

Prédiction, suivi et retro-calcul des tassements de la centrale nucléaire de Belleville

*Settlement prediction, monitoring and back-calculation
Belleville nuclear power plant case history*

Baptiste PELLETIER¹, Simon DEPINOIS¹

¹EDF S.A. Service de Géologie & Géotechnique, Aix-en-Provence, France

RÉSUMÉ – Pour chaque centrale nucléaire, des études prédictives de tassement sont effectuées avant construction, puis les déplacements sont suivis durant toute la vie de l'ouvrage. L'article présente en une étude de cas la connaissance géologique et géotechnique qu'il est possible de retirer de ces mesures : comparaisons, modèles de calculs, calculs en retour et estimation de tassement pour un projet neuf.

ABSTRACT – Predictions of settlements have been performed for every nuclear plant before their construction, and observed displacements have been monitored during the loading and then for decades. In this paper, a case study is presented to illustrate the geotechnical benefits from these data: comparisons, numerical modelling, back-calculations and settlement assessment for future projects.

1. Introduction

Les centrales nucléaires sont des structures aux dimensions imposantes et fortement chargées. La majorité des sites français sont constitués de sols déformables, comme des alluvions ou des roches altérées. L'ordre de grandeur du déplacement dépassant souvent la dizaine de centimètres, il est nécessaire d'estimer finement le comportement des terrains. Les tassements sont mesurés pendant la construction puis durant toute la vie de l'ouvrage. Cet article traite le cas du site de Belleville.

2. La géologie du site de Belleville

La centrale nucléaire de Belleville est située le long de la Loire dans le département du Cher (18). Elle compte deux tranches de 1300 MW chacune. Géologiquement, le site est situé sur la bordure du Bassin parisien, dans le fossé de la Loire qui a érodé les formations tertiaires. La stratigraphie jusqu'à 100 m de profondeur comprend :

- *Alluvions fluviales quaternaires*, sables graveleux et limons silteux ;
- *Sables de la Puisaye*, dépôts sableux jaunes et fins de l'Albien supérieur ;
- *Argiles de Myennes*, dépôts sablo-argileux gris sombre de l'Albien moyen ;
- Sables de l'Albien inférieur, dépôts sableux fins et grossiers cimentés ;
- Argiles du Barrémien, grès du Hauterivien puis calcaire du Portlandien.

Vient ensuite la série géologique du Bassin parisien.

Les reconnaissances de sol, menées en plusieurs campagnes entre 1976 et 1979, avaient pour buts principaux d'obtenir des paramètres mécaniques précis et de déterminer la géométrie des couches de sol. La stratigraphie reconnue est tabulaire, à deux exceptions près : le toit des argiles de Myennes s'enfonce vers le nord, et l'épaisseur des sables de la Puisaye s'accroît proportionnellement ; le toit des sables de la Puisaye est creusé par des paléo-chenaux et des chaudrons remplis d'alluvions quaternaires, augmentant l'épaisseur de ces dernières au détriment des premiers.

Par ailleurs, les alluvions ont été vibrocompactées sous les ouvrages principaux lors de la construction de la centrale.

Afin de prendre en compte les requis vis-à-vis du risque d'inondation de la plaine de la Loire, une plateforme de 5 m de haut a été construite autour des ouvrages.

3. Etude prédictive des tassements

Suite à la deuxième phase de reconnaissances, des études ont été effectuées en 1979 afin d'estimer les tassements des ouvrages. La méthodologie appliquée à l'époque consistait à séparer le tassement en deux :

- le tassement immédiat calculé avec une déformation volumique nulle ($\nu = 0,5$) et des modules court terme non drainés ;
- le tassement différé dû aux phénomènes de consolidation ($\nu = 0,3$) avec des modules long terme drainés, sur une échelle de temps beaucoup plus grande.

Le module drainé dans les alluvions a été choisi à partir des essais de chargement effectués après vibrocompactage. Les paramètres des autres couches plus profondes ont été déterminés à partir des essais œdométriques. Le tassement calculé pour le Bâtiment Réacteur (BR) est de 261 mm au total avec 89 mm de tassement immédiat et 172 mm de consolidation (Figure 1). Les valeurs sont détaillées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Stratigraphie et modules dans l'étude prédictive de 1979.

