

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.

OBSERVATIONS DU RADIER DU CAISSON DE LA CENTRALE NUCLEAIRE DE BUGEY I

BUGEY I - NUCLEAR POWER PLANT'S VESSEL-OBSERVATIONS ON THE FOUNDATION RAFT
 НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ФУНДАМЕНТНОЙ ПЛИТОЙ ПОД КОТЛОМ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ВУГЕЙ-1

M. FARHI, Ingénieur-Société MECASOL-Paris
 J. FLORENTIN, Directeur-Société MECASOL-Paris
 A. MOREL, Ingénieur - Electricité de France-Lyon
 J. RAUD, Ingénieur - Electricité de France-Paris (France)

RESUME. La Centrale Nucléaire de BUGEY I, située dans la vallée du Rhône, repose sur un dôme constitué de molasse, terrain sablo-gréseux d'âge Miocène, de forte compacité. Cette première tranche comporte un caisson en béton précontraint fondé au moyen d'un radier carré en béton armé, ayant 45 m de côté et 5 m d'épaisseur, qui reporte sur le terrain une charge totale voisine de 125 000 tonnes. Les travaux ont été réalisés à l'abri d'une enceinte étanche qui a permis un rabattement de nappe par pompage. Le radier est équipé d'un dispositif d'auscultation comprenant essentiellement des repères topographiques, des thermo-sondes et des témoins sonores. A partir d'une certaine époque, les tassements mesurés sont sensiblement linéaires en fonction de la charge; le radier prend une concavité vers le haut. Des calculs "a posteriori" permettent de rendre compte des déformations de cet ouvrage en choisissant des modules de déformation convenables.

1 - Observations effectuées sur le Radier du Caisson

Le site du Bugey se trouve sur la rive droite du Rhône, à 30 km à l'Est de Lyon. Les caractéristiques du fleuve permettent l'équipement de plusieurs tranches. (fig.1)

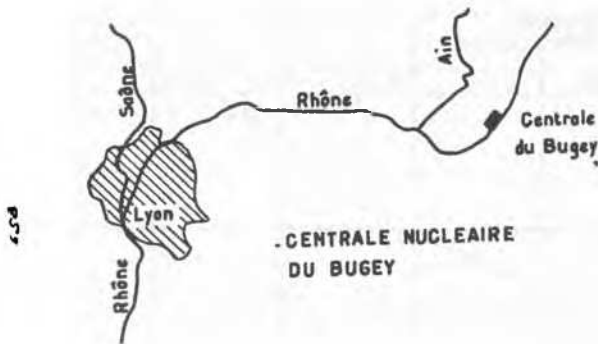


Fig. 1 - Croquis de situation

La "tranche 1", dont la construction se termine, aura une puissance de 560 MWe. Le réacteur nucléaire, du type uranium naturel, graphite, gaz carbonique, est contenu dans un caisson en béton précontraint.

L'étendue située entre le Rhône et son affluent l'Ain est constituée par une grande plaine alluviale. Le choix du site provient de la découverte, directement sous ces alluvions et à une dizaine de mètres de profondeur, d'un dôme de "molasse de Saint-Fons" dont les dimensions sont en plan d'environ 35 ha. A l'extérieur de ce dôme, les alluvions reposent sur de l'argile fluvio-la-

custre. Le substratum calcaire se trouve à 80m de profondeur.

Le terme de molasse désigne l'ensemble des dépôts détritiques du Miocène dans la vallée du Rhône. C'est un sable jaune clair, fin, formé d'un matériel alpin quartzo-feldspathique, très compact, consolidé de façon erratique en grès par un liant calcaire.

Description sommaire de l'ouvrage - Rabattement de la nappe.

Le caisson en béton précontraint a une forme cylindrique il mesure 55m de haut et 28m de diamètre extérieur. L'ensemble du caisson et de son contenu pèse environ 90 000t et repose sur un radier (fig.2) par l'intermédiaire de 18 poteaux répartis sur une couronne de 13m de rayon moyen. Entre caisson et poteaux sont interposés des appuis de néoprène. Le poids total, radier compris, est voisin de 125 000t.

Le radier est un bloc de béton armé carré, ayant 45m de côté et 5m d'épaisseur active; il est raidi sur ses quatre côtés par un mur de 7m de haut et 1m d'épaisseur

Le calcul préalable de cette structure en béton a été fait par l'Entreprise CITRA qui travaillait en liaison avec le Bureau MECASOL. Un ajustement a permis de définir deux déformées du radier et du sol, qui coïncident sensiblement. La réaction du sol considérée a une valeur constante dans toute la partie centrale, égale à 90% de la pression moyenne. Elle croît ensuite de façon sensiblement linéaire jusqu'à l'angle du radier où elle atteint 140% de la pression moyenne. (Launay - 1970)

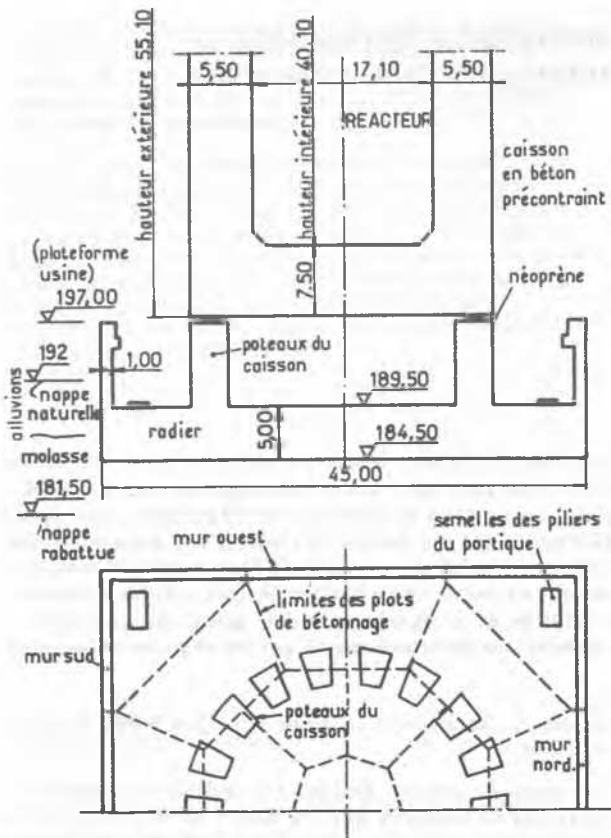


Fig. 2 - Fondations du Réacteur

La plate-forme de l'usine est à la cote 197 NGF; le dessus du radier à 189.50 et le dessous à 184.50. La nappe phréatique naturelle est à 192. Pour pouvoir exécuter les travaux à sec, l'ensemble de la tranche, sauf la prise d'eau, a été englobé dans une enceinte étanche. Celle-ci est constituée de 182m de murs panneaux profonds de 15m et épais de 0.80m qui formaient soutènement sur 2 côtés de la fouille et d'un voile mince moulé dans le sol de 375m s'ancrant dans la molasse. Huit puits de décompression de 30 à 40m de profondeur ont été forés dans la zone du radier et équipés de pompes. Le débit pompé pour rabattre la nappe d'environ 10m et empêcher la mise en bouillasse des sables est resté inférieur à 3 l/s.

Le bétonnage du radier a été effectué par plots, de l'extérieur vers l'intérieur, échelonnés dans le temps de 3 semaines. Un dispositif d'auscultation (fig.3) a été mis en place. Il comprend essentiellement des extensomètres à corde vibrante, des thermosondes et 23 repères topographiques.

La fig.4 montre l'évolution dans le temps de la charge sur le sol.

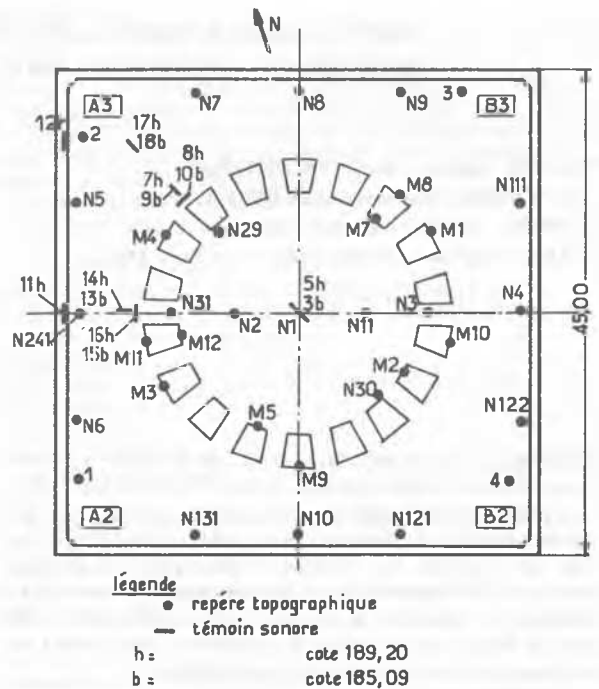


Fig. 3 - Points observés

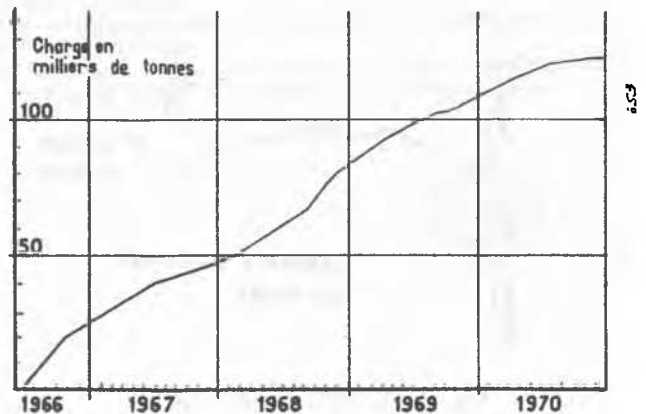


Fig. 4 - Evolution de la charge sur le sol

II - Essais de Laboratoire

1 - Echantillons naturels

Dans une première phase, les essais d'identification et de stabilité ont porté sur 16 échantillons intacts: 12 prélevés à la percussion et 4 prélevés à la rotation, le tout dans le sondage 103. Ce sont des sables molassiques gris ou jaunes, plus ou moins indurés ou grésifiés. Le tableau suivant donne la moyenne générale par type de prélèvement des différents essais faits sur chaque échantillon.

	w%	γ_t/m^3	γ_d/m^3	γ_s/m^3	C03Ca	Rcbar	ϕ^0	C'bar
Moyenne éch. prélevés à la percussion	17,5	2,09	1,79	2,70	20,5%	1,18	39	0
Moyenne carottes prélevées à la rotation	10,5	2,10	1,85	2,64	27,4%	-	-	-

Les échantillons ne sont pas saturés. L'analyse minéralogique d'un échantillon de sable a donné: Calcite 20% Quartz 46% - Silice combinée 18% (illite, chlorite ou montmorillonite). On a tracé sur la fig.5 les 2 fuseaux A et B contenant l'ensemble des 12 courbes granulométriques et sur la fig.6 les courbes moyennes de compressibilité des échantillons à la percussion et des carottes.

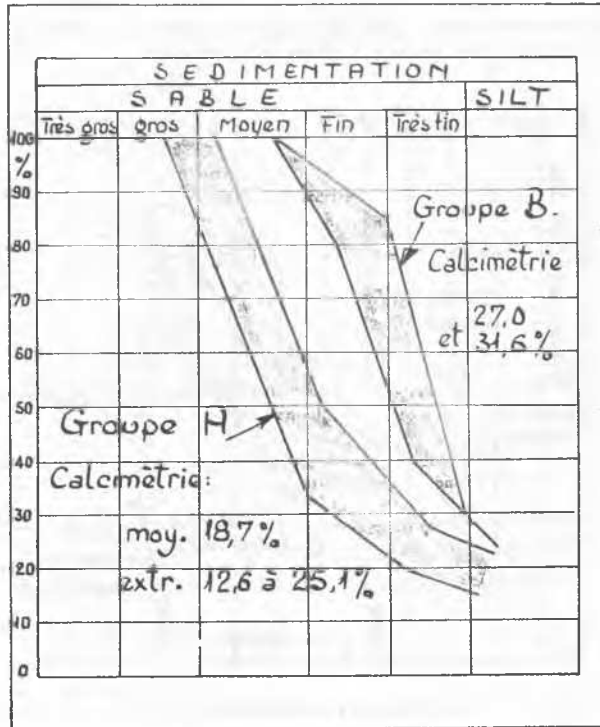
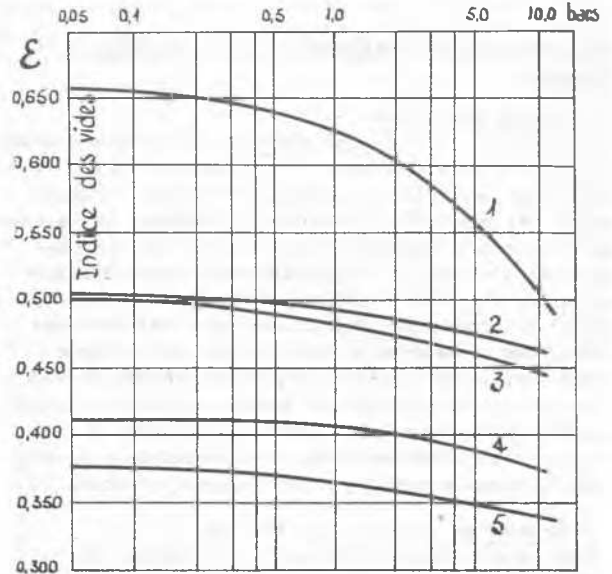


Fig. 5 - Fuseaux granulométriques

Dans les essais triaxiaux consolidés drainés, les angles extrêmes sous lesquels on voit l'origine des cercles de Mohr à la rupture varient avec l'étreinte et la densité. Leur valeur moyenne est de 39° avec des extrêmes de 33° et 46° ; cet angle tend à augmenter avec la teneur en C03Ca. Le coefficient de compressibilité C moyen entre 1 et 8 bars est de 0,031 pour les sables et de 0,025 pour les sables indurés.

2 - Echantillons reconstitués

Dans une seconde phase, on a étudié la résistance au cisaillement et la compressibilité de matériaux reconstitués en provenance de 4 autres sondages du site, artificiellement compactés à diverses densités en vue de rechercher un processus équivalent au processus géologique. Les matériaux utilisés se classent dans le fuseau A vers sa limite fine.



- 1 - Echantillon reconstitué $\gamma_d = 1,63 \text{ t/m}^3$
- 2 - Moyenne Ech.(percuss.) $\gamma_d \neq 1,80$ "
- 3 - Echantillon reconstitué $\gamma_d = 1,80$ "
- 4 - Moyenne Ech.(carottes) $\gamma_d \neq 1,90$ "
- 5 - Moyenne Ech.(percuss.) $\gamma_d \neq 1,95$ "

Fig. 6 - Courbes moyennes de compressibilité

Les essais triaxiaux (c.d.) ont donné les caractéristiques suivantes :

γ_t/m^3	ϕ^0	C' bars
1,6	32°	0,1
1,8	30°	0,4
1,9	28°	2,0

On note que pour $\gamma_d = 1,80$ à $1,85 \text{ t/m}^3$ $\phi' = 35^\circ$ pour les échantillons naturels et 33° pour les reconstitués. Deux essais de compressibilité ont été réalisés avec des γ_d initiaux de 1,6 et 1,8 t/m^3 . Ils donnent respectivement $C = 0,110$ et $0,041$. Les échantillons naturels sont moins compressibles que les échantillons reconstitués. On peut tirer des essais triaxiaux un module de déformation $E'' = (\sigma_1 - \sigma_3) / \Delta \epsilon$. Pour rester du côté de la sécurité dans le calcul des tassements à prévoir, on a considéré des déformations $\Delta \epsilon = 1\%$ qui donnent en moyenne pour des étreintes de 3 à 6 bars $E'' = 200 + 100 \sigma$. Pour des déformations de 0,5%, on aurait des valeurs plus élevées $E'' = 120 + 195 \sigma$. Cependant, les essais triaxiaux permettent de déterminer théoriquement le module d'élasticité E et le coefficient de Poisson ν . Compte tenu de la précision des mesures, ν est compris entre 0,44 et 0,50 et $E = 200 + 115 \sigma$ en moyenne (avec $\Delta \epsilon = 1\%$).

Avec cette loi et un radier rigide, en tenant compte d'une réduction de Mindlin (pour fondation enterrée) et de la présence de zones rocheuses incompressibles, ce qui ramène à une loi apparente appliquée à la surcharge de $E = 340 + 197 \sigma$, le calcul a donné 60mm en tenant compte de la surcharge par rapport au poids des terres de l'ordre de 85 000 t. Comme on le verra, les tassements réels ont été plus faibles.

III - Mesures de Nivellement et Interprétation de ces Mesures.

1 - Intérêt des mesures

L'importance de l'ouvrage à construire, la nécessité de connaître le comportement de sa fondation durant l'exploitation, enfin la construction de tranches futures, rendaient impérative l'exécution périodique de mesures de nivellement topographique du radier, aussitôt que possible. En effet, si l'ingénieur de structure a besoin de partir d'un état de référence connu: achèvement du radier ou achèvement des poteaux pour définir l'état initial des contraintes et déformations, le réacteur étant simplement posé sur les poteaux, le Mécanicien des sols doit tenir compte de toutes les phases successives de travaux depuis le début des terrassements. Bugey I sera une éprouvette en vraie grandeur permettant de mieux conditionner les tranches suivantes.

2 - Repères de nivellement - Mesures

Vingt trois repères ont été posés sur le radier dès la coulée du plot correspondant : 7 dans la zone centrale, 4 aux milieux des côtés, 8 aux quarts des côtés et 4 aux coins. Dès l'achèvement du radier, ces 4 derniers ont été supprimés et remplacés par 16 repères aux coins des bases des piliers du portique. L'ensemble est reporté sur la fig.3. Ultérieurement, 11 repères ont été fixés sur les poteaux supportant le réacteur : 7 à l'extérieur et 4 à l'intérieur. Les nivellements étaient rattachés à 2 pieux fixes situés à environ 470m au Nord-Ouest et 160m au Nord du centre du radier et suivis depuis le 1.11.65. Bien que les mesures aient été faites au dixième de mm, leur précision doit être de l'ordre de 0,3 à 0,5mm.

Le radier ayant été coulé en 21 plots successifs, de la périphérie vers le centre, les 23 repères initiaux ont été mis en place à des dates différentes durant les 5 mois nécessités par le bétonnage des plots; les plus vieux repères sont ceux des coins (T) et le dernier le N1 au centre. Ce processus minimise le tassement réel des plots coulés en dernier et surtout du centre.

3 - Historique

Rappelons quelques dates importantes dans la "vie" du radier :

1. 19.07.66 bétonnage du 1er plot (mise en place des repères T1 - T4)
2. 14.12.66 radier achevé (mise en place du repère N1)
charge totale : 24715 t
3. 17.03.67 achèvement des poteaux du réacteur
charge totale : 31070 t
4. 17.09.69 arrêt des pompages
charge totale : 103113 t

5. 27.05.71 tassement maximal enregistré
charge totale : 123954 t

L'ensemble des nivellements faits à une date donnée avec une périodicité variable était groupé sous le nom "d'opérations" numérotées de 1 (19.07.66) à 61 (07.09.71).

IV - Résultats

1 - Evolution des tassements

On a reporté sur la fig.7 la variation, en fonction de la charge totale transmise au sol depuis le début du bétonnage des plots du radier, du tassement moyen respectivement : de la zone centrale, des 4 coins, de l'ensemble des repères du radier et des poteaux du réacteur. La période de construction du radier et celle des poteaux est indiquée, des lignes de rappel donnent le numéro et la charge d'un certain nombre d'opérations.

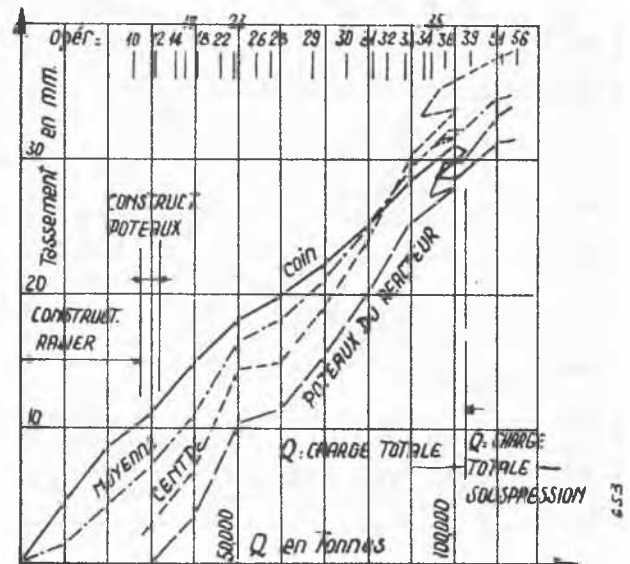


Fig. 7 - Evolution des tassements à partir de la pose de chaque repère

Durant le bétonnage, le tassement moyen s'obtient en affectant d'un tassement nul les repères non encore créés; au début, il a l'allure d'une courbe de recompression, le gradient du tassement en fonction de la charge augmente régulièrement. Entre les opérations 19 (22.08.67 - 42 500 t) et 28 (15.07.68 - 57 672 t), on observe une anomalie sur tous les tassements observés, qui pourrait être due à une irrégularité des pompages et surtout au gradient de température entre les 2 faces du radier.

Entre les opérations 28 (15.07.68 - 57 672 t) et 30 (30.10.68 - 75 270 t), le gradient reste sensiblement le même (4mm/10 000 t). Puis le centre tasse plus que la moyenne générale. Durant les opérations 39 à 44 (arrêt des pompages et bétonnage des puits) la nappe remonte de 5m et la charge transmise au sol est diminuée de la sous-pression de 10 000 t environ, entraînant une diminution des tassements de l'ordre de 2mm.

Après la remontée de la nappe, entre les opérations 44 (13.10.69 - 103.413 t) et 51 (29.07.70 - 120.745 t), on retrouve le même gradient de 4mm/10 000 t. A partir de l'opération 54 (17.11.70), la charge appliquée a atteint à 100 t près sa valeur maximale (124 059 t), on n'observe plus que des fluctuations inférieures au mm autour d'un tassement moyen de 35 à 36mm, comparable à celui observé sur d'autres sites nucléaires.

(Florentin - 1966) - (Lamiral - 1965)

2 - Déformée du radier.

On a reporté sur la fig.8 la variation de la déformée

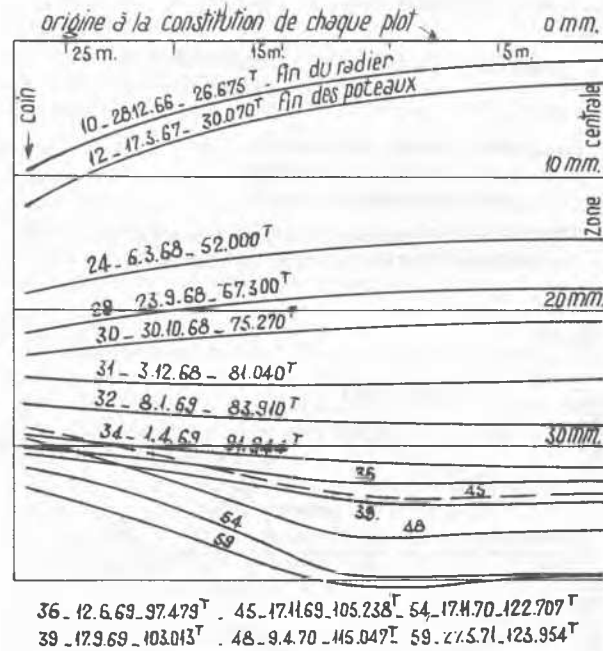


Fig. 8 - Déformée moyenne du radier, suivant une demi-diagonale à partir de la pose de chaque repère

moyenne du radier suivant une demi-diagonale. Dès l'opération 10 (28.12.66), quelques jours après l'achèvement du radier, on constate que le tassement est très faible au centre et croît vers le milieu des côtés puis vers les coins. Tout se passe comme si la charge du plot central et des 8 plots adjacents était transférée à la couronne périphérique plus ancienne et plus rigide. Le radier a la forme d'une coupole concave vers le bas. Ceci est dû au chargement initial du radier de la périphérie vers le centre. Au fur et à mesure que la charge augmente, le tassement d'ensemble augmente avec une diminution de la flèche; à partir d'un certain instant, la concavité change de sens, elle est dirigée vers le haut. Lors de l'opération 59 (27.05.71 - 123 954 t), le tassement est maximal.

On peut se demander dans quelle mesure cette forme en dôme n'a pas soulagé le travail du béton, par suite de la précontrainte du sol qui s'est produite, en réduisant

ultérieurement la contrainte de traction du béton à la sous-face du radier. La déformée moyenne, suivant le demi-axe Est-Ouest, suit sensiblement la même évolution.

V - Mesure des Températures et des Déformations du Radier.

Dans les zones inférieures du radier, la température maximum du béton frais est atteinte quelques jours après sa mise en place, l'accroissement de température y est de 20° à 25°C. Au bout de quelques mois, après dissipation de la chaleur d'hydratation, le régime thermique se régularise (fig. 9). La température de la face inférieure est alors voisine de celle de la nappe d'eau du terrain: 12°C en fin d'été et 8°C en fin d'hiver. Dans la partie supérieure où les mesures n'ont commencé qu'assez tard, on enregistre des minima de 2°C l'hiver et des maxima de 15° à 20°C l'été, du moins tant que la "cave" (espace situé entre le haut du radier et le bas du caisson) est à l'air libre. Après sa fermeture, les températures de la partie supérieure restent pratiquement constantes. La variation avec les saisons du gradient de température complique un peu l'interprétation des mesures.

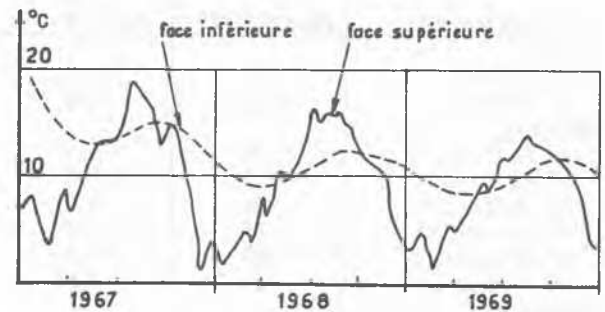


Fig. 9 - Evolution des températures du radier

Influence de la charge et du gradient de température sur le comportement du radier

La charge appliquée au radier a l'influence prépondérante sur son comportement mécanique. Mais la température a aussi un effet non négligeable, en particulier le gradient de température. Ce paramètre est bien moins important, il convient de séparer son effet. Deux méthodes ont été appliquées :

- MM. Wack et Guélin ont établi des relations statistiques entre la variation de flèche ou le taux de déformation et les variations de charge ou de gradient de température. La prise en considération du gradient thermique entre les faces diminue l'écart-type statistique.
- On peut choisir deux instants où la différence de température moyenne entre les deux faces est nulle : le 16.05.67 (charge totale 35 500 t) et le 10.06.69 (97 500 t). Ces dates présentent l'avantage que d'autres paramètres sont sensiblement constants : pour la première, les murs de périphérie du radier sont presque terminés et le radier a pratiquement atteint sa rigidité définitive. La seconde date se situe un peu avant l'arrêt des pompages et la remontée de la nappe phréatique

qui reste pendant toute cette période voisine de 18°C. En ce qui concerne l'effet des charges pendant la période étudiée, les deux méthodes ont conduit à des résultats assez voisins et nous avons retenu la seconde. Pour l'analyse des effets des variations de température, seule la première méthode est applicable. (Robert - Soulier - Malaval et al - 1969). Le tableau suivant donne les principaux résultats obtenus au cours de cette période pendant laquelle la charge s'est accrue de 62 000 t.

1) Flèches du radier

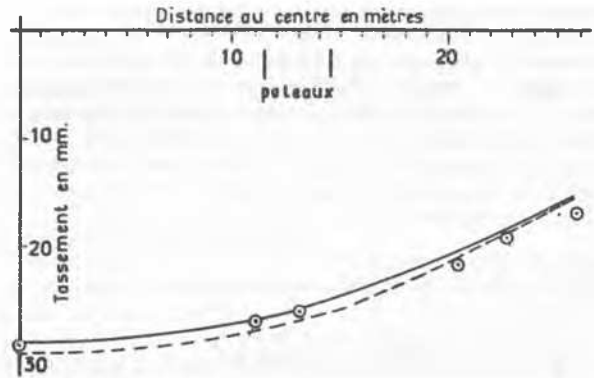
Différence de tassement	pour 62 000 t	moy. pr 1 000 t	Coeff. de gradient et température mm/°C
	mm	mm/10 ³ t	
Centre-milieu côtés	7,8	0,126	-0,15
Centre-quart côtés	9,7	0,156	-0,17
Centre-coins	12,2	0,196	-0,21

2) Témoins sonores (corrigés de la différence de dilatation corde acier et béton)

Témoin : r = radial c = circonférentiel	$\frac{\Delta l}{l} \times 10^6$	$\frac{\Delta l}{l} \times 10^6$
	pour 62 000 t	par °C
Centre		
n° 5 (haut)	- 45	- 4,1
n° 3 (bas)	+ 55	1,6
Médiane		
n° 14 (haut, r)	- 70	- 6,5
n° 16 (haut, c)	-118	- 7,8
n° 13 (bas, r)	62	0,6
n° 15 (bas, c)	80	1,7
n° 11 (haut, c)	- 33	- 7,1
n° 21 (bas, c)	66	- 4,5
Diagonale		
n° 7 (haut, r)	- 58	- 4,7
n° 8 (haut, c)	-115	- 6,6
n° 9 (bas, r)	49	non calculé
n° 17 (haut, r)	5	- 4,6
n° 18 (bas, r)	- 6	+ 1,9

Pendant la période étudiée, la flèche augmente avec la charge et diminue lorsque la face supérieure s'échauffe. Une augmentation de charge joue dans le sens d'une compression de la face supérieure et d'une tension de la face inférieure. Les zones les plus influencées par une augmentation de charge sont situées sous les charges elles-mêmes, apportées au radier par les poteaux du caisson.

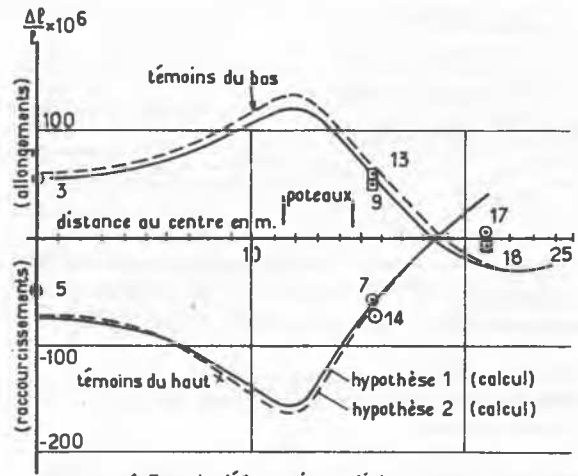
En fonction des gradients de température, une augmentation de température de la face supérieure conduit à une compression supplémentaire de cette face et à une tension de la face inférieure. D'une part, ce gradient influe comme si les déformations étaient empêchées et les contraintes qui en résultent sont au maximum d'un ordre de grandeur correspondant à ce cas. Mais il modifie aussi la flèche. Il semble que le mécanisme suivant se produise partiellement : si la face supérieure du radier s'échauffe, les compressions de cette face tendent à réduire la forme en cuvette prise par le radier et à surcharger un peu les bords par rapport au



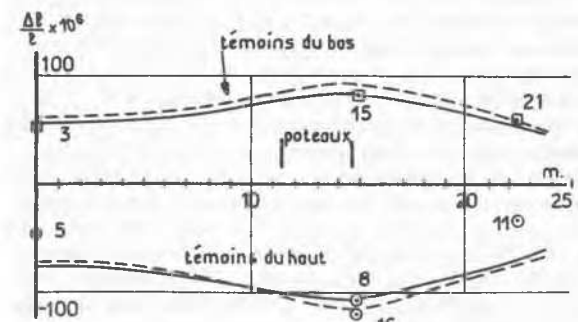
Tassement entre le 16/5/67 et le 17/6/69 } augmentation de charge 62000 t,

— courbe calculée avec hypothèse 1
 - - - courbe calculée avec hypothèse 2
 O points expérimentaux mesurés

Fig. 10 - Comparaison des tassements entre calculs "a posteriori" et points expérimentaux



1. Taux de déformation radial



2. Taux de déformation circonférentiel

Fig. 11 - Augmentation des taux de déformation entre le 16.05.67 et le 10.06.69

centre, ce qui modifie les efforts de flexion.

Calculs a posteriori

Une série de calculs a été reprise par M. Cuisinier d'Electricité de France afin de mieux évaluer les caractéristiques mécaniques moyennes du sol qui ont conditionné le comportement du radier entre deux dates : 16.05.67 et 10.06.69. On a assimilé pour le moment le radier à une structure circulaire de même surface.

On a représenté le sol par un milieu élastique ayant un module soit constant, soit variable linéairement avec la profondeur. Deux hypothèses sur la compressibilité du sol conduisent à une bonne concordance avec les observations faites entre les deux dates précitées : hypothèse (1) :

E sol moyen = 3 400 bars - E béton = 200 000 bars

hypothèse (2) :

E sol moyen = 825 bars + 475 $\frac{z}{m}$ - E béton = 200 000 bars

Les fig. 10 et 11 comparent les valeurs de tassement et de taux de déformation ainsi calculés et ceux qui ont été mesurés pendant cette période. On constate que ce mode de calcul conduit à une coïncidence acceptable entre les valeurs calculées et observées, surtout pour la variation des tassements absolus.

CONCLUSION

Le comportement de BUGÉY I, qui va bientôt entrer en service, a été suivi depuis le début de la construction. Les indications qui en ont été tirées ne peuvent être négligées dans les études des tranches II et III dont les travaux sont commencés.

Pour apprécier la capacité prévisionnelle de BUGÉY I, rappelons que le calcul du tassement qui donnait 60mm impliquait des hypothèses sur certains paramètres. Le tassement moyen actuellement observé est de 36mm sans que l'on puisse dire s'il va encore croître; il serait de l'ordre de 40mm si l'on tenait compte des tassements qui ont pu se produire dans la zone centrale avant la pose des repères. Le radier, malgré son épaisseur de 5m n'est pas resté rigide et a présenté une certaine flexibilité. Le tassement moyen a varié linéairement avec le logarithme de la charge à partir d'une charge totale de 33 000 t (8mm), proche du poids des terres (38 000 t).

Les hypothèses faites doivent être ajustées sans que l'on sache quels paramètres jouent un rôle prépondérant. Sur la base des observations, des calculs ont été faits dans l'hypothèse d'un sol élastique permettant de rendre compte des déformations de cet ouvrage sous charge à condition de choisir des valeurs convenables pour les modules de déformation du terrain et du béton.

REFERENCES

FLORENTIN J. (1966), Fondations du Caisson de la Centrale Nucléaire E.D.F. 4 à Saint Laurent des Eaux, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, n° 225 (pages 1054 - 1076), PARIS

LAMIRAL G. et COURBON J. (1965), Les Caissons en Béton Précontraint dans les Centrales Nucléaires d'E.D.F.3 et d'E.D.F.4, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, n° 206 (pages 208 - 232), PARIS

LAUNAY P. (1970), Etude et Construction du Caisson en Béton Précontraint de la Centrale de BUGÉY I, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, n° 269 (pages 70 - 107), PARIS

ROBERT E., SOULIER L., MALAVAL P. "et al" (1969), La Centrale Nucléaire de BUGÉY I, Energie Nucléaire n° 4, vol. 11 (pages 195 - 253), PARIS.