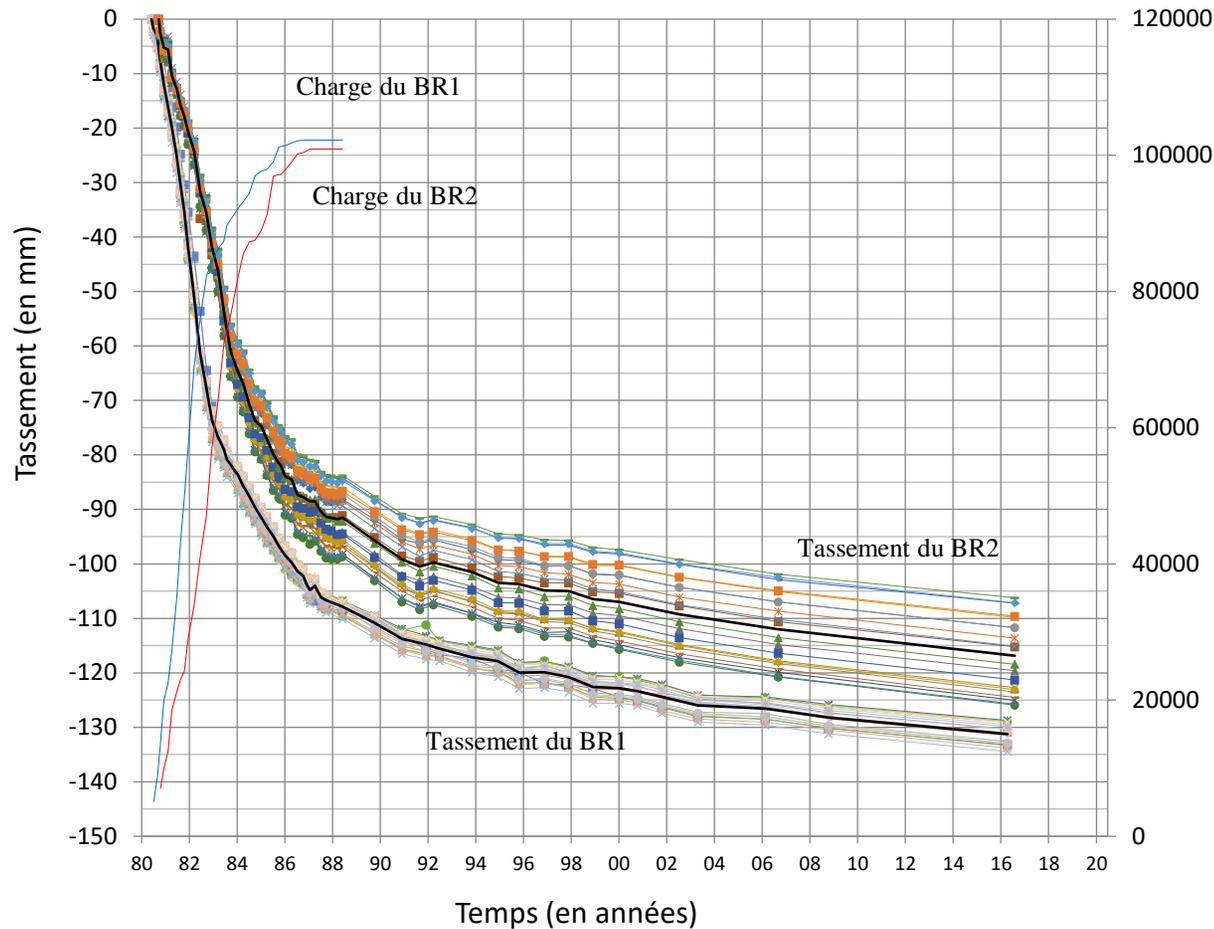
Le chargement a fait l'objet d'un suivi pour chaque bâtiment durant la construction (de 1980 à 1989).

Cette étude est limitée au Bâtiments Réacteurs (BR).

L'influence des bâtiments périphériques est intégrée dans les calculs.



# Le suivi des déplacements



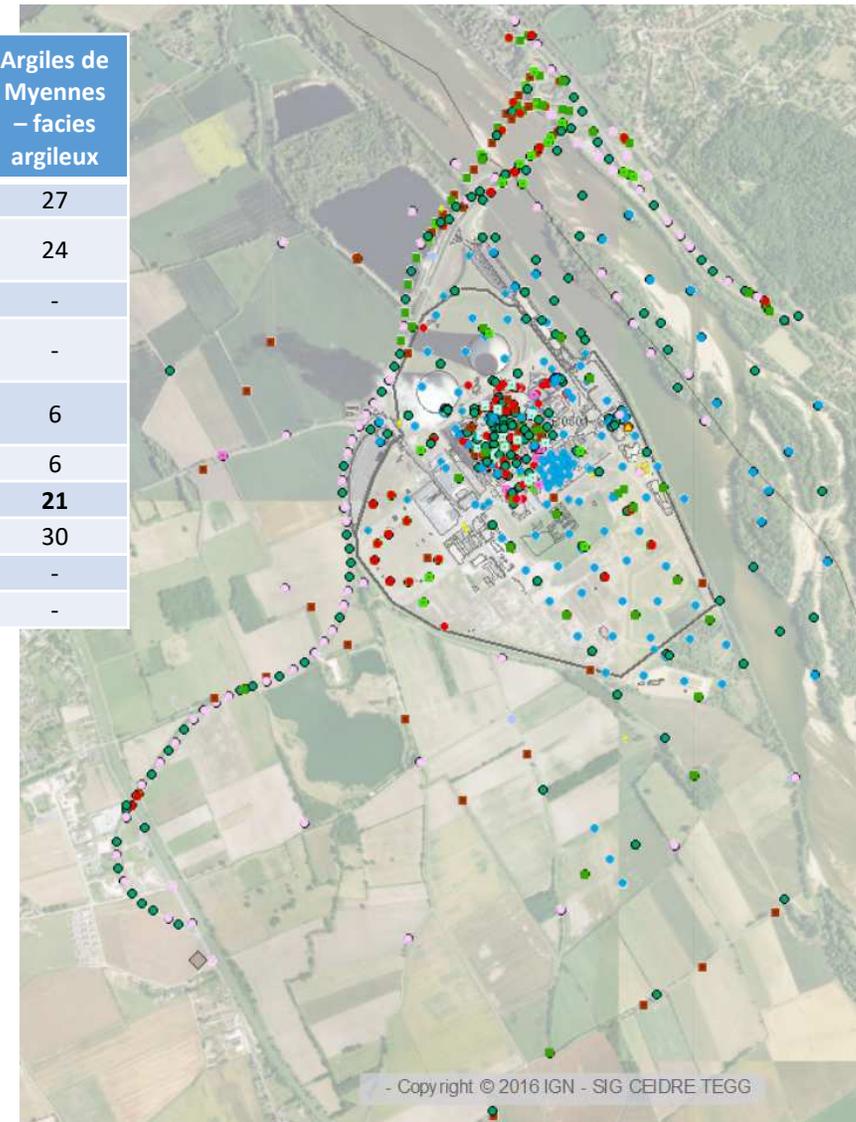
Les résultats au bout de 20 ans sont  $s = 123$  (Tranche 1) et 107 mm (Tranche 2).  
 Moitié moins que les prédictions, et 20% de tassement en moins en Tranche 2.