Couche	Épaisseur (m)	Modules d'Young retenus dans les calculs (MPa)	
		E' drainé ($\nu = 0,3$)	Eu non drainé ($\nu = 0,5$)
Remblais	4,7	-	-
Alluvions	8,8	200	40
Sables de la Puisaye	10,0	50	60
Argiles de Myennes	8,0	45	100
	8,0	55	
	8,0	65	
	8,0	75	
	8,0	85	

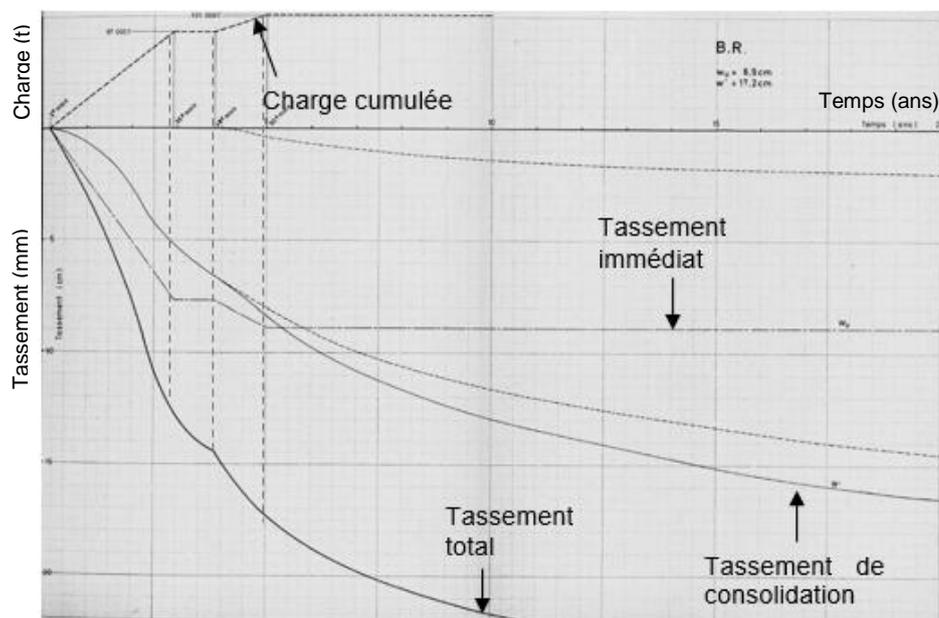


Figure 1. Résultats de l'étude de 1979 – tassement du BR (en mm) en fonction du temps.

4. Suivi de la charge et des déplacements

Les courbes de chargement pour les principaux ouvrages sont données Figure 2. Cet article traite uniquement le tassement du BR, suivis depuis le début du chargement à l'aide de 20 mires topographiques réparties uniformément le long de la galerie annulaire de précontrainte, comme illustré Figure 3 et Figure 4.

