

la craie à nogent-sur-seine

Caractéristiques géotechniques déduites
des reconnaissances et des essais

par

J. Sigismond

Ingénieur Électricité de France-Septen

J. M. Dupas

Ingénieur Mecasol

A. Lefebvre

Ingénieur Mecasol

1 Le site

Le site de Nogent-sur-Seine, retenu par Électricité de France pour y établir une centrale de production d'énergie électro-nucléaire, se trouve à une centaine de kilomètres à l'Est de Paris, en rive droite de la Seine, à quelques kilomètres en amont de la ville de Nogent-sur-Seine (5 000 habitants).

Implanté dans une zone basse et inondable par les déversements de crue de la rivière, le site est une quasi île entourée au Sud et à l'Est par la Seine (appelée « Petite Seine » en amont de Montereau) et, pour le reste, par un système de canaux plus ou moins naturels, appelés « noues ». Certaines noues, entretenues pour leur fonction de drainage, sont implantées sur le tracé de la « Vieille Seine », portion abandonnée du cours de la rivière au cours de ses divagations (fig. 1).

A 300 km de son embouchure, l'altitude du lit de la rivière à l'aval de la ville de Nogent est de 55 NGF. Coulant sur des terrains relativement tendres, elle a pu développer des méandres, formant ainsi une large vallée fertile, hors des zones inondables.

A Nogent, il existe une minoterie utilisant la force motrice d'une basse chute hydraulique créée par un petit barrage relevant le niveau de l'eau aux alentours de 62 NGF. Le « remou » de la retenue remonte en amont du site de la centrale qui est ainsi située plutôt au bord d'un lac que d'une rivière. Cependant, les faibles caractéristiques du lac n'ont que peu d'influence sur les écoulements de la rivière.

Enfin, le sud du site est bordé par le remblai de la ligne ferroviaire Paris-Bâle.

2 La stratigraphie

Le site est à une altitude pratiquement constante de 63 NGF environ. Le remplissage alluvial est constitué de dépôts limoneux et de graves sableuses, dont les

éléments les plus gros sont de dimensions relativement faibles. Ce remplissage alluvial a une épaisseur de l'ordre de 6 m (2 m de limon et 4 m de sablo-graveleux).

L'examen des cartes géologiques montre que le fleuve a déblayé, au droit de sa vallée, les terrains relativement tendres du Tertiaire constituant les plateaux dominant la vallée. Le remplissage alluvial repose sur un substratum crayeux du Secondaire (Sénonien). Celui-ci, reconnu par de nombreux sondages, présente une stratification quasi horizontale, très nette bien que le matériau ne change pas de nature lithologique. La craie (95 % à 99 % de carbonate de calcium) règne sur une puissance de l'ordre de 600 mètres.

Sur l'épaisseur de terrain crayeux pratiquement concernée par les ouvrages, on peut distinguer d'après l'ensemble des reconnaissances effectuées (fig. 2) :

- un horizon (ZI) de craie pâteuse où le sol est déstructuré, réduit à l'état de pâte avec de petits morceaux de roche plus dure;
- une zone où coexistent de la craie finement morcelée et de la pâte de craie. On peut différencier la partie supérieure de cette zone (ZIIa) de sa partie inférieure (ZIIb) où le pourcentage de pâte devient minime;
- une zone d'altération rocheuse classique (ZIII) contenant des passages broyés et des passages moins altérés;
- enfin, la craie rocheuse (ZIV) pouvant localement être fracturée.

Étant donné la variation progressive de faciès dans la zone altérée (ZI, ZIIa et ZIIb), les études ont été faites à partir d'une stratigraphie plus schématique (fig. 3) :

- la craie pâteuse (ZI + ZII) d'une épaisseur moyenne de 10 m;
- la craie de transition (ZIII) sur 3 m à 5 m;
- la craie rocheuse (ZIV).

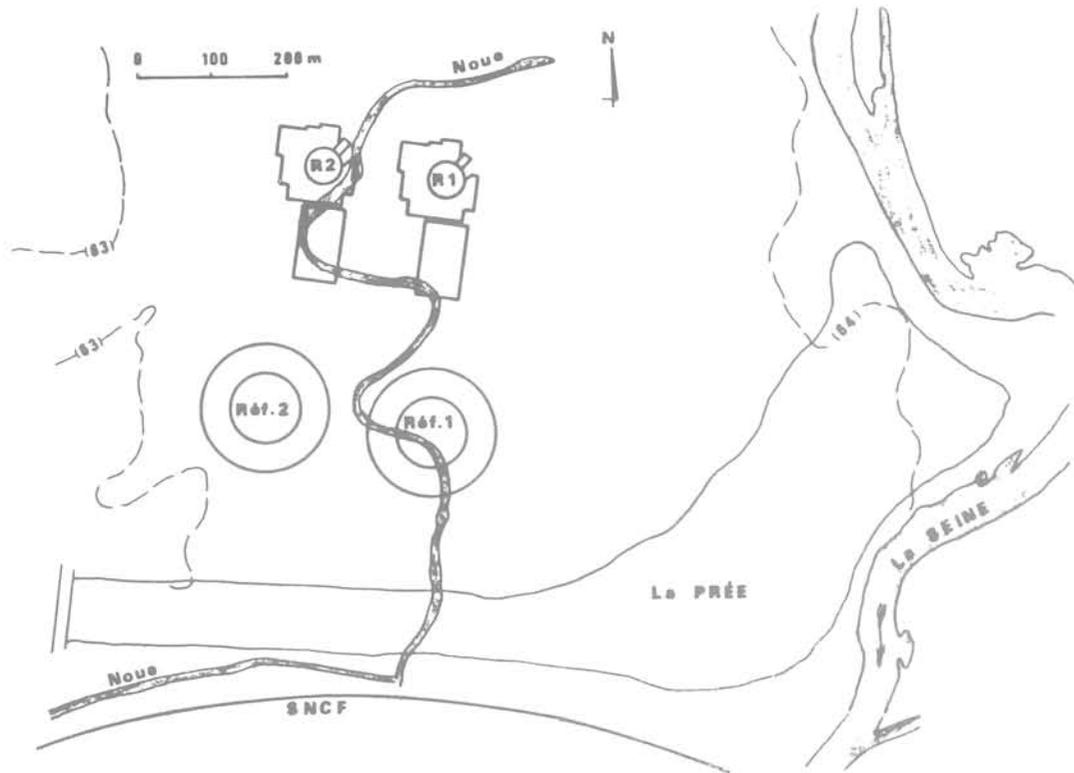


Fig. 1

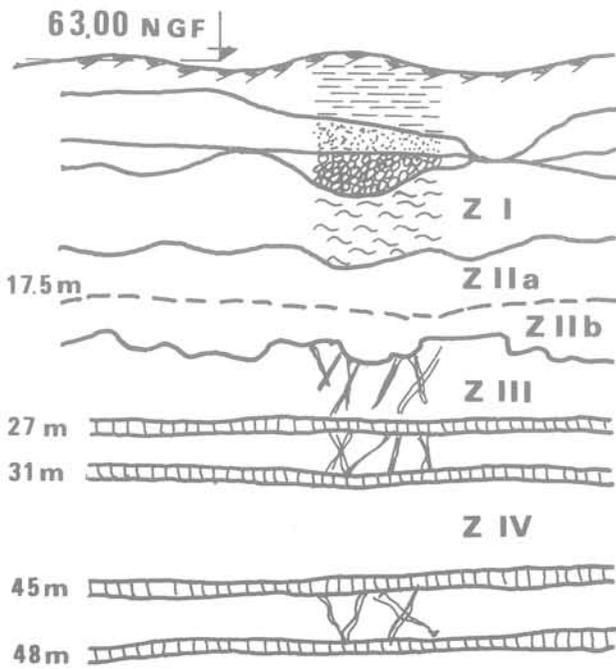


Fig. 2

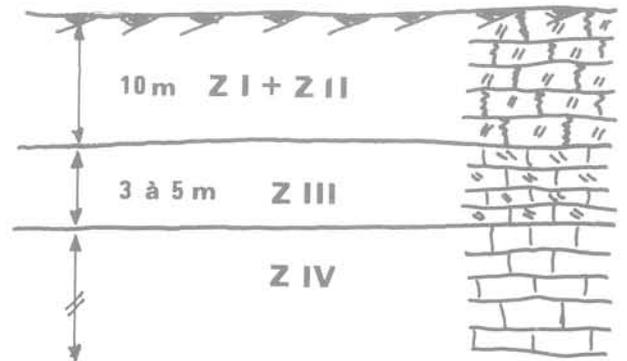


Fig. 3

3 Le projet

Sans entrer dans les détails, indiquons que le refroidissement des eaux circulant dans les condenseurs s'effectue en circuit fermé grâce à des réfrigérants atmosphériques. L'eau d'évaporation est prélevée dans la Seine.

Pour mettre les bâtiments à l'abri des inondations, il a été nécessaire d'établir une plate-forme en remblais constitués de matériaux sablo-graveleux. La cote de cette plate-forme à 68,2 NGF est supérieure à celle strictement nécessaire à la mise hors d'eau (66,5 NGF). Elle a été choisie pour que, sous les fonds de fouille des bâtiments, reste une épaisseur maximale d'alluvions sablo-graveleuses. Il a été en effet apprécié que la très mauvaise traficabilité de la craie altérée-pâteuse aurait rendu difficiles les travaux en fond de fouilles si ceux-ci avaient été dans la craie.

Le creusement dans le remplissage alluvial d'un chenal évacuateur des crues a fourni des matériaux utiles pour la constitution des remblais de la plate-forme.

La nécessité de travailler au-dessous du niveau de la nappe phréatique dans un sol perméable a conduit à établir une enceinte étanche entourant la zone des travaux. Cette enceinte est constituée par une paroi souple en coulis de ciment bentonite, ancrée dans un niveau peu perméable de la craie.

4 Les reconnaissances

4.1 Les buts

Les reconnaissances ont pour but de définir la stratigraphie et ses variations dans l'espace. Elles doivent permettre d'apprécier les caractéristiques géotechniques des sols et plus particulièrement celles relatives à leur déformabilité. En effet, un des principaux problèmes géotechniques posés par les centrales nucléaires est celui de l'estimation des tassements absolus et différentiels des divers bâtiments.

Parmi les paramètres également à connaître, citons les caractéristiques dynamiques.

Les reconnaissances doivent aussi permettre de définir les caractéristiques hydrogéologiques et hydrauliques des sols (perméabilités, anisotropies). Dans le cas de Nogent, la connaissance de ces paramètres a permis de définir le mode de mise hors d'eau du site (paroi moulée plus pompage). Dans ce papier nous ne reviendrons pas sur ce sujet, celui-ci devant faire l'objet d'une communication par E. D. F. au « Symposium International sur la Reconnaissance des Sols et des Roches par Essais en Place » Paris, Mai 1983.

4.2 Son déroulement

Les reconnaissances se sont déroulées en trois temps, séparées par des périodes utiles à la réflexion. Il est en effet agréable, pour ne pas dire indispensable, de pouvoir réfléchir, en dehors de la pression journalière, surtout au cours d'une campagne de reconnaissance pour laquelle on ne sait pas trop, a priori, ce que l'on cherche et, a fortiori, comment le trouver.

Le découpage temporel permet d'obtenir de nombreux renseignements de valeur qu'il aurait été plus long et plus coûteux d'élaborer au cours d'une seule campagne continue.

Dans le déroulement de la campagne, il faut distinguer deux phases distinctes :

- la première, d'octobre 1976 à décembre 1976, a consisté en la réalisation de sondages carottés, de pénétromètres et de pressiomètres en cinq points. Leur réalisation a permis :
 - de connaître les conditions globales de fondation;
 - de vérifier l'utilité et l'efficacité des essais in situ;
 - de pouvoir établir un avant-projet préliminaire comparatif des modes de fondation possible à la suite duquel la solution de fondations profondes a été abandonnée au bénéfice de la solution sur radier. Ceci a permis d'orienter et d'optimiser les reconnaissances ultérieures.
- la seconde phase a comporté deux temps : de septembre 1978 à décembre 1978 pour le premier et de juin 1979 à novembre 1979 pour le second.

Au cours de la dernière période, outre les types de reconnaissance déjà utilisés, il a été fait appel à des enregistrements de paramètres (type Lutz), des cellules « roches » pour le pressiomètre et des pénétromètres statiques.

4.3 Les procédés d'investigations

La superficie à reconnaître est de 200 ha. La zone susceptible de recevoir des ouvrages importants est de 15 à 20 ha, à laquelle il faut ajouter la zone des réfrigérants qui couvre encore une dizaine d'hectares. En ne retenant qu'un point de reconnaissance par 1 000 m² (ou dix unités à l'hectare), soit la moitié de ce qui est généralement conseillé pour des ouvrages « ordinaires », il faudrait plus de 200 points de reconnaissance sur l'ensemble du site. En ne retenant pour ces reconnaissances que des sondages carottés, ceux-ci auraient coûté plus de 6 MF (base 1979).

Aussi a-t-on cherché à limiter au strict nécessaire l'utilisation des sondages carottés, considérés a priori comme élément de base, et recherché l'utilisation d'autres procédés d'investigations.

Pour le site, on a finalement retenu et utilisé :

- 24 sondages carottés (SC),
- 37 forages pressiométriques type Ménard (PM),
- 14 forages pénétrométriques statiques type Parez (PS),
- 78 pénétromètres dynamiques type Sermes (PD),
- 5 forages destructifs avec enregistrements de paramètres type Lutz (SD),

soit au total 158 points de reconnaissance pour un coût de l'ordre de 1,6 MF.

Le nombre de 158 correspond à des points de forage et non à des points distincts de reconnaissance. En effet, en certains points, plusieurs reconnaissances de types différents ont été réalisées pour les caler entre elles et par rapport aux sondages carottés pris initialement comme référence. Le nombre de points distincts reconnus est de 147.

A ces reconnaissances mécaniques, il faut ajouter un puits de grand diamètre (1,60 m) de 20 m de profondeur creusé à la main dans l'optique de « voir » les terrains et leurs différents contacts et de prélever des échantillons réellement « intacts », et deux puits creusés mécaniquement, équipés à des fins d'essais de pompage.

Ces travaux ont été réalisés par Bachy.

4.4 Les coûts et les délais

En utilisant les prix des marchés passés pour ce travail, on a déterminé les coûts comparés des mètres linéaires des différents procédés d'investigation, en prenant comme base 1, le prix du mètre linéaire de pénétromètre dynamique (qui est de 120 F, conditions économiques début 1979).

Types	SC	PM	SD	PS	PD	Total
Longueur (m)	50	30	40	20	20	
Nombre	24	37	5	14	78	158
Pourcentage en nombre	15	23,5	3	9	49,5	100

Tableau 1

Compte tenu des longueurs réellement réalisées, le coût total se répartit de la façon suivante :

Types	SC	PM	SD	PS	PD	Totaux
Longueur (m)	984	1 098	200	320	1 685	4 287
Pourcentage	23	26	4,5	7,5	39	100
Coût relatif	5,3	3,0	1,5	1,2	1,0	
Coût total relatif	5 215	3 294	300	384	1 685	10 878
Pourcentage	48	30	3	4	15	100

Tableau 2

Les sondages carottés qui représentent moins du quart du linéaire réalisé et moins d'un sixième des points reconnus représentent environ la moitié de la dépense.

Du point de vue des délais, on retiendra en moyenne :

Type de reconnaissance	SC	PM	SD	PS	PD
ml/jour	5,5	7	40	23	10

Tableau 3

Les durées prises en compte correspondent aux temps effectifs globaux de présence des matériels sur le site, compte tenu de conditions particulières d'exécution, par exemple :

- pénétromètre dynamique Sermes utilisé sans interruption pour un forage donné, exécuté en terrain vierge difficilement accessible;
- pénétromètre statique Parez utilisé en terrain préparé et aménagé.

Il est évident que les différents procédés ne donnent pas tous les mêmes informations, mais il faut être capable d'apprécier en fonction des coûts, des délais et des informations recherchées, les moyens les mieux adaptés pour fournir les données nécessaires à l'élaboration du projet.

4.5 Répartition des sondages

La densité des points de sondage n'est pas constante sur l'ensemble du site. Le tableau 4 donne la situation des points reconnus et leur répartition en fonction des zones à construire.

On a distingué 4 zones (fig. 4) :

- la zone α contient la quasi-totalité des ouvrages de production : îlots nucléaires, salles machines;
- la zone β contient des ouvrages importants : traitement des effluents, station de déminéralisation d'eau.
- la zone γ contient le reste des bâtiments de l'équipement (station de pompage, réfrigérants, poste électrique);
- la zone δ constitue le reste du site.

Repère	Superficie (hectares)	SC	PM	SD	PS	PD	Total	Pourcentage	Densité U/hect.
α	7	14	12	5	6	13	50	31,5	7,1
β	13	3	5	0	4	15	27	17,0	2,1
γ	60	4	8	0	4	20	36	23,0	0,6
δ	120	3	12	0	0	30	45	28,5	0,4
Total	200	24	37	5	14	78	158	100,0	0,8

Tableau 4

On constate que la densité varie de 7 unités de reconnaissance par hectare dans la zone des ouvrages importants à 0,4 pour les zones hors ouvrages. Elle est inférieure à 1 pour l'ensemble du site. On voit également que les sondages carottés (SC) sont concentrés sur les zones des ouvrages nucléaires.

5 Résultats des reconnaissances

5.1 Les reconnaissances in situ

Les résultats présentés concernent le pénétromètre dynamique, le pénétromètre statique et le pressiomètre. Les enregistrements de paramètres, en nombre limité, ne permettent pas un dépouillement statistique. D'une façon générale, pour chaque paramètre étudié (résistance de pointe au pénétromètre, module et pression limite au pressiomètre), on donne en fonction de la profondeur, la médiane des mesures et le fuseau de dispersion obtenu en considérant la totalité des mesures moins 10 % des plus faibles valeurs et 10 % des plus fortes.

5.1.1 Les pénétromètres dynamiques

Leur nombre est de 78, mais le dépouillement statistique ne porte que sur les 38 pénétromètres dynamiques les plus proches de l'îlot nucléaire. Les pénétromètres dynamiques, généralement conduits au refus, permettent d'atteindre la craie rocheuse. La profondeur du toit de la craie pâteuse est en moyenne de 6,40 m avec un écart type de $\pm 0,9$ m. L'examen des courbes de la résistance de pointe en fonction de la profondeur (fig. 5) montre que l'on peut distinguer 3 zones, que l'on peut rattacher à la craie pâteuse, à la zone de transition, et à la craie rocheuse.

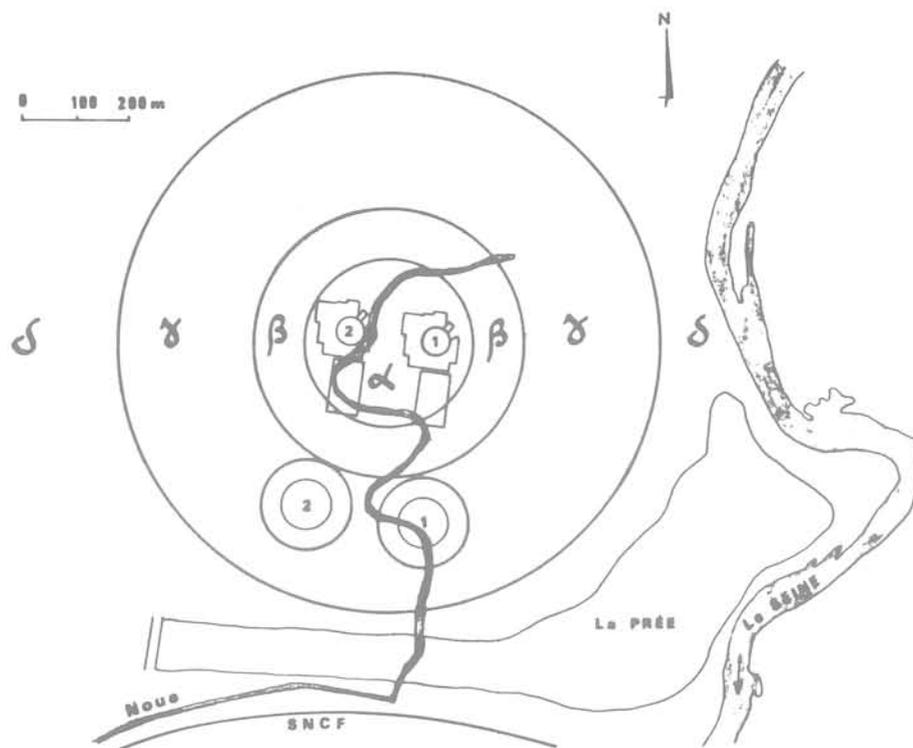


Fig. 4

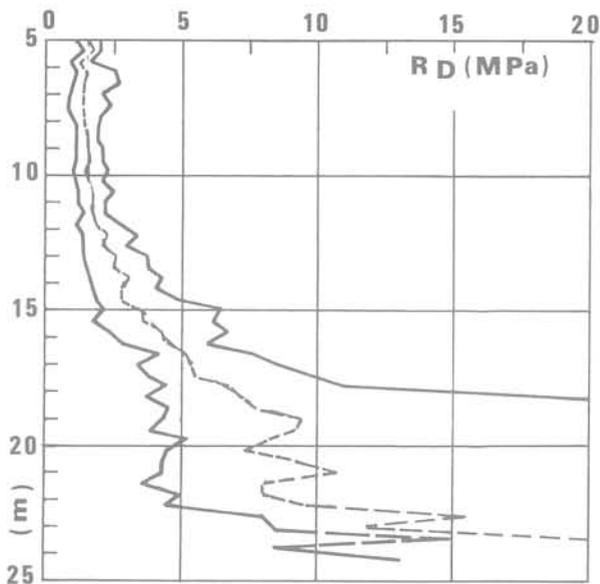


Fig. 5

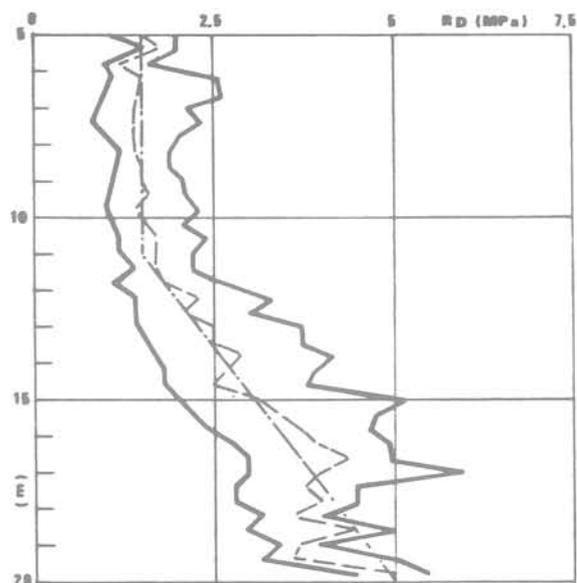


Fig. 6

La craie pâteuse présente une résistance de pointe au plus égale à 5 MPa et la craie rocheuse une résistance au moins égale à 10 MPa.

La figure 6 donne la variation, en fonction de la profondeur, de la résistance de pointe dans la craie pâteuse (médiane et fuseau). Par rapport au graphique 5, on a éliminé les valeurs relatives à la craie de transition et à la craie rocheuse.

On retiendra :

- craie pâteuse : épaisseur moyenne 10,2 m (écart type 1,9 m). Résistance de pointe égale à 1,5 MPa jusqu'à 11 m puis variant linéairement pour atteindre 5 MPa à 20 m;
- craie de transition : épaisseur moyenne de 4,2 m. Résistance de pointe moyenne de 8 MPa (écart type 4 MPa);
- craie rocheuse : la pénétration a toujours été faible, en moyenne de 1 m. La résistance de pointe est en moyenne de 27 MPa (écart type 14 MPa).

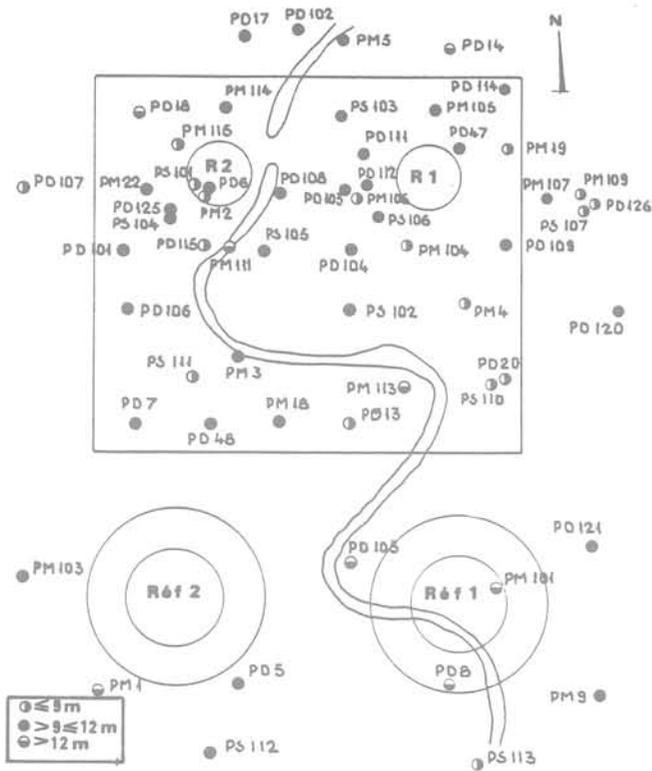


Fig. 7

La figure 7 traduit les variations en plan de l'épaisseur de craie pâteuse.

5.1.2 Les pénétromètres statiques

Le dépouillement porte sur la totalité des essais réalisés au nombre de 14. Le fuseau et la médiane des résistances de pointe en fonction de la profondeur montrent que l'on peut attribuer à la craie pâteuse une résistance de pointe au plus égale à 10 MPa et à la craie rocheuse une résistance au moins égale à 20 MPa. La figure 8 récapitule l'ensemble des résultats pour les différents types de craie et la figure 9 ceux relatifs à la craie pâteuse uniquement.

D'après les pénétromètres statiques, la profondeur moyenne du toit de la craie pâteuse est de 6,50 m (écart type de 0,7 m). Ces valeurs sont tout à fait comparables à celles déduites du pénétromètre dynamique. Ce résultat est tout à fait logique dans la mesure où le contraste entre les alluvions sablo-graveleuses susjacentes et la craie pâteuse est très net au pénétromètre. L'épaisseur de la craie pâteuse est en moyenne de 9,1 m (écart type de 0,8 m). Ceci montre que les critères utilisés pour définir la craie pâteuse sont cohérents.

L'épaisseur de la craie de transition est en moyenne de 4,1 m (écart type 1,40 m).

La résistance de pointe moyenne dans la craie de transition est 14 MPa (écart type 4,2 MPa).

Dans la craie rocheuse, pour une pénétration moyenne de 3 m, la résistance de pointe moyenne est 31 MPa (écart type 6 MPa).

La figure 7 donne la répartition en plan des épaisseurs de craie pâteuse.

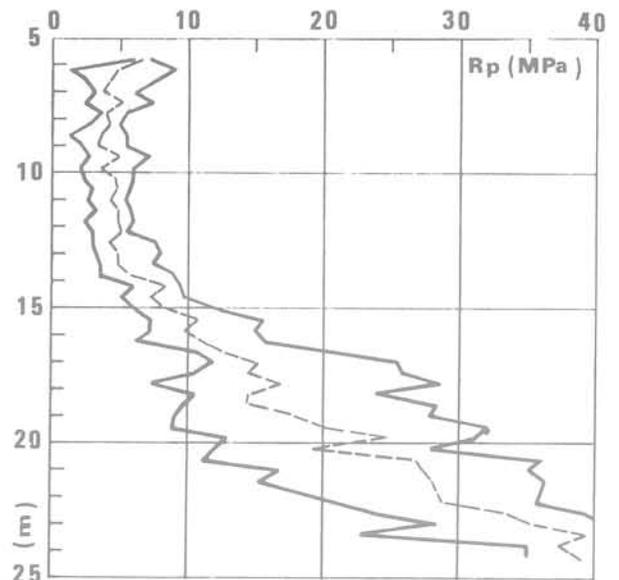


Fig. 8

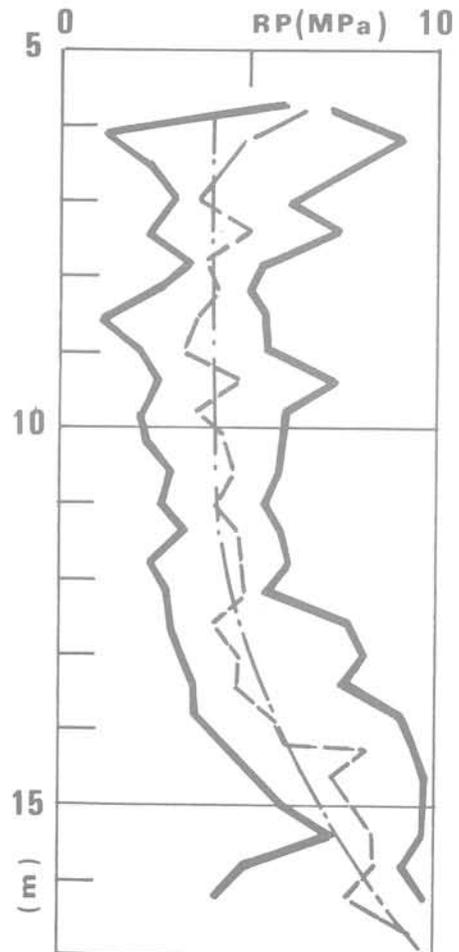


Fig. 9

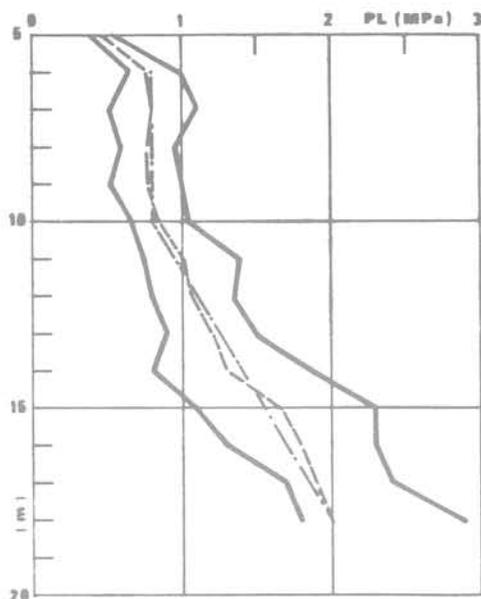


Fig. 10

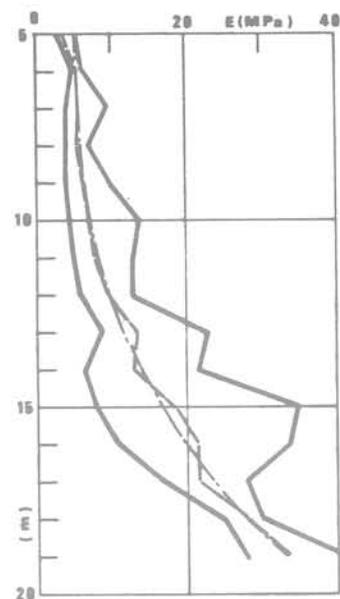


Fig. 11

5.1.3 Les pressiomètres

La sonde utilisée pendant la première campagne est du type « sol ». Elle permet de mesurer des pressions limites au plus égales à 3 MPa. Pour la deuxième campagne, il a été utilisé une cellule du type « roche » qui permet d'atteindre des pressions limites de l'ordre de 7 MPa.

Les courbes donnant les pressions limites et modules pressiométriques en fonction de la profondeur, montrent que l'on peut attribuer à la craie pâteuse une pression limite au plus égale à 2,5 MPa. Dans la zone de transition les pressions limites sont comprises entre 2,5 MPa et 7 MPa.

La pression limite de la craie rocheuse n'a pas été mesurée.

Le dépouillement des 22 sondages pressiométriques les plus proches de l'îlot nucléaire conduit aux résultats suivants :

- profondeur du toit de la craie pâteuse en moyenne à 6,3 m (écart type 1,2 m);
- épaisseur de craie pâteuse en moyenne de 10,5 m (écart type de 2,1 m).

Les pressiomètres du type « sol » ne permettent pas de définir précisément la limite entre la zone de transition et la craie rocheuse, leur profondeur étant souvent insuffisante.

D'après les pressiomètres de la deuxième campagne (cellule type « roche ») l'épaisseur moyenne de la zone de transition est de 4,4 m (écart type 2,3 m).

Les figures 10 à 12 donnent pour la craie pâteuse les variations en fonction de la profondeur des pressions limites ($P\ell$), modules pressiométriques (E) et du rapport $E/P\ell$.

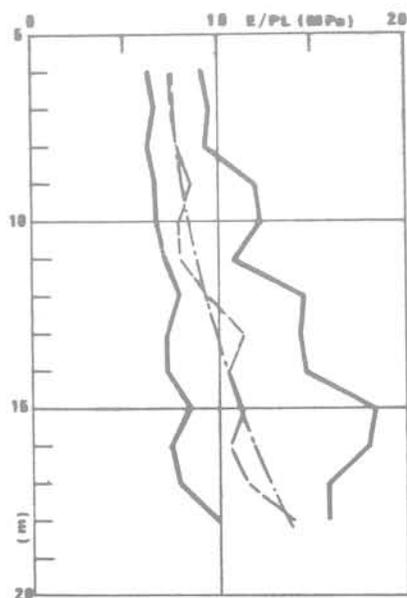


Fig. 12

Pour la zone de transition, on a constaté une différence assez sensible entre les résultats des deux campagnes. D'après les pressiomètres « roche », cette zone se caractérise par un module pressiométrique de 90 MPa (valeur médiane) à 97 MPa (valeur moyenne), alors que la cellule type « sol » donne une médiane de 60 MPa. Il semble que ce type de cellule surestime la déformabilité du sol, peut-être par suite de sa déformabilité trop élevée. Ses résultats ont été écartés.

On retiendra comme valeurs caractéristiques :

- craie pâteuse : $P\ell = 0,8$ MPa jusqu'à 10 m, puis augmentant jusqu'à 2 MPa à 18 m;
 $E = 5$ à 10 MPa jusqu'à 12 m, puis augmentant jusqu'à 30 MPa à 18 m;
 $E/P\ell = 9$ jusqu'à 11 m puis augmentant jusqu'à 14 à 18 m;
- zone de transition : $P\ell = 3$ à 6 MPa, en moyenne 4 MPa (écart type 1,2 MPa);
 $E = 95$ MPa (écart type 50 MPa);
- craie rocheuse : $E = 500$ MPa (écart type 270 MPa).

Le graphique n° 7 donne la répartition en plan de l'épaisseur de craie pâteuse.

5.1.4 Comparaison des reconnaissances in situ

Du point de vue stratigraphique, les trois types de reconnaissance (pénétrètres dynamiques et statiques, sondages pressiométriques) conduisent à des résultats tout à fait comparables. Ils donnent des épaisseurs moyennes de craie pâteuse, comprises entre 9,1 m et 10,5 m et des épaisseurs de zone de transition comprises entre 4,1 m et 4,4 m. Ils permettent d'établir une carte de l'épaisseur de la craie pâteuse (fig. 7) qui montre des variations assez notables de cette couche dont l'épaisseur minimale est de l'ordre de 8 m et l'épaisseur maximale de l'ordre de 16 m (les épaisseurs maximales sont souvent rencontrées à proximité de la Noue qui traverse le site). Les caractéristiques mesurées (résistances de pointe, pressions limites et modules pressiométriques) permettent de définir valablement un certain nombre de corrélations récapitulées dans le tableau 5.

	Craie pâteuse	Zone de transition	Craie rocheuse
Rp Dyn. (MPa)	1,5 → 5,0	8	27
Rp Stat. (MPa)	4,0 → 10,0	14	31
Rp Stat./Rp Dyn.	2,7 → 2,2	1,75	1,15
$P\ell$ (MPa)	0,8 → 2,0	3 → 6	—
$E/P\ell$	8,0 → 14,0	~25	—
Rp Dyn./ $P\ell$	2	2	—

Tableau 5

5.2 Les essais de laboratoire

5.2.1 Identification de la craie

Les figures 13 et 14 rassemblent, en fonction de la profondeur, l'ensemble des mesures de teneur en eau et compacité faites sur les échantillons prélevés. La craie pâteuse et la zone de transition (c'est-à-dire jusqu'à 20 m de profondeur environ) ont des teneurs en eau généralement comprises entre 25 % et 30 % ce qui correspond à des compacités comprises entre 14,5 et 15,5 kN/m^3 .

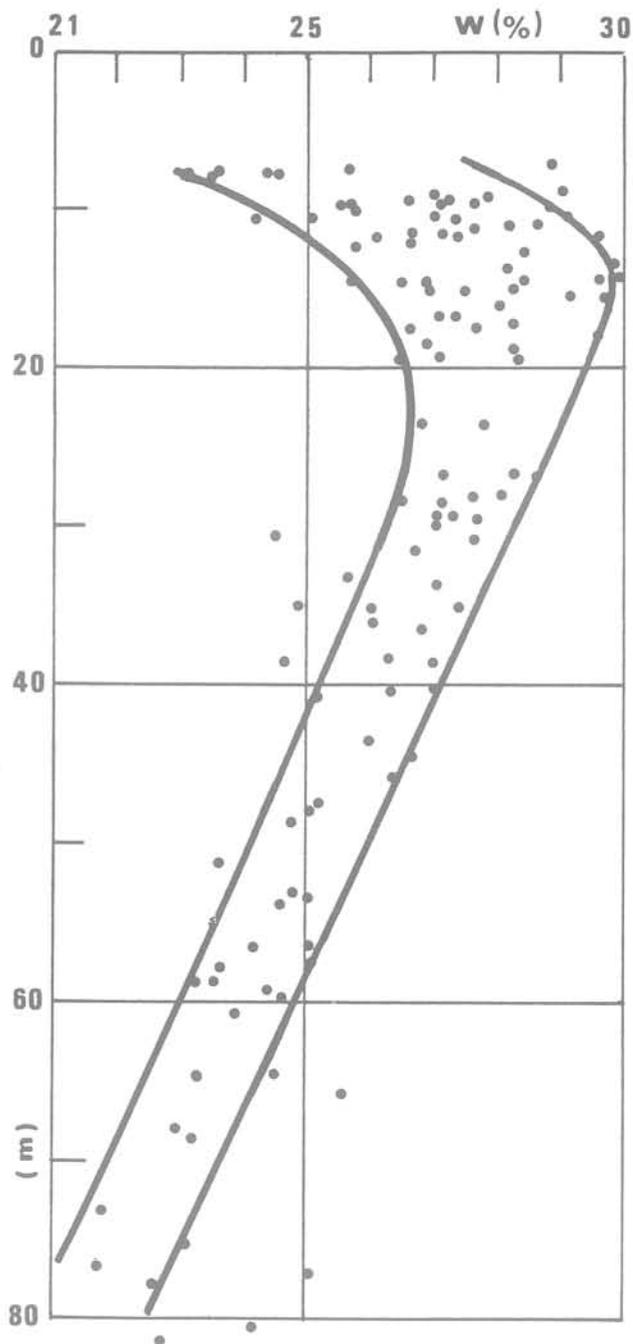


Fig. 13

En tête de la craie pâteuse, déstructurée, on constate une importante dispersion avec une tendance aux fortes compacités. Il a en effet été constaté, à partir de macrophotographies, que les liaisons entre les grains sont détruites en tête de couche et que les grains sont en contact, ce qui entraîne une densification.

En dessous, dans la craie rocheuse, on constate une diminution assez régulière de la teneur en eau avec augmentation corrélative de compacité : les teneurs en eau varient de 27 % à 28 % en tête de couche à 23 % environ vers 70 m à 80 m de profondeur. Pour ce même intervalle, les compacités varient de 15,5 kN/m^3 à 16,5 kN/m^3 environ.

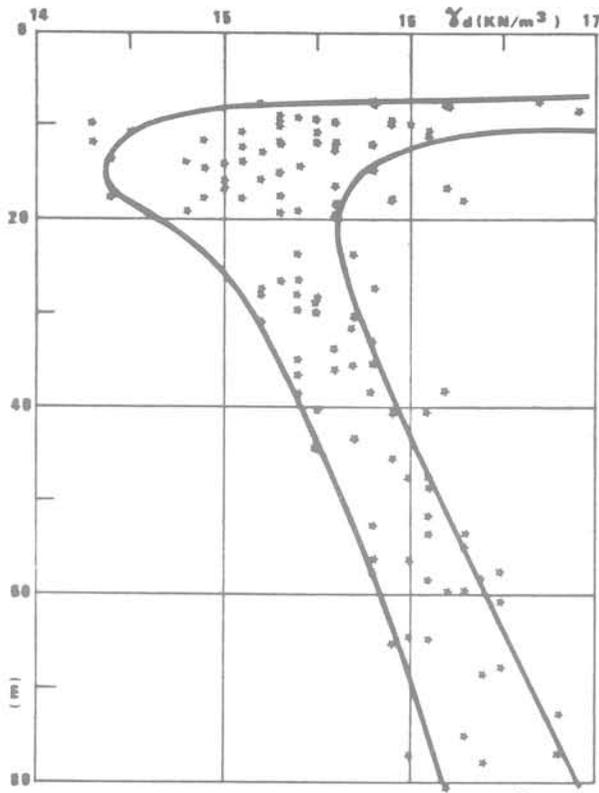


Fig. 14

Le graphique 15 donne, en fonction de la profondeur, les résistances à la compression simple mesurées en laboratoire. Alors qu'on note une certaine continuité des teneurs en eau et compacités entre la craie pâteuse et la craie rocheuse, il n'en est pas de même des résistances à la compression simple. Celles-ci, pratiquement toujours inférieures à 0,4 MPa dans la craie pâteuse et la zone de transition, sont toujours supérieures à 2 MPa pour la craie rocheuse. Dans ce matériau, l'augmentation de compacité se traduit par une augmentation relativement faible de la résistance à la compression simple : celle-ci est en moyenne de 3 MPa vers 30 m à 40 m de profondeur (compacité moyenne 15,5 kN/m³) pour atteindre environ 4 MPa vers 70 m-80 m de profondeur (compacité 16,5 kN/m³). La résistance moyenne à la compression simple de la craie pâteuse est $R_c = 0,17$ MPa (écart type 0,1 MPa).

5.2.2 Compressibilité de la craie

Les résultats ci-après concernent uniquement la craie pâteuse dont il importe de bien connaître les caractéristiques de déformabilité, ce sol étant, a priori, très nettement plus compressible que la craie rocheuse.

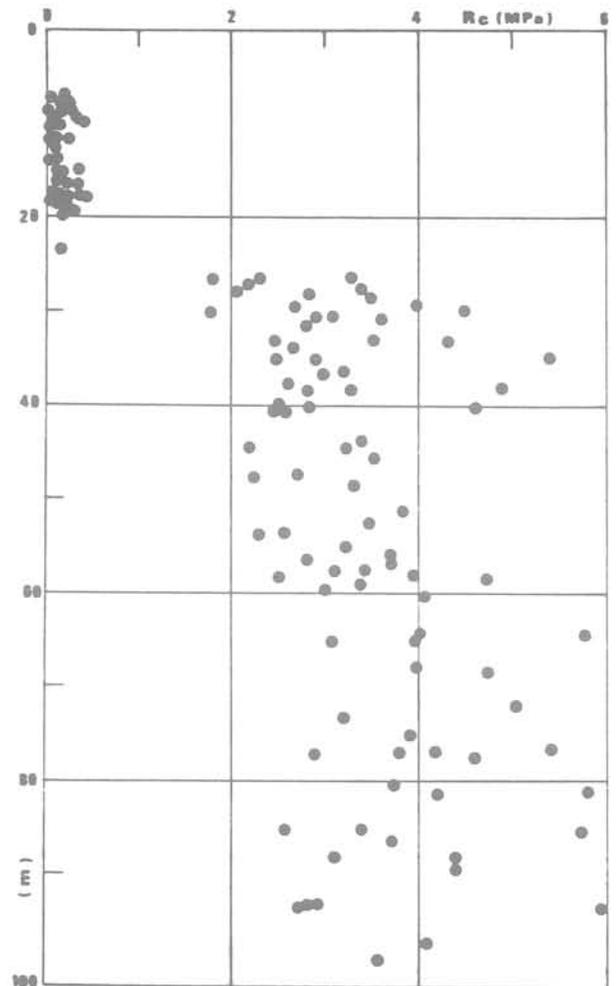


Fig. 15

Les essais de compressibilité à l'œdomètre présentent entre 0,6 MPa et 0,9 MPa une nette augmentation de pente. On en déduit une « pseudo pression » de consolidation qui correspond à la résistance de structure de la craie pâteuse.

Les modules œdométriques sont de l'ordre de 40 MPa sous 0,15 MPa, 55 MPa sous 0,3 MPa et 90 MPa sous 0,6 MPa.

La craie se consolidant très rapidement, la mesure de son coefficient de consolidation à l'œdomètre est assez délicate. Pour apprécier ce paramètre, des essais ont été effectués à l'appareil triaxial avec mesure de la vitesse de dissipation de la pression des pores. On obtient en moyenne $C_v = 1$ cm²/s.

Un programme d'essais triaxiaux consolidés drainés assez complet a été effectué dans le but de définir :

- les caractéristiques mécaniques intergranulaires;
- la déformabilité sous sollicitation sphérique;
- la déformabilité sous sollicitation déviatorique;
- le fluage.

Les angles de cisaillement intergranulaires mesurés sont peu dispersés, compris entre 33° et 38°, en moyenne $\phi_d = 36^\circ$.

Les cohésions intergranulaires C_d sont plus disper-

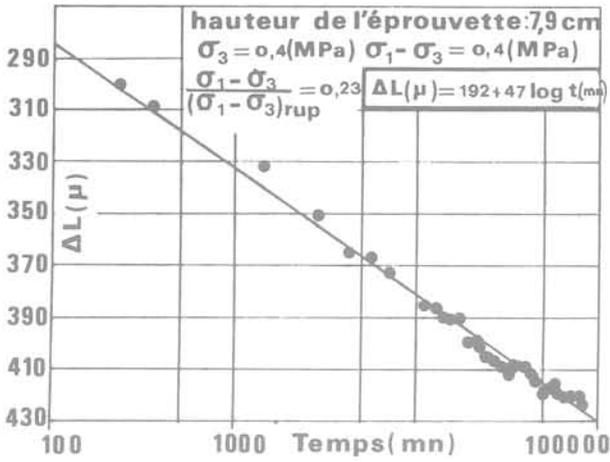


Fig. 16

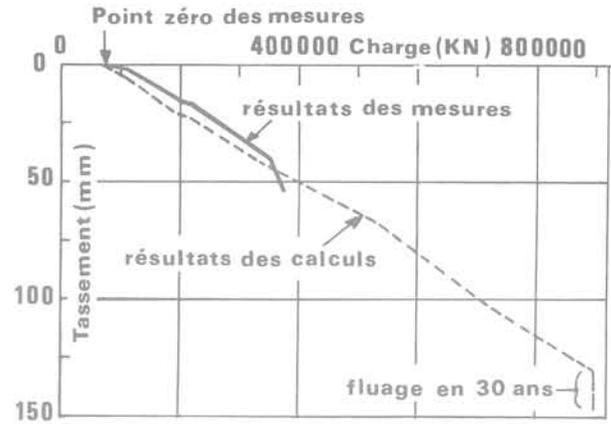


Fig. 17

sées, ce qui traduit l'altération plus ou moins importante de la craie. Elles sont comprises entre 0,02 MPa et 0,23 MPa, en moyenne $C_d = 0,08$ MPa.

Les modules sphériques caractérisent la déformabilité de la craie sous un tenseur de contrainte sphérique. En assimilant la courbe effort-déformation à une hyperbole, le module sphérique tangent peut s'écrire :

$$\text{Etg.s.} = A[\bar{\sigma}_3 + C_d \cotg \phi d]^\alpha$$

$\bar{\sigma}_3$: plus petite contrainte principale effective.

En moyenne : $A = 270$, $\alpha = 0,75$ (E , C_d et $\bar{\sigma}_3$ étant exprimés en MPa)

$$\text{Etg.s.} = 270[\bar{\sigma}_3 + C_d \cotg \phi d]^{0,75}$$

A titre d'exemple, pour les caractéristiques mécaniques intergranulaires moyennes, la déformation verticale est de 0,25 %, lorsque l'étreinte isotrope de consolidation varie de 0,1 MPa à 0,4 MPa.

Pour apprécier la déformabilité sous un déviateur, on peut également dans un domaine donné de déformations, assimiler la courbe effort-déformation à une hyperbole. Cette formulation a été introduite par Duncan :

$$\sigma_1 - \sigma_3 = [\varepsilon_v / (a + b\varepsilon_v)]$$

Pour l'ensemble des essais :

$$a = 1/1450[\bar{\sigma}_3 + C_d \cotg \phi d]^{0,67}$$

$$b = 3,6[1 - \sin \phi d] / 2C_d \cos \phi d + 2\bar{\sigma}_3 \sin \phi d$$

$\sigma_1 - \sigma_3$, $\bar{\sigma}_3$, C_d étant exprimés en MPa.

A titre d'exemple, pour une étreinte latérale de 0,1 MPa, il faut appliquer un déviateur $\sigma_1 - \sigma_3$ de 0,125 MPa pour obtenir une déformation de 0,1 %.

5.2.3 Fluage de la craie

La craie est connue pour sa déformabilité différée sous charges. Pour la craie rocheuse, le phénomène ne

devient significatif que pour des déviateurs proches du déviateur à rupture.

Pour la craie pâteuse, la question s'est posée de savoir si sous des déviateurs assez faibles, le phénomène pouvait avoir une ampleur significative par rapport au tassement calculé à partir des modules définis ci-dessus.

Plusieurs essais ont été effectués à l'appareil triaxial pour divers niveaux de contraintes latérales et de déviateurs.

En se référant au paramètre $\bar{D} = [\sigma_1 - \sigma_3] / [\sigma_1 - \sigma_3]_{rupt}$, on a exploré le domaine $0,1 < \bar{D} < 0,5$.

Les essais ont duré entre 1 et 2 mois, soit de 50 000 à 100 000 minutes. La figure 16 présente les résultats d'un essai pour $\bar{D} = 0,23$ d'une durée de 2 mois. A partir de l'ensemble des essais, une loi de comportement du type de celle proposée par Mitchell a été utilisée. Dans ce type de loi, la vitesse de déformation est de la forme :

$$\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt = A \cdot \exp(\alpha \bar{D}) [t_0/t]^m$$

avec :

A , α , m = caractéristiques du sol

$\bar{D} = [\sigma_1 - \sigma_3] / [\sigma_1 - \sigma_3]_{rupt}$

t_0 = temps de référence.

Pour la craie pâteuse, on a trouvé expérimentalement $m = 1$. Par intégration, on a :

$$\varepsilon = A' \exp(\alpha \bar{D}) \log [t/t_f]$$

t_f = temps de référence correspondant au début du fluage. Pour les essais réalisés, on a obtenu en moyenne :

$$\varepsilon(\%) = 0,07 \exp[1,75\bar{D}] \log [t/t_f]$$

A titre d'exemple, d'après l'expression ci-dessus, la déformation par fluage entre 100 mn et 100 000 mn pour un déviateur égal à 0,25 fois le déviateur à rupture est de 0,3 % environ de l'épaisseur de la couche.

6 Tassements de la craie

Bien que ceci ne soit pas l'objet du papier, il est intéressant de comparer les tassements théoriques que l'on peut calculer à partir des caractéristiques définies ci-dessus aux tassements observés sur les ouvrages.

On examinera plus particulièrement les tassements du bâtiment réacteur n° 1, le plus avancé actuellement. Fin juillet 1982, celui-ci a atteint une charge de 375 000 kN pour une charge totale de 900 000 kN environ. Les taux de travail au sol correspondants sont 0,19 MPa et 0,45 MPa. La figure 17 donne, en fonction des charges, le tassement moyen de la périphérie du réacteur. Jusqu'à 100 000 kN, les tassements mesurés sont quasiment nuls. Cette charge correspond à une contrainte moyenne de 0,05 MPa équivalente au poids des terres enlevées. Elle provoque donc une recompression de la craie qui dans ce type de chargement est pratiquement incompressible. Sur la figure 17, on note également un accroissement assez significatif du tassement entre 350 000 kN et 375 000 kN. La période de temps entre ces deux charges est de 3 mois. Le tassement qui a augmenté d'environ 13 mm, résulte vraisemblablement du fluage.

Les calculs faits à partir des expressions des modules de déformabilité et loi de fluage définies ci-dessus conduisent pour le réacteur à un tassement théorique en fin de construction de 130 mm, puis de 150 mm au bout de plusieurs années par suite du fluage. Le tassement total se répartit théoriquement de la manière suivante :

- alluvions sablo-graveleuses : 5 %;
- craie pâteuse et zone de transition : 75 % à 80 %;
- craie rocheuse : 20 % à 15 %.

Pour ces calculs, il est attribué à la craie pâteuse proprement dite et à la zone de transition, les mêmes caractéristiques, celles-ci étant définies à partir de l'ensemble des mesures faites sur ces deux terrains.

En fin de construction, le fluage représenterait 25 % du tassement de la craie pâteuse, ce pourcentage atteignant 30 % environ après plusieurs années.

Pour 375 000 kN, le tassement théorique moyen est de 47 mm pour un tassement mesuré de 54 mm. Compte tenu des difficultés pour connaître les charges d'ouvrages et remblais périphériques à un instant donné, l'écart entre le calcul et les mesures n'est actuellement pas significatif.

La figure 7 montre qu'à proximité du réacteur 1