# Les campagnes de reconnaissances

Nombre d'essais		Remblais	Alluvions – silt	Alluvions – sable graveleux	Sables de la Puisaye	Argiles de Myennes – facies sableux	Argiles de Myennes – facies argileux
Essais de laboratoire	Caractérisation	7	27	27	86	57	27
	Limites d'Atterberg	3	29	21	25	40	24
	Proctor	3	-	18	-	-	-
	Chargement à la plaque	21	-	8	-	-	-
	Compression simple	1	2	-	25	14	6
	Triaxial	3	3	6	40	20	6
	Œdomètre	1	6	3	<b>44</b>	<b>35</b>	<b>21</b>
Essais in-situ	Pressiomètre	89	4	165	33	37	30
	SPT	160	13	210	51	-	-
	CPT	12	-	173	-	-	-

Des investigations de sol très complètes ont été réalisées sur le site, au cours de plusieurs campagnes. Ce qui nous permet d'obtenir une grande robustesse dans les valeurs des paramètres de sol.

Les études prédictives étaient principalement basées sur les résultats des œdomètres.



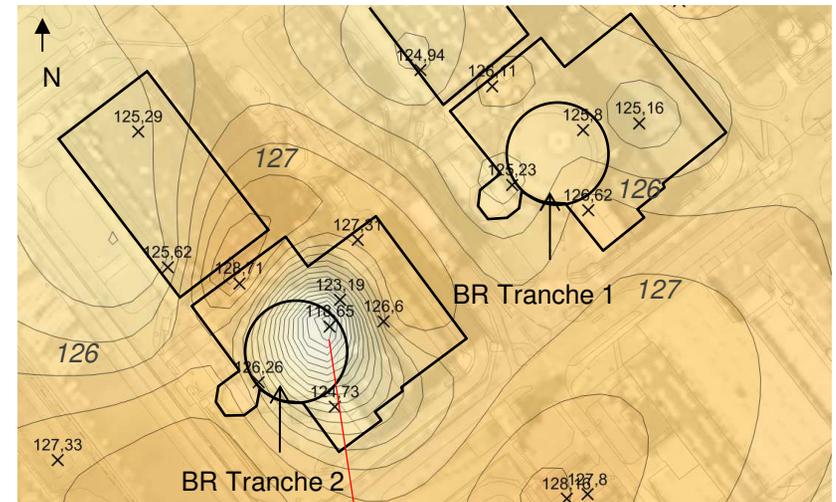
Position des sondages

# Modélisation de la géométrie du problème

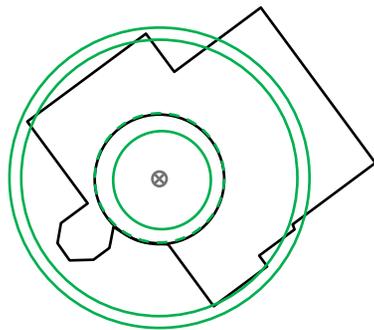
Un modèle 2D axisymétrique a été réalisé sous Plaxis jusqu'au mur des argiles de Myennes.

Les différences de stratigraphie entre les deux Tranches ont été modélisées.

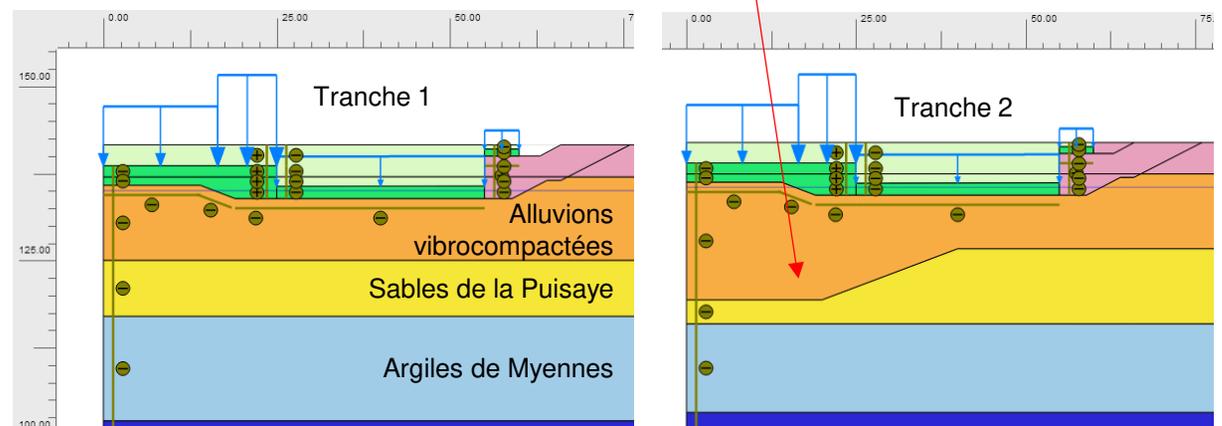
Le basculement n'est pas reproduit en 2D.



Toit des sables de la Puisaye à partir des sondages disponibles.