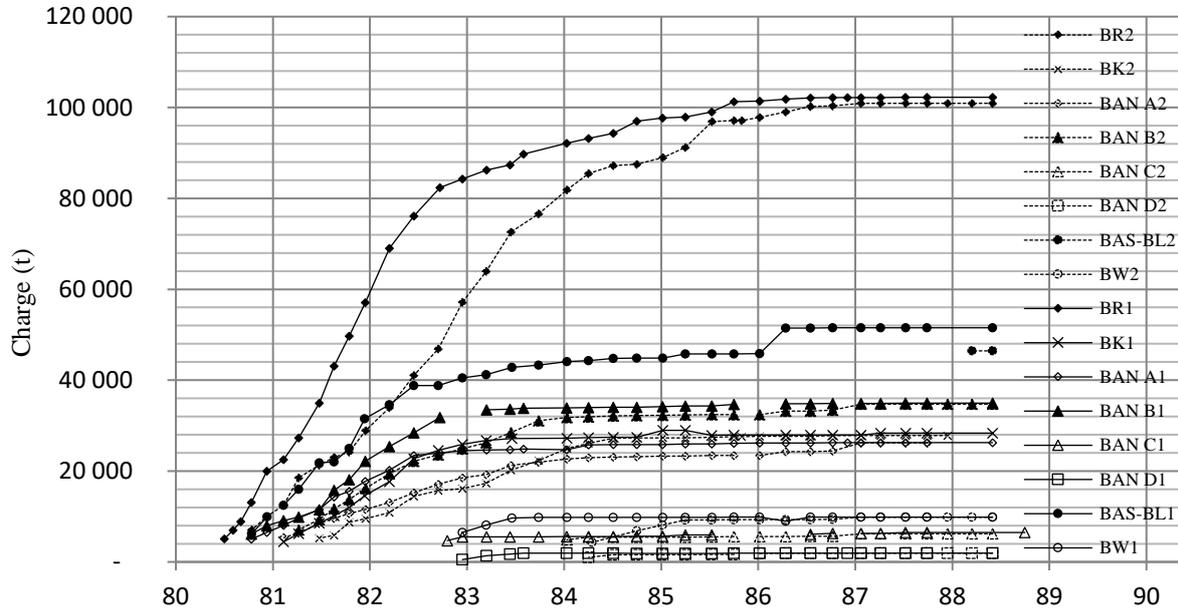


Figure 2. Charge (en tonnes) des principaux ouvrages en fonction du temps (en années).

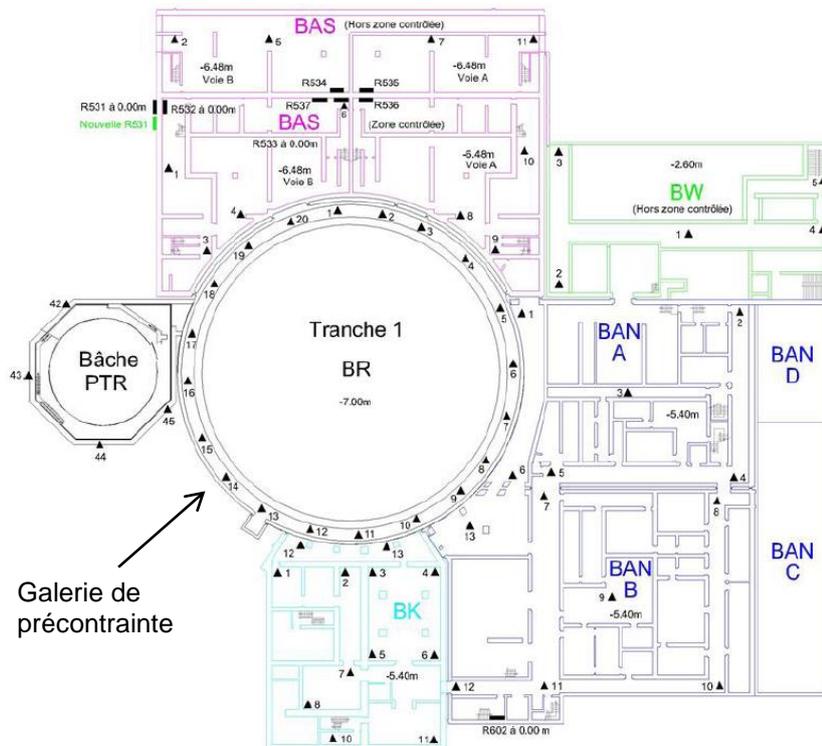


Figure 3. Dispositif d'auscultation pour le suivi des tassements des ouvrages.

Le tassement total mi-2016 (35 ans après le début du chargement) est très inférieur aux estimations : 130 mm pour la Tranche 1 et 116 mm pour la Tranche 2. Le basculement est faible. Dans la suite, il est négligé.

