

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Tassements de la centrale de Belleville sur Loire

Settlements of Belleville on Loire nuclear plant

Y. LEBLAIS, Ingénieur, SIMECSOL, Paris, France

G. BOUCHARD, Ingénieur, EDF, Tours, France

C. TILLARD, Ingénieur, EDF, Tours, France

H. GONIN, Ingénieur, SIMECSOL, Paris, France

RESUME - La centrale Nucléaire de BELLEVILLE sur LOIRE (1300 MW) est en construction depuis 1980. Le sous-sol est constitué par des alluvions sableuses sur quelques mètres d'épaisseur reposant sur une épaisse couche (50 m) d'argiles et de sables fins de l'Ere Secondaire. L'évaluation des tassements qui ont été pris en compte pour prévoir les possibilités de réglage et d'adaptation des ouvrages, a été faite par un calcul en élasticité linéaire sur la base d'hypothèses déduites des résultats d'essais en laboratoire. Les mesures faites depuis 4 ans montrent que les tassements réels sont deux fois moindres que ceux calculés et que l'évolution à long terme se déroule de manière plus favorable que ne le montraient les prévisions.

INTRODUCTION

Le site de BELLEVILLE sur LOIRE prévu pour la construction de quatre tranches nucléaires de 1300 MW est situé sur la rive gauche de la Loire à 100 km en amont d'ORLEANS. Il occupe une surface d'environ 140 hectares. Deux tranches sont actuellement en cours de construction.

La plateforme générale du site est remblayée à la cote NGF 141,60 pour les ouvrages de sureté (cru de 1856 = 139,90 au droit du site). Cette plateforme a été établie par la mise en place, après décapage des limons de surface, de 4 à 5 m de remblai.

Nous rendons compte, ci-après, des prévisions faites pour les tassements instantanés et différés sous les ouvrages et des résultats du suivi des mesures correspondantes.

CONDITIONS GEOLOGIQUES ET GEOTECHNIQUES

La succession géologique est la suivante, de haut en bas :

- Alluvions de la Loire, sableuses, sur 10 à 15 m d'épaisseur ;
- Sables de la Puisaye et Argiles de Myennes, qui sont des dépôts transgressifs de l'Ere Secondaire (crétacé inférieur). L'épaisseur totale en est de 50 m. La topographie du sommet irrégulière témoigne d'une érosion, alors que la base repose sur un socle plan et horizontal formé par les sables aquifères de l'Albien (40 m d'épaisseur) et les calcaires du Portlandien.

La nappe de l'Albien est artésienne et sa charge atteint la cote NGF 148, alors que la charge de la nappe alluviale varie avec le régime de la Loire (environ 135 NGF).

Les caractéristiques géotechniques des différentes couches sont résumées ci-après :

Alluvions de la Loire

de 0 à 6-7 m $7 \text{ MPa} \leq q_c \leq 10 \text{ MPa}$,
 $0,4 \leq P_1 \leq 1,5 \text{ MPa}$
 de 6-7m à 10-15 m $q_c > 10 \text{ MPa}$,
 $P_1 \geq 2,0 \text{ MPa}$

Perméabilité moyenne $K \sim 3,2 \times 10^{-3} \text{ m/s}$

Granulométrie (figure 1).

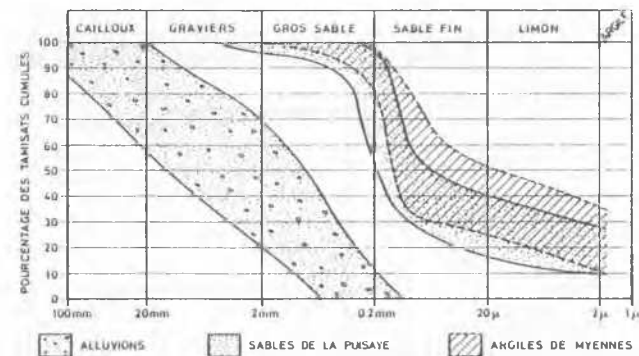


Fig.1 Granulométrie de terrains

Sables de la Puisaye

q_c généralement $> 20 \text{ MPa}$, passages à 10-15 MPa
 $P_1 > 3,5 \text{ MPa}$, E (pressiomètre) 40 à 60 MPa

$$\gamma_d = 16,5 \text{ kN/m}^3, \quad W \sim 23 \% \\ k_v = 0,5 \times 10^{-7} \text{ m/s}, \quad k_h = 10^{-5} \text{ m/s}$$