Géométrie axisymétrique du chargement dans le modèle (en vert) par rapport à la disposition réelle des bâtiments.



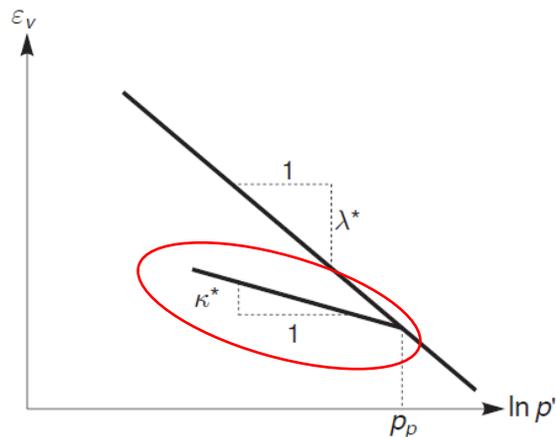
# Modélisation du comportement du sol

Les alluvions quaternaires sont modélisées en élastique linéaire.

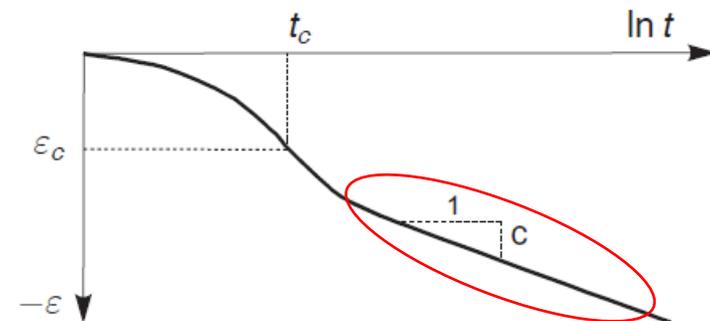
Pour les couches albiennes, on a recours à un Soft Soil Creep Model (SSCM).

Du fait de leur âge, les couches albiennes sont considérées surconsolidées Durant tout le chargement (hypothèse différente de celle de l'étude prédictive).

Les poids volumiques, et les paramètres de rupture sont moins importants dans la modélisation. Ils ont été retenus conformément aux valeurs disponibles.



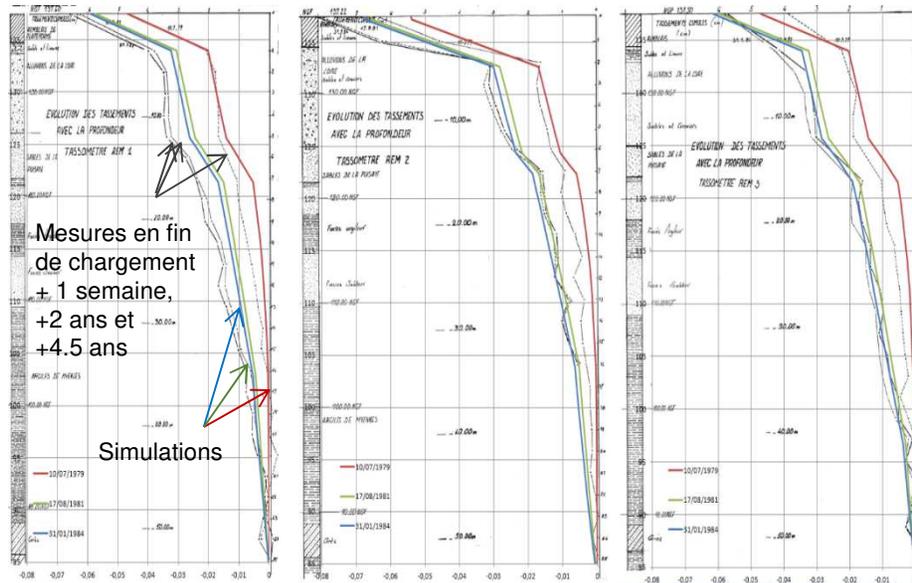
Relation logarithmique entre la déformation volumique et la contrainte moyenne (SSM)



Déformation de fluage en fonction du temps (SSMC)

(d'après Plaxis Manual, 2015)

# Ajustement contraint du modèle



Résultats des essais en vraie grandeur  
(réalisés trop tard pour avoir été pris en compte pour le design,  
mais disponibles)

Une très bonne correspondance avec les  
mesures est réalisée, y compris pour les  
aspects temporels  
(consolidation  
et fluage).

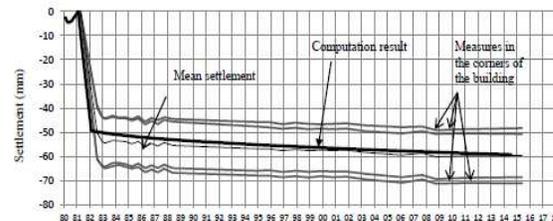
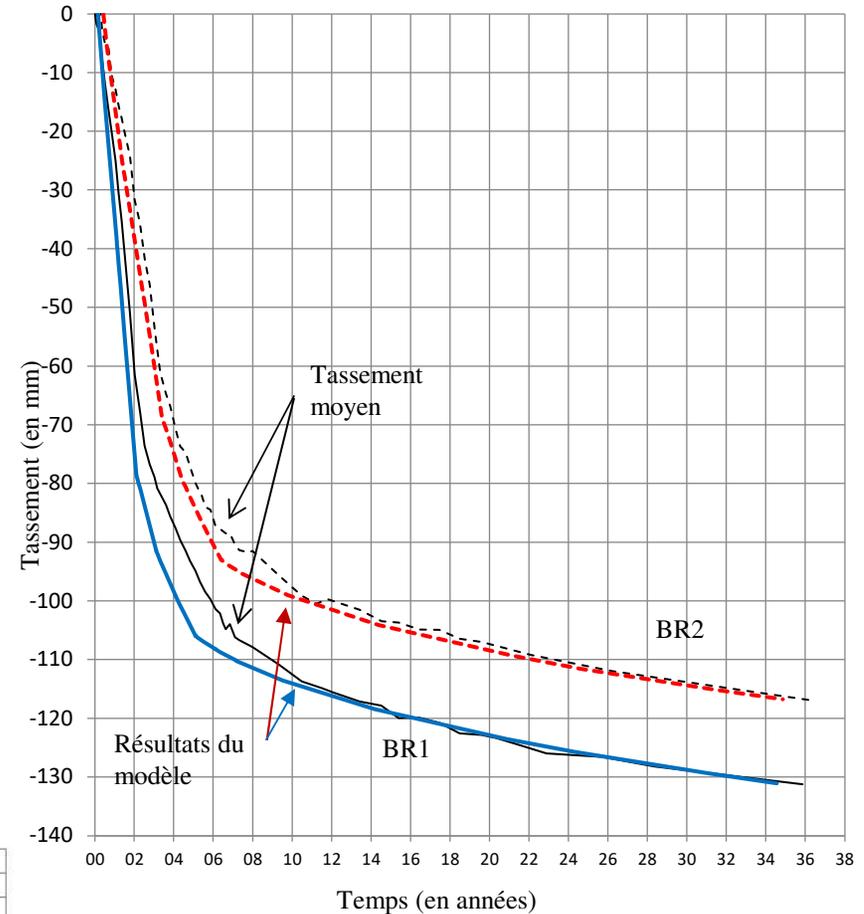