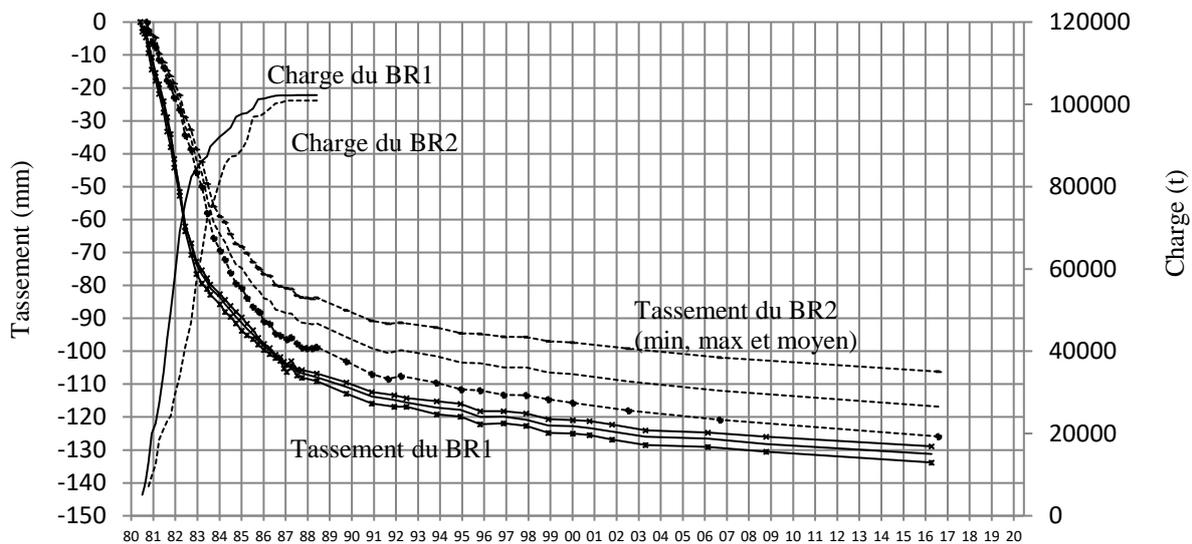


Figure 4. Tassement (en mm) pour les BR en fonction du temps (en années).

Dès 1987, il apparaît que les tassements ont été surestimés. Les raisons identifiées à l'époque sont le remaniement des échantillons lors du prélèvement, qui aurait empêché d'estimer correctement la surconsolidation des argiles, et le caractère non-représentatif des échantillons testés à l'œdomètre : au sein de l'argile de Myennes (qui est une argile sableuse) les échantillons les plus argileux étaient le plus souvent choisis, car ils semblaient plus propres et plus « intacts », mais ils correspondaient probablement aux parties les plus compressibles.

5. Retro-calcul et modélisation du problème

Afin de reproduire les observations, un modèle a été réalisé sous PLAXIS 2D (Figure 5). La géométrie est axisymétrique. Les radiers sont élastiques de module 10 GPa. Les épaisseurs et la charge sont issues des mesures de suivi (Figure 2).

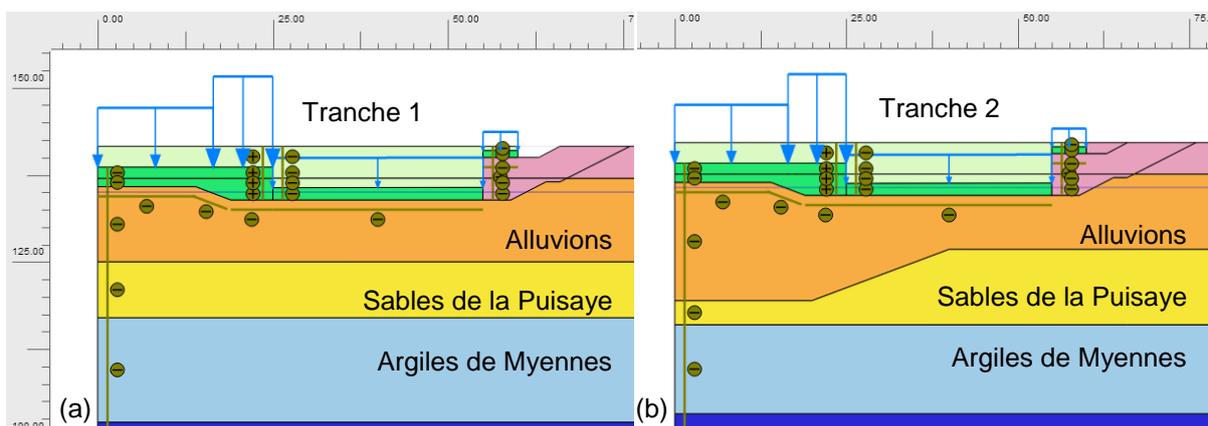


Figure 5. Illustration du modèle axisymétrique PLAXIS 2D pour la Tranche 1 (a) et 2 (b).

Les bâtiments adjacents au BR sont modélisés comme deux radiers annulaires concentriques, dont les dimensions et les charges sont équivalentes à celles des bâtiments. Pour reproduire les tassements mesurés, la stratigraphie sous chaque tranche est différenciée (contrairement à l'étude de 1979), notamment en prenant en compte l'existence d'un chaudron au droit de la Tranche 2 (Figure 5 b).

L'ancienneté des couches albiennes conduit à les modéliser surconsolidées, en contradiction avec les œdomètres initiaux, jugés non représentatifs en 1987.