Echantillons sableux : $C_u = 50 \text{ kPa}$, $\varphi_u = 40^\circ$
 Echantillons argileux : $C_u = 100 \text{ kPa}$, $\varphi_u = 25^\circ$

E_u (triaxial, $k_0 = 1$) de 20 à 100 MPa
 Module oedométrique = 15 à 34 MPa
 pour $\sigma' = 500 \text{ kPa}$
 Module drainé $E' = 9,2$ à 100 MPa suivant la composition granulométrique.

Sur la figure 2 est portée une synthèse des courbes de variation du module E en fonction du temps pour les essais de compressibilité à l'appareil triaxial, sous la forme de la variation du rapport $\frac{E(t)}{E(24H)}$, les essais ayant montré que E ne variait plus au bout de 24 heures dans les conditions de l'essai. On remarquera le rapport d'au moins 2 entre les modules drainés et non drainés.

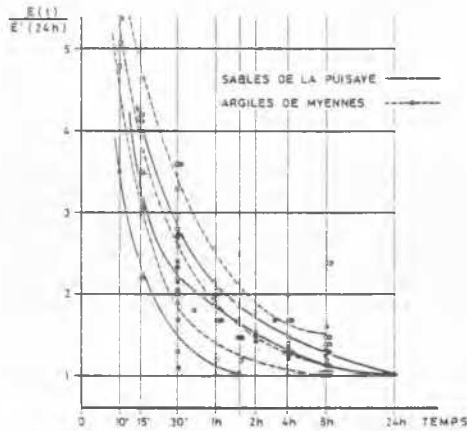


Fig.2 Module E en fonction du temps

L'évolution du coefficient de Skempton A en fonction de la déformation est reportée sur la figure 3 pour deux essais CU au triaxial : A est inférieur à 0,33 et a tendance à diminuer lorsque le pourcentage de déformation augmente, ce qui marque le caractère dilatant de ces sols au voisinage de la rupture.

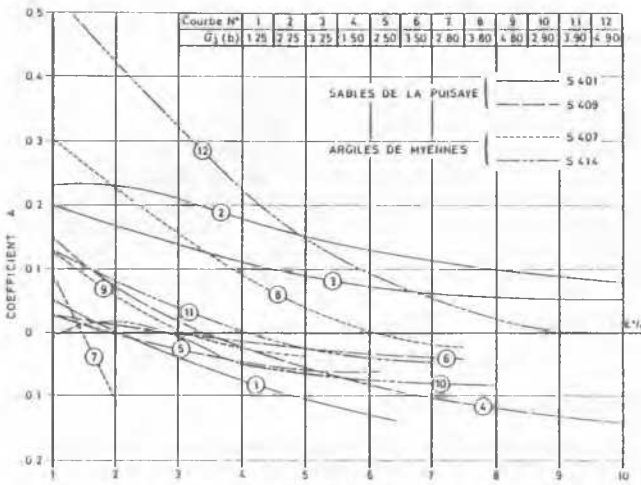


Fig.3 Coef. A en fonction de la déformation

Argiles de Myennes

$q_c > 30$ MPa , $P_c > 4$ MPa
 E^c (pressiomètre) 40 à 100 MPa

Présence de montmorillonite (20 à 40 % de la fraction argileuse).

$\gamma_d = 17,1$ kN/m³ , $W \sim 21$ %
 $IP = 7$ à 35, $LL = 23$ à 70 %

$k_v = 4 \times 10^{-9}$ m/s , $k_h = 4 \times 10^{-7}$ m/s
 $C_u = 100$ kPa , $\varphi_u = 25^\circ$; $\varphi' = 30^\circ$

E_u (triaxial, $k_D = 1$) : de 40 MPa à 130 MPa (Figure 4)
 Module oedométrique : 10 à 30 MPa pour $G' = 400$ à 500 kPa
 Module drainé E' : 21 à 78 MPa (figure 2)