Figure 13. Computed settlements versus measures for the pumping station (in mm) function of time (in years).



Tassements simulés sous la galerie de précontrainte et mesures  
(hors basculement) pour les Bâtiments Réacteurs

Résultats pour la station de pompage

# Comparaison avec les prédictions

Des modules d'Young équivalents sont calculés à partir du SSCM pour pouvoir comparer.

$$E_{\text{oed}} = \frac{\sigma'_2 - \sigma'_1}{C_S \cdot \log \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1}} \cdot (1 + e_1)$$

Couche	Épaisseur (m)	Accroissement de la contrainte effective moyenne (kPa)		Module d'Young E' réévalué (ν = 0.3) (MPa)	Modules d'Young E' de 1979 (ν = 0.3) (MPa)
		σ' <sub>1</sub>	σ' <sub>2</sub>		
Remblais	4,7	-		-	-
Alluvions	8,8	-		<b>200</b>	<b>200</b>
Sables de la Puisaye	10,0	150	480	<b>37</b>	<b>50</b>
Argile de Myennes	8,0	260	560	<b>117</b>	<b>45</b>
	8,0	340	620	<b>140</b>	<b>55</b>
	8,0	420	680	<b>358</b>	<b>65</b>
	8,0	500	755	<b>409</b>	<b>75</b>
	8,0	580	815	<b>458</b>	<b>85</b>

La principale source de conservatisme est clairement la raideur de l'argile de Myennes (moyenne harmonique des modules d'Young de 290 MPa au lieu de 75 MPa en 1979).

La qualité et la représentativité des échantillons étaient pointées comme les principales causes de l'écart de la prédiction.

Par ailleurs, seuls les essais oedométriques semblent avoir été considérés pour le choix des modules, alors que des pressiomètres étaient également disponibles.

# Comparaison avec les pressiomètres

67 pressiomètres Ménard sont également disponibles dans les argiles de Myennes.

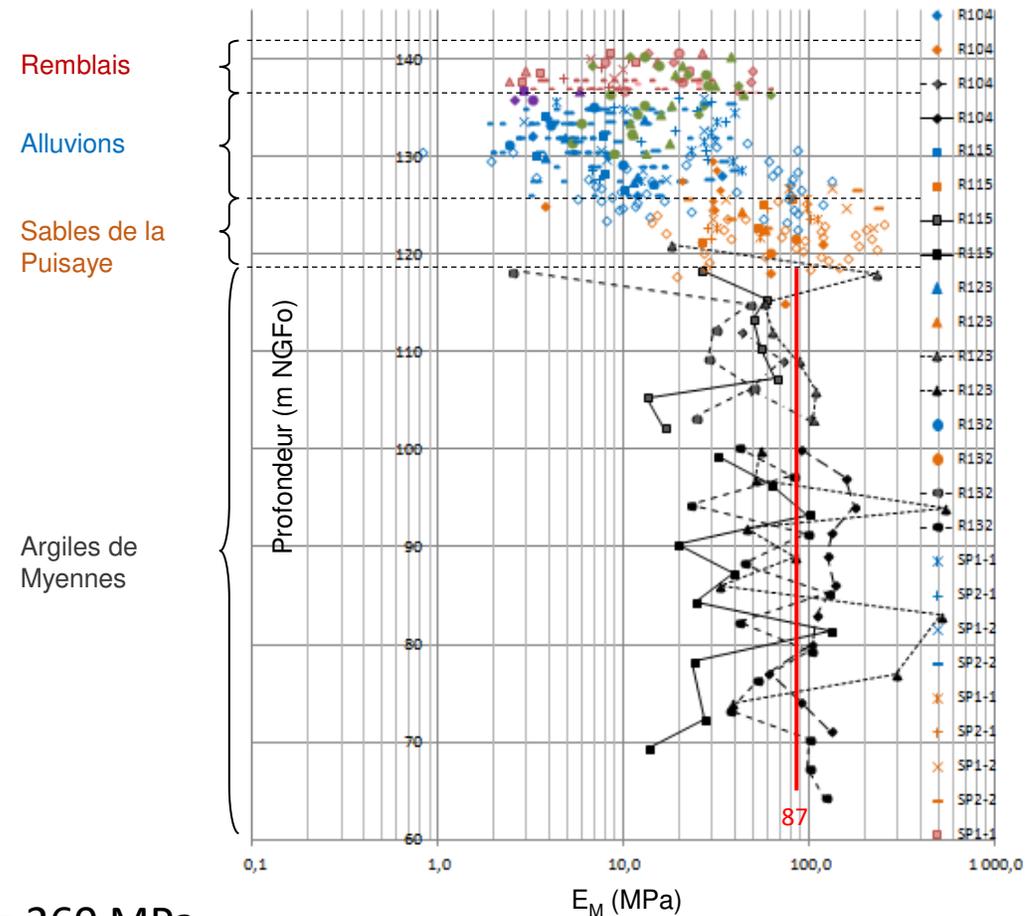
Le module de Ménard moyen  $E_M$  calculé dans les argiles de Myennes est de 87 MPa.