En plus des essais géomécaniques, 3 essais de chargement grandeur nature ont été réalisés en 1979 (notés REM1-2-3, Figure 6). Chaque dispositif comprenait 25 tassomètres à bagues magnétiques (précision de l'ordre du millimètre) sur 50 m de profondeur. La zone a été chargée par du remblai monté jusqu'à la cote plateforme (environ 95 kPa), et les déformations ont été mesurées pendant 5 ans.

Les essais hydrogéologiques ont permis de définir la perméabilité des terrains. Le fluage n'a pas fait l'objet d'essais mécaniques, il a été ajusté sur les essais grandeur nature (de façon à retrouver le bon incrément de tassement entre les mesures faites entre 2 et 4,5 ans après le chargement ; sur la Figure 6, cela correspond aux deux courbes les plus à gauche pour chaque essai). La pertinence de cet ajustement a été contrôlée en modélisant également la station de pompage du site sur laquelle on dispose de mesures de tassements similaires.

L'ajustement contraint du modèle sur les essais grandeur nature permet de bien reproduire la dernière partie des courbes de tassements (entre 1989 et 2017 sur la Figure 4) des 2 BR avec le même jeu de paramètres (Figure 7).

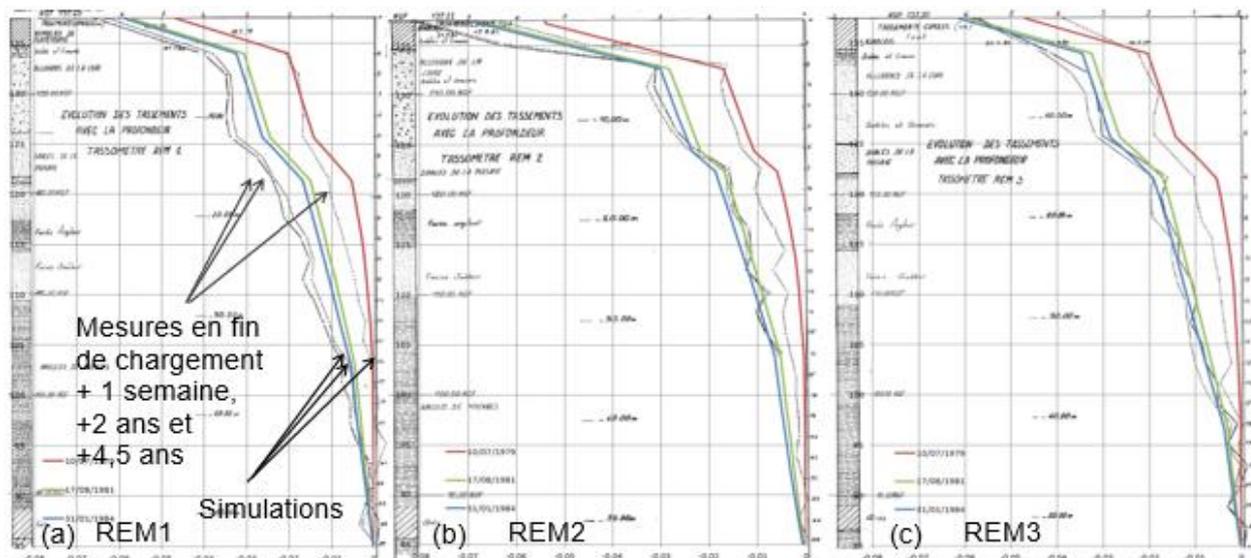


Figure 6. Comparaison entre les simulations des 3 tests grandeur nature et les mesures - tassement (en cm, échelle inversée) en fonction de la profondeur (en m).