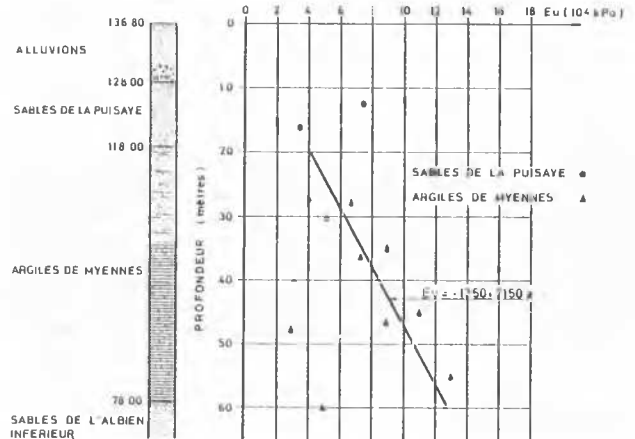


Fig.4 Module Eu en fonction de la profondeur

FONDATEMENTS DES OUVRAGES ET TRAITEMENT DU TERRAIN

Tous les ouvrages des flots nucléaires sont fondés sur radiers généraux (figure 5).

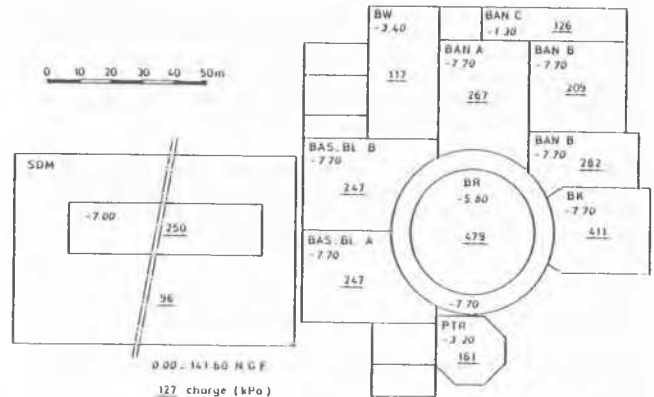


Fig.5 Niveaux de fondation et charges

Afin de limiter les tassements dus à la faible compacité et à l'hétérogénéité des alluvions de la Loire, un traitement par vibroflottation a été appliqué à la partie supérieure de cet horizon au droit de l'emprise des blocs usines ainsi que des réfrigérants atmosphériques.

CALCULS DES TASSEMENTS

Méthode de calcul

Les calculs de tassements ont été réalisés avec les hypothèses suivantes :

- sol homogène et isotrope constituant un milieu semi-indéfini formé de trois couches horizontales,

- comportement élastique du sol, à court terme comme à long terme,
- application de la loi de Terzaghi, (malgré le caractère gonflant observé),
- non prise en compte du fluage du squelette du sol.

Les tassements à court terme et à long terme ont été calculés séparément, le premier avec des valeurs correspondant au comportement non drainé et le second avec des valeurs drainées. Pour chaque bâtiment une courbe de tassement en fonction du temps a été établie par le cumul des valeurs à court terme et à long terme (voir figure 10).

Au droit de chaque ouvrage, les tassements ont été obtenus par cumul des valeurs dues à l'ouvrage lui-même et de celles dues aux ouvrages voisins, après prise en compte du décalage dans le temps de la construction des divers bâtiments.

Caractéristiques de calcul du sol

Elles ont été choisies en tenant compte des résultats des essais en laboratoire mais aussi de l'expérience.

TABLEAU I

TERRAINS	ALLUVIONS	SABLES	ARGILES				
			118.. 110	110.. 102	102.. 94	94.. 86	86.. 78
COTE	136 5.. 128	128.. 118	118.. 110	110.. 102	102.. 94	94.. 86	86.. 78
Eu (MPa)	40	60	100	100	100	100	100
E' (MPa)	200	50	45	55	65	75	85

Les valeurs utilisées à long terme sont sensiblement plus élevées que celles résultant des essais afin de tenir compte de la majoration des tassements induite par le cumul des valeurs à court terme et long terme ; la valeur de 200 MPa affectée aux alluvions de la Loire n'a pour but que d'éliminer cet horizon des causes de tassements à long terme.

Caractéristiques des charges

Elles sont données en charges uniformément réparties sur la figure 5.

Le planning théorique des travaux est donné par la figure 6.