$$\frac{E'}{E_M} = 3$$

pour les argiles surconsolidées  
(NF P94-261 – Annexe J)

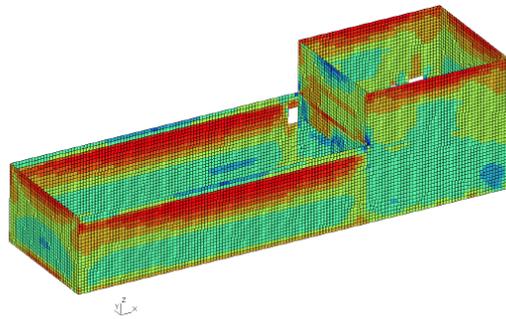
À partir des pressiomètres,  $E' = 3 \times 87 = 260$  MPa

À comparer aux 290 MPa (modèle de 2019) et  
75 MPa (calcul de 1979)

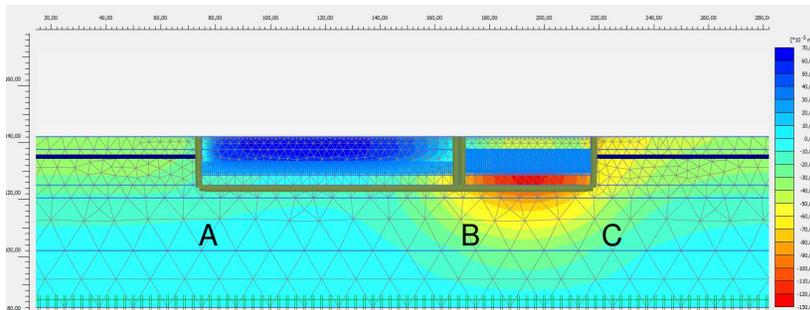


Module pressiométrique Ménard  $E_M$

# Application à un projet neuf à l'étude sur le même site

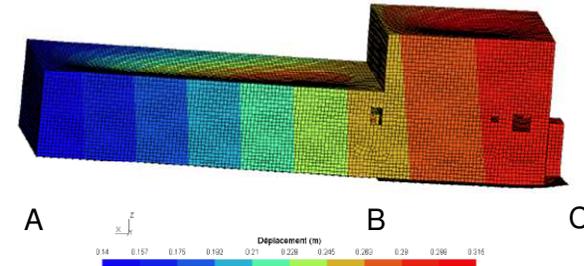


Modèle 3D de la structure

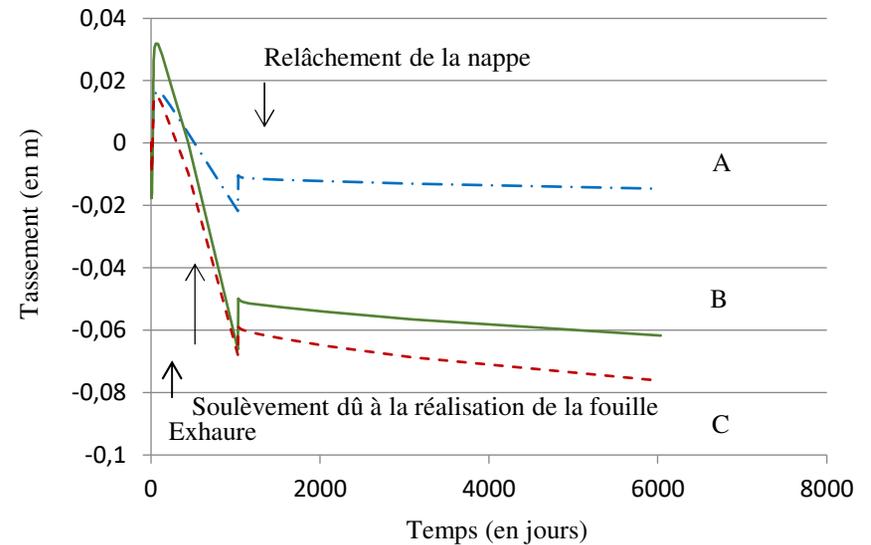


Déplacement non corrigé du maillage 2D à la fin du chargement

L'estimation à partir du modèle est beaucoup plus favorable.



Première estimation – déplacement total de 100 mm (A) à 310 mm (C)



Estimation à partir du modèle – déplacement total de 20 mm (A) à 80 mm (C)

# Conclusions

Les essais en vraie grandeur montrent leur pertinence.

Corréler les essais in-situ et les résultats de laboratoire s'avère utile et peut permettre d'éviter des problèmes importants par la suite.

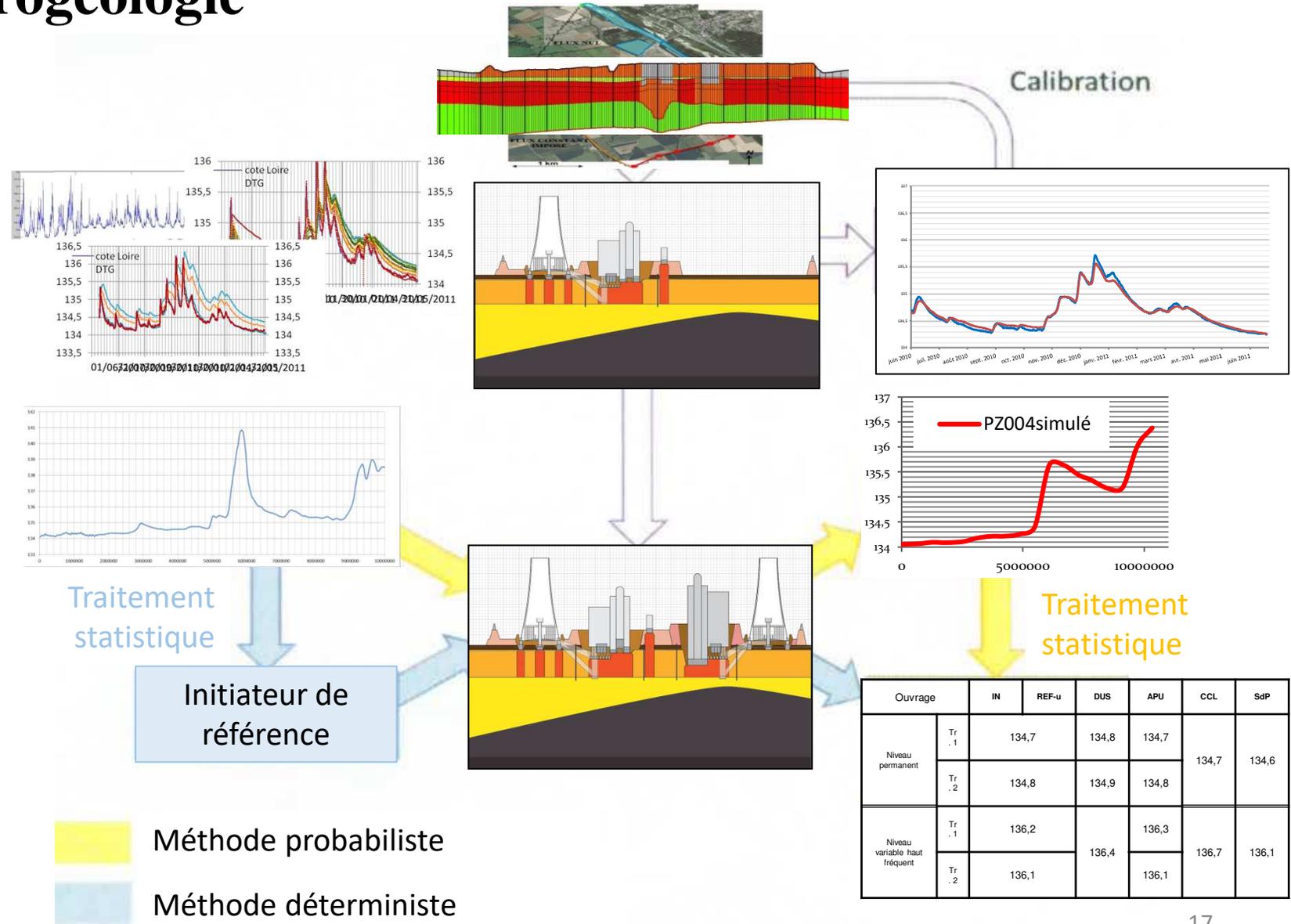
Un modèle de site est un outil puissant pour :

- capitaliser les reconnaissances et le retour d'expérience
- déterminer avec précision les conservatismes dans les études passées
- améliorer les prédictions pour des projets neufs

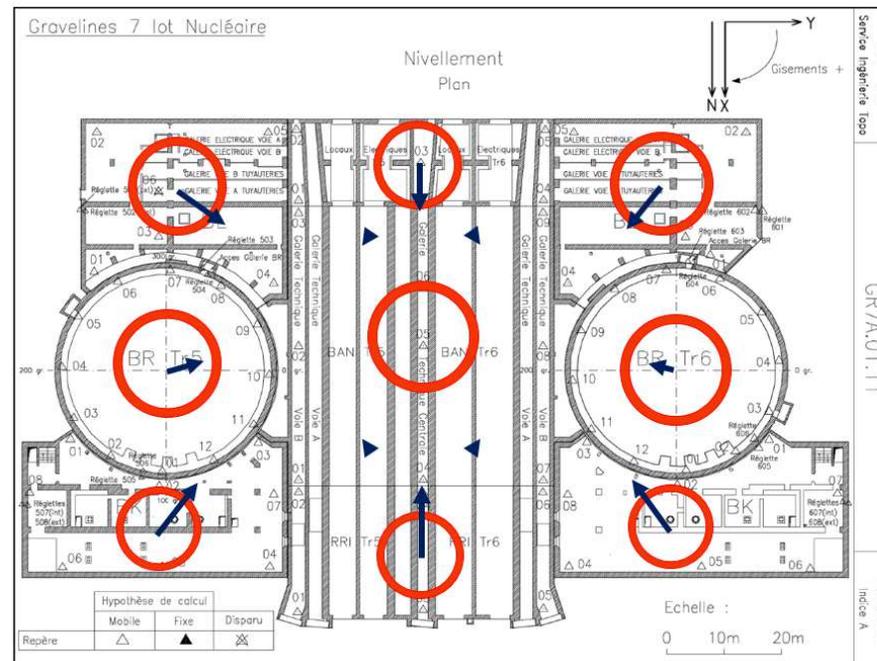
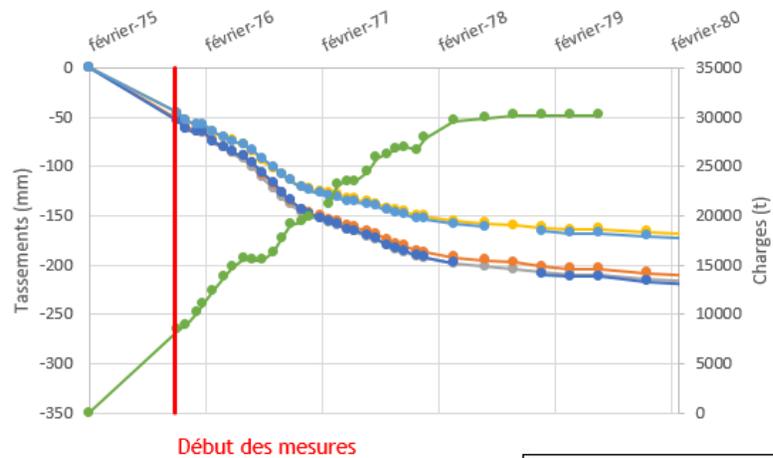
Le comportement des couches sédimentaires surconsolidées a été correctement reproduit à l'aide d'une loi de comportement SSCM.

Des modèles numériques simples (axisymétrique, linéaire élastique) permettent la plupart du temps de reproduire les phénomènes étudiés avec la précision recherchée.

# Exemple d'autre cas étudié (0) – même site, hydrogéologie

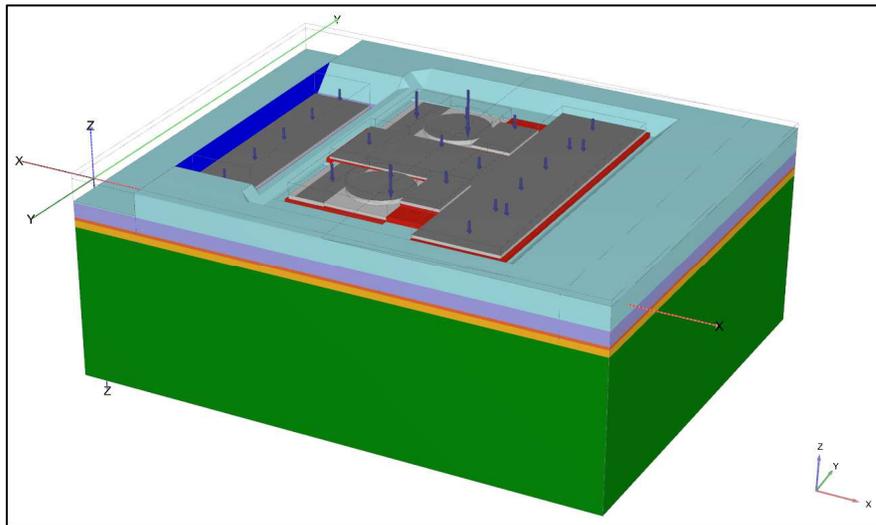


# Exemple d'autre cas étudié (1) - données



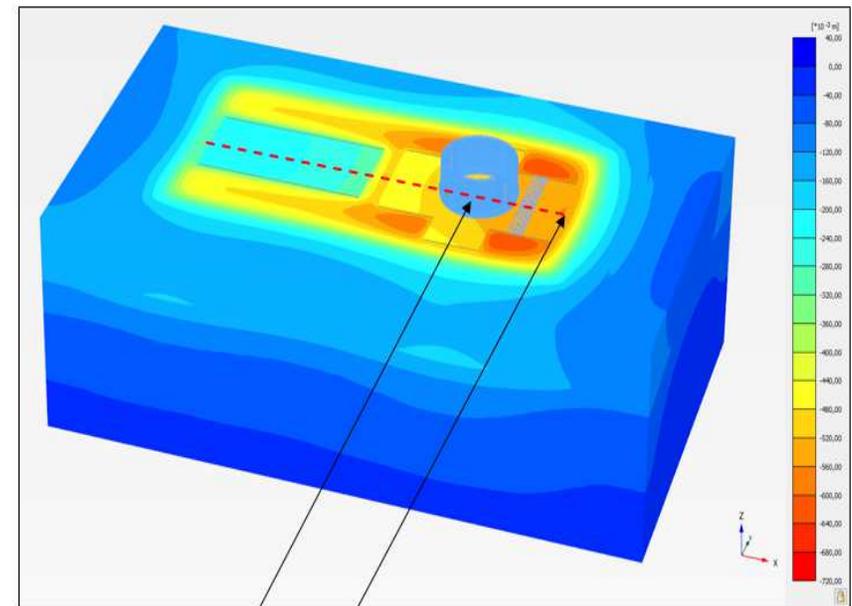
Tassement d'une paire de tranche

# Exemple d'autre cas étudié (1) - modèle

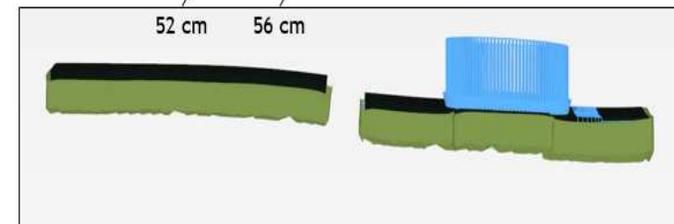
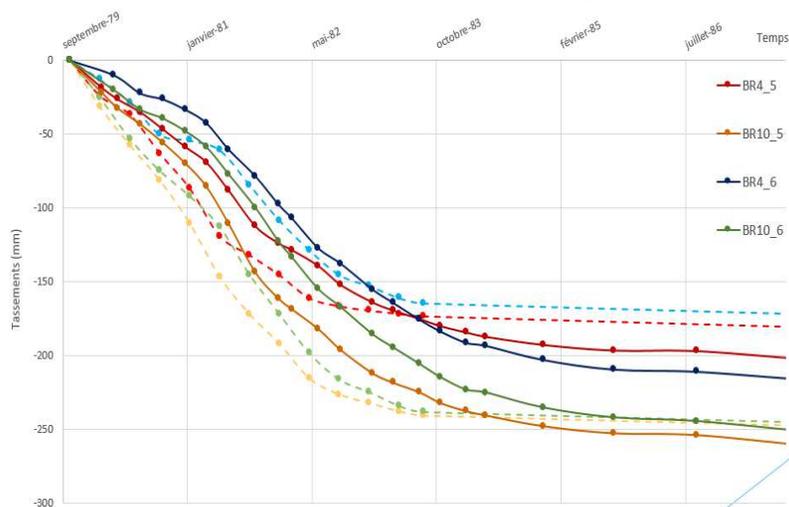


Modèle de rétrocalcul

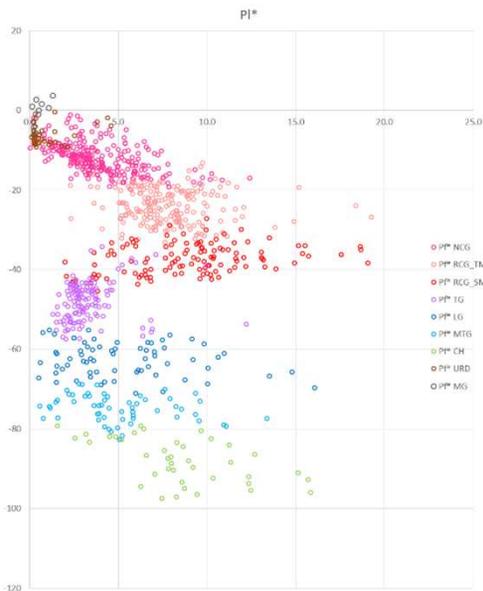
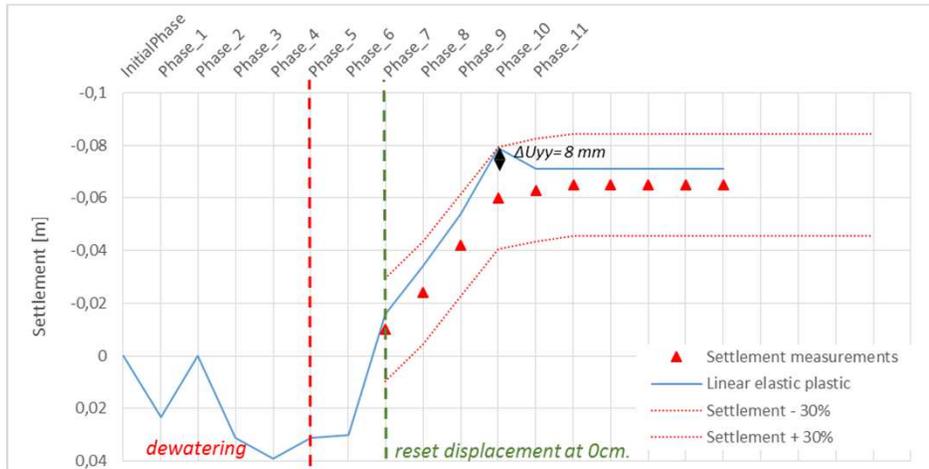
Modèle pour les ouvrages neufs étudiés



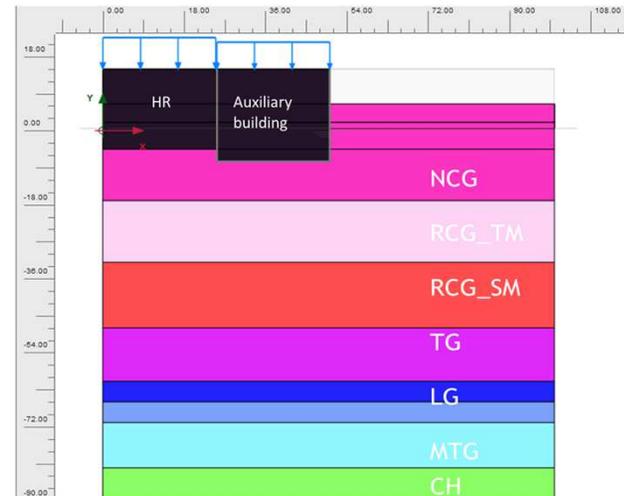
Comparaison entre les tassements corrigés et simulés (avec dalle) pour les BR 5 & 6



# Exemple d'autre cas étudié (2) - données

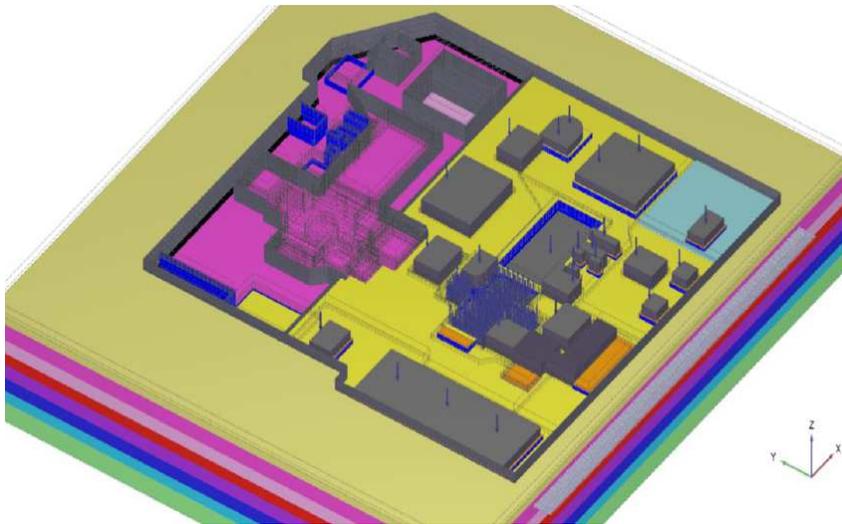


Beaucoup d'essais disponibles (ici les  $p_L^*$  des essais Ménard)



Modèle de la centrale existante (axisymétrique)

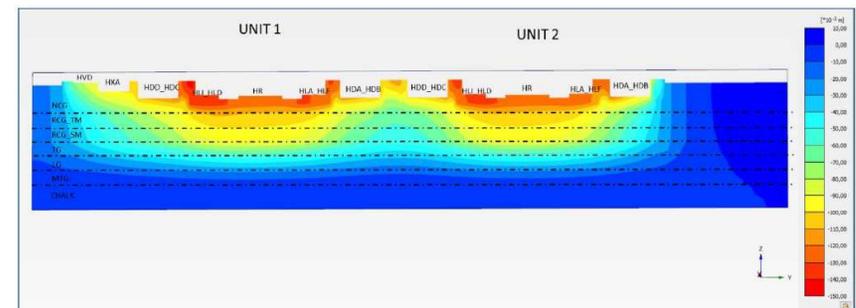
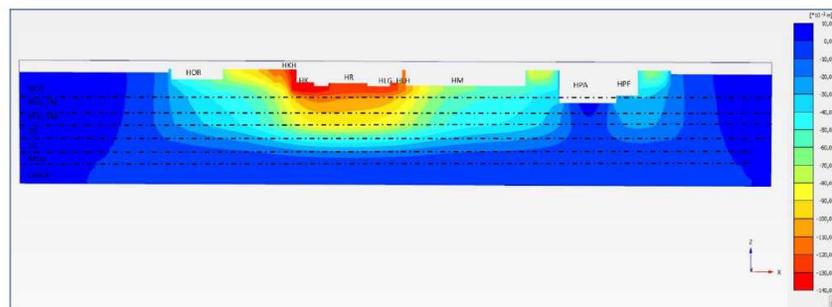
# Exemple d'autre cas étudié (2) - modèle



Le tassement sous le réacteur  
neuf est estimé entre 12 et 18 cm

(les estimations en 2015  
donnaient 20 à 25 cm)

Modèle du projet (3D) neuf et résultats



**Merci de votre attention**



Pont de Neuvy et centrale nucléaire de Belleville-sur-Loire, France