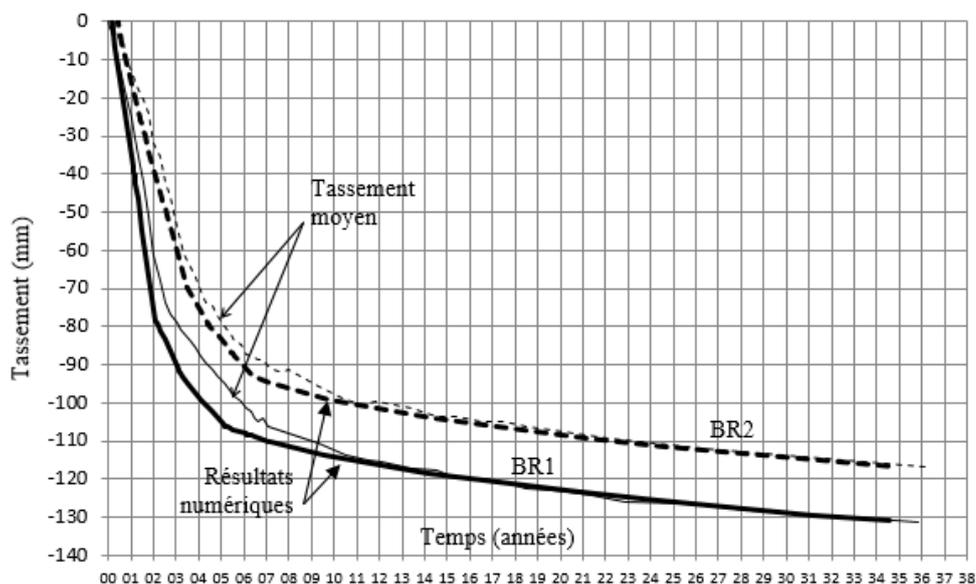


Figure 7. Résultats numériques du tassement des BR en fonction du temps.

6. Comparaison du modèle et de l'étude prédictive

Les tassements ont été inférieurs de moitié à ce qui était attendu. Des modules d'Young équivalents ont été recalculés à partir du modèle PLAXIS couches albiennes suivant les équations (1), en se basant sur la distribution de contraintes issue du calcul numérique (Tableau 2).

$$E' = \frac{(1 + \nu') \cdot (1 - 2\nu')}{1 - \nu'} \cdot E_{\text{oed}} \quad \text{et} \quad E_{\text{oed}} = \frac{\sigma'_2 - \sigma'_1}{C_s \cdot \log \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1}} \cdot (1 + e_1) \quad (1)$$

Tableau 2. Paramètres élastiques équivalents du modèle PLAXIS, et de l'étude de 1979.

Couche	Epaisseur (m)	Accroissement de la contrainte effective moyenne (kPa)		Module d'Young réévalué E' (ν = 0,3) (MPa)	Module d'Young E' de 1979 (ν = 0,3) (MPa)
		σ'₁	σ'₂		
Remblais	4,7	-		-	-
Alluvions	8,8	-		200	200
Sables de la Puisaye	10,0	150	480	37	50
Argiles de Myennes	8,0	260	560	117	45
	8,0	340	620	140	55
	8,0	420	680	358	65
	8,0	500	755	409	75
	8,0	580	815	458	85

La principale source de conservatisme est très clairement la mauvaise estimation de la compressibilité de l'argile de Myennes : le module d'Young équivalent issu du modèle est de 290 MPa, contre 75 MPa estimés en 1979 (moyenne harmonique avec les valeurs du Tableau 1, incluant le comportement non drainé).

La qualité et la représentativité des échantillons sont identifiées comme la cause première de l'erreur d'estimation, comme mentionné au § 4. Par ailleurs, seuls les essais œdométriques semblent avoir été pris en compte dans le choix des modules, alors que des essais in-situ étaient également disponibles, en particulier des essais pressiométriques dans les argiles de Myennes (Figure 8), qui tendent à indiquer des caractéristiques géomécaniques bien meilleures.

D'après les essais pressiométriques, la moyenne des modules $E_M = 87$ MPa pour les argiles de Myennes, ce qui d'après la relation (2) donne $E' = 260$ MPa. Sur la base du rétro-calcul effectué à partir du modèle PLAXIS (Tableau 2, module équivalent $E' = 290$ MPa), ces essais semblent bien plus pertinents que les valeurs œdométriques retenues en 1979 (module équivalent $E' = 75$ MPa).

$$\frac{E'}{E_M} = 3 \quad \text{pour les argiles surconsolidées (NF P94-261 – Annexe J)} \quad (2)$$

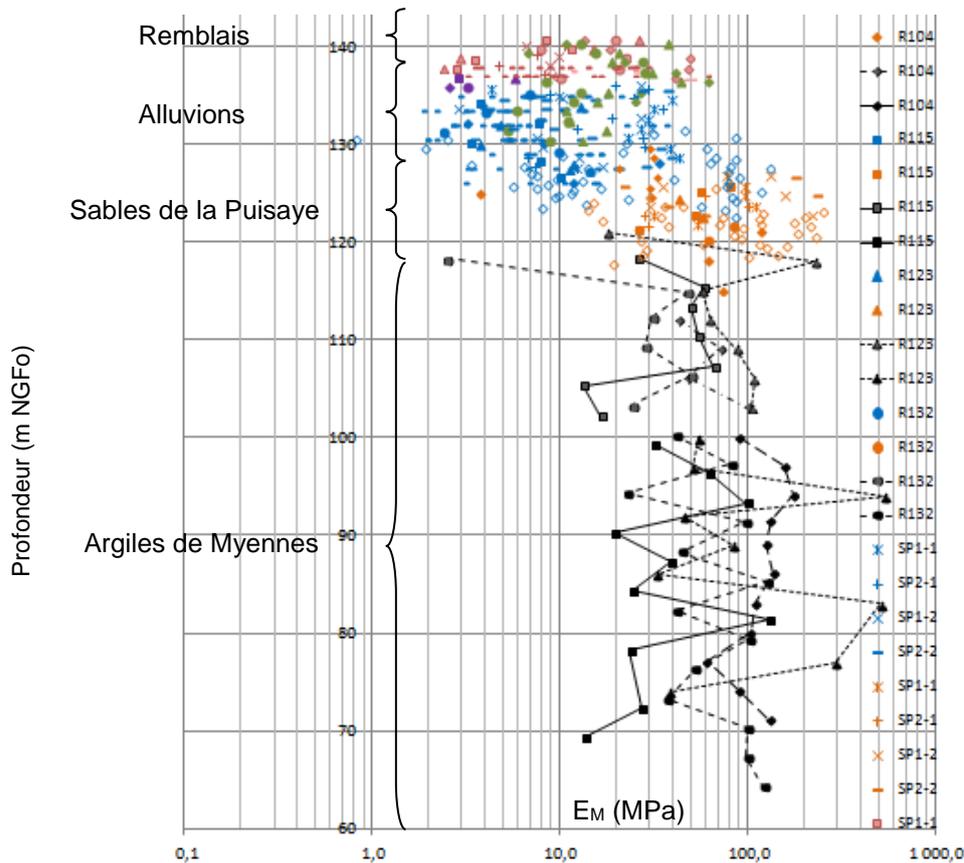


Figure 8. Modules pressiométriques Ménard E_M en fonction de la cote.

7. Application du modèle a un projet neuf

Le modèle présenté plus haut est voué à être utilisé dans la conception de projets neufs, afin d'augmenter la confiance dans les estimations de tassement. La présente application considère un projet neuf (Figure 9 a), de 142,3 m x 40,6 m, encastré de 17 m avec des charges sur le radier comprises entre 290 et 570 kPa ;

Une première étude a été confiée à un bureau d'étude externe, qui s'est basé sur les pressiomètres. Les déplacements calculés sont de 100 à 310 mm (Figure 9 b).

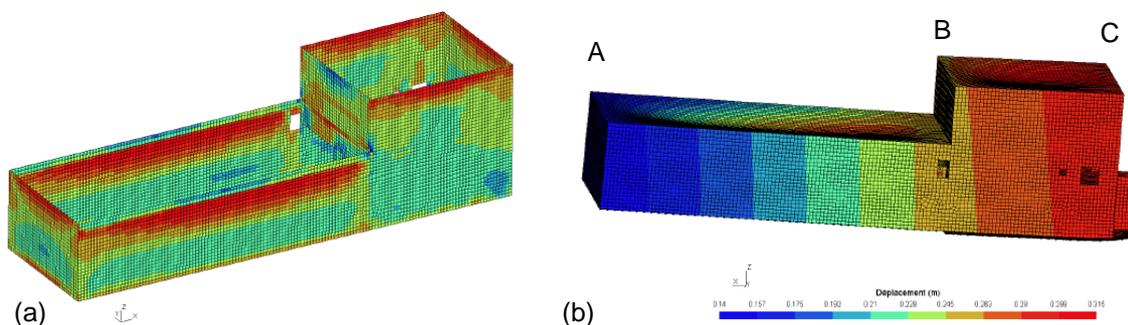


Figure 9. Design d'un projet neuf (a) et première estimation des tassements en mm (b).

Les résultats du calcul réalisé avec le modèle PLAXIS sont 20 à 80 mm de tassement (Figure 10). Les principaux écarts qui ont conduit aux valeurs de l'étude initiale ont été identifiées comme étant principalement :

- Le choix très pessimiste des caractéristiques de sol (valeurs des E_M les plus faibles mesurées sur site) pour un radier de cette dimension, qui impacte un grand volume de sol et pour lequel des moyennes semblent plus pertinentes ;

- Un seul type d'essai considéré, sans comparaison avec le reste des données ;
- Le manque global de connaissance du site en général et de ses conditions de sol, qui impacte le choix des valeurs de module.

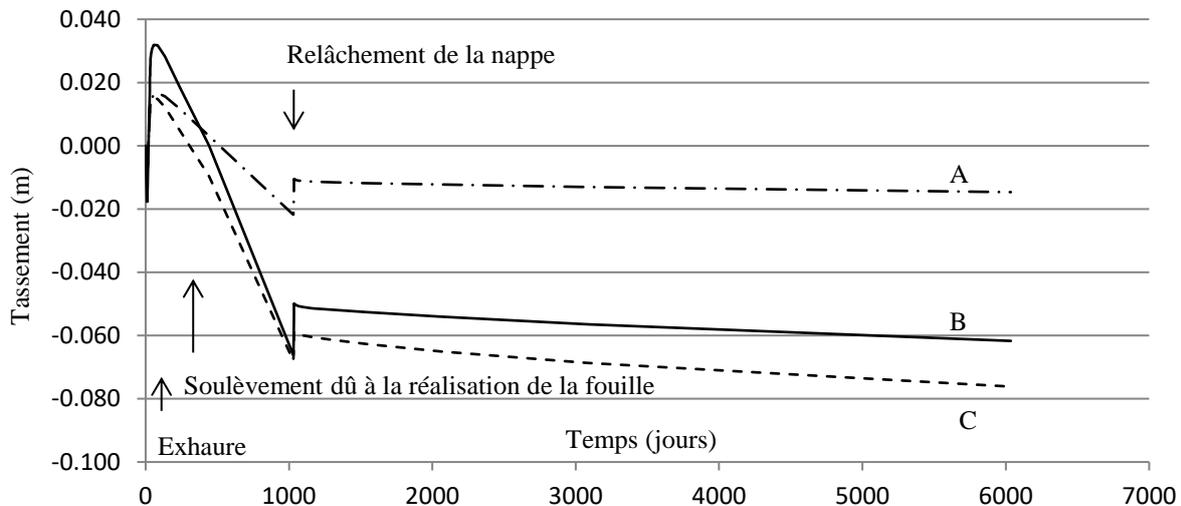


Figure 10. Tassement estimé pour un projet neuf en fonction du temps (points Figure 9).

8. Conclusion

Le calcul en retour du tassement apporte beaucoup d'informations sur le comportement des couches de sol. L'utilisation de tests grandeur nature était déjà une avancée importante pour la précision de l'estimation par rapport à l'étude prédictive initiale, uniquement basée sur les essais de laboratoire. Un modèle numérique tel que celui présenté dans cette étude est un outil supplémentaire très intéressant pour mieux appréhender ce comportement, y compris l'impact des aspects temporels (exhaure, fluage). C'est également un moyen efficace pour capitaliser l'ensemble du retour d'expérience des essais et des travaux.

Les étapes de développement futures envisagées sont d'utiliser un maillage 3D afin de modéliser des géométries complexes, et limiter l'impact des approximations sur le résultat. L'analyse d'un autre site avec la même méthodologie est aussi envisagée.

9. Références

- AFNOR. (2013). Justification des ouvrages géotechniques – Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 – Fondations superficielles NF P94-261.
- Alhusein M. (2001). Étude du comportement différé des sols et ouvrages géotechniques. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, Français. tel-00005992.
- Cuira F. & Simon B. (2008). Modélisation 3D simplifiée d'une plaque sur un multicouche élastique. *Revue française de géotechnique*, n°124.
- Combarieu O. (2006). Usages des modules de déformation en géotechnique. *Revue française de géotechnique*, n°114.
- Pecker A. & al. (1989). Étude numérique du tassement d'une fondation de grand diamètre sur argile surconsolidée. *Revue française de géotechnique*, n°47: 17-28.
- Pelletier B. & Depinois S. (2019). Settlement prediction, monitoring and back-calculation, Belleville nuclear plant case history. *Proceedings, ICCS2019*, 168.
- Wyllie D.C. (1992). *Foundation on rock*. London: Chapman & Hall.