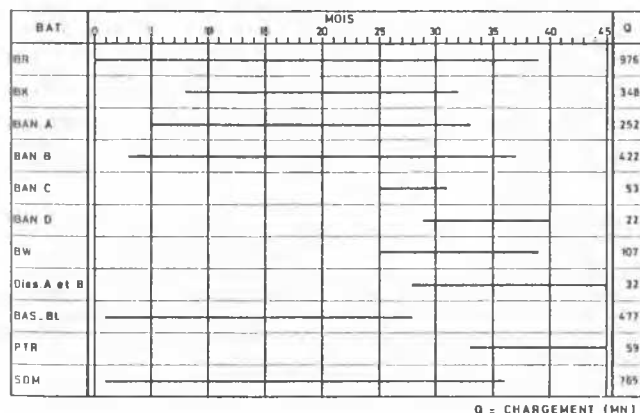


Fig.6 Planning de chargement théorique

Résultats des calculs

Les calculs ont été menés à différentes étapes (53e et 68e mois) de la construction de l'îlot nucléaire, et au temps infini.

La figure 7 fournit à titre d'exemple les principales valeurs des tassements calculés au bout d'un temps infini dans l'hypothèse de radiers rigides. Ont également été reportés pour les principaux bâtiments les vecteurs caractérisant le basculement des ouvrages. Pour le réacteur le tassement calculé est quasi uniforme et de l'ordre de 28 cm moyen avec un léger basculement vers les bâtiments des auxiliaires nucléaires (BAN).

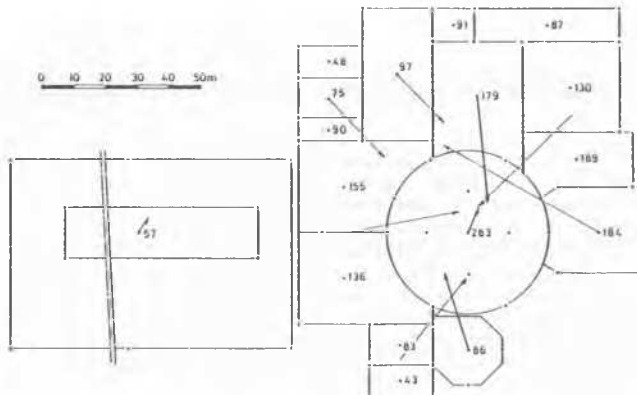


Fig.7 Tassements calculés à l'infini (mm)

MESURES DES TASSEMENTS

Pour suivre le comportement du sol et caler les calculs, deux dispositifs de mesures ont été mis en oeuvre :

- un plot d'instrumentation au droit de l'éventuelle tranche 3 chargée en mai et juin 1979 par le remblai général de la plateforme ;
- un suivi topographique de tous les ouvrages des tranches 1 et 2, opération systématique sur les sites nucléaires français.

Plot d'instrumentation

Il est équipé de trois tassomètres profonds ancrés à 54 m de profondeur à la base des argiles de Myennes et de quatre capteurs de pression interstitielle, un dans les sables de la Puisaye et les trois autres répartis sur la hauteur des argiles de Myennes.

Depuis la mise en place du remblai (5 m, soit 100 kPa) les deux capteurs profonds enregistrent une charge qui décroît régulièrement (1 à 2 m sur 5 ans).

Les mesures mettent en évidence que le tassement des sables de la Puisaye a été acquis dans la 1ère année et que dans les argiles de Myennes les tassements continuent à évoluer. Les valeurs cumulées en tête obtenues sont de 5 à 7 cm.

Mesures topographiques sur les bâtiments

Le nombre de repères topographiques varie de

5 pour les bâtiments Diésel à 20 pour le Réacteur.

Les mesures débutent dès l'achèvement des fondations et sont faites en moyenne tous les trois mois. Pour le réacteur de la tranche 1, les mesures ont débuté à mi-1980 et portent donc sur près de quatre ans.

En janvier 84, les tassements moyens de la tranche 1 étaient de l'ordre de 8,5 cm sous le réacteur et de 6 cm sous les bâtiments adjacents. Sur la figure 8 sont portées les inclinaisons des ouvrages selon l'axe de l'usine.



Fig. 8 Tassements différentiels TR1 au 12/1/84

Les courbes d'évolution des tassements en fonction du temps et de la charge (figure 9) font apparaître une relation linéaire entre charge et tassements. Pour le réacteur 1, si la stabilisation durant deux mois en 1981 de la charge à 350 MN n'a pas entraîné de ralentissement mesurable des tassements, en revanche celle de 1982-1983, à 870 MN durant 9 mois, a entraîné une diminution sensible de la vitesse qui s'accroît à nouveau dès la reprise du chargement.

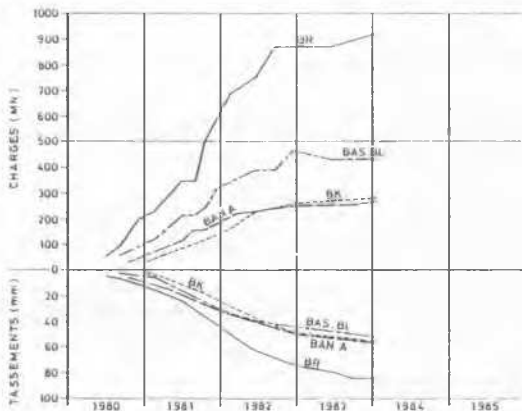


Fig. 9 Tassements mesurés, tranche 1

COMPARAISON DES MESURES ET DES RESULTATS DE CALCUL

Tout en disposant de mesures sur une période de 4 ans pour les ouvrages les plus anciens, nous n'avons pas encore d'éléments pour juger de l'évolution dans le temps des tassements sous une surcharge constante puisque pour tous les ouvrages l'accroissement de charge se poursuit.

Sur la figure 10, pour le réacteur 1, la courbe des tassements mesurés suit, en valeurs inférieures, la courbe de calcul des tassements instantanés (janvier 84 : 8,5 cm mesuré pour 10 cm calculé). Le terme différé pris en compte dans les calculs ne se retrouve donc pas dans les mesures.

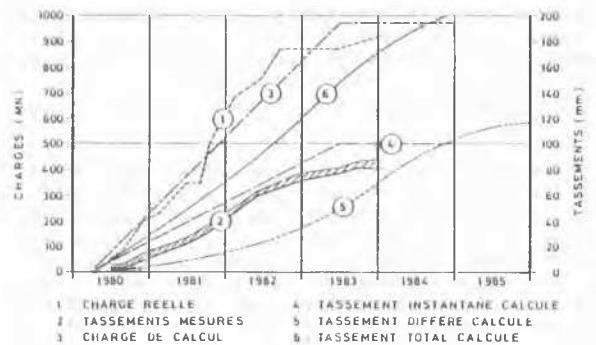


Fig. 10 Tassements mesurés et calculés BR-TR1

A ce jour où rien ne permet donc de préjuger du comportement différé des argiles profondes, une extrapolation de la courbe mesurée, selon une allure voisine de celle de la courbe calculée, conduirait à un tassement à l'infini de 13 à 15 cm sous le réacteur, soit la moitié des valeurs calculées.

L'obtention de telles valeurs par la méthode de calcul utilisée nécessiterait la prise en compte de modules plus élevés de l'ordre de 100 MPa pour les 15 m supérieurs et 150 MPa pour les argiles.

En revanche les gisements calculés des directions de plus grande pente des radiers sont cohérents avec ceux déduits des mesures, ce qui confirmerait le choix fait dans le calcul de l'homogénéité et de l'horizontalité des couches.

CONCLUSIONS

L'examen des tassements amène donc les éléments suivants :

- Après 4 ans, les terrains semblent encore en phase de déformation à court terme à comportement pseudo-élastique ;
- Le cumul, dans le calcul, des tassements à court terme et à long terme, critiquable sur le plan théorique, semble l'être également sur le plan pratique ;
- Les conditions de ce site (banc argileux puissant et homogène en profondeur) en font un exemple privilégié pour l'étude des tassements différés et de l'incidence de l'évolution et de la répartition des charges apportées par la Centrale ;
- Le calcul en élasticité linéaire, avec les paramètres déduits des essais de compressibilité sur échantillons, et en considérant des couches de terrains homogènes et horizontales, a donné des résultats intéressants, en valeur relative, mais surestimés.

REFERENCES

Working Group From E.D.F/SEPTEN. The use of soil improvement techniques in the realization of the french nuclear power programme. VIIIe Congrès Européen de Mécanique des Sols HELSINKI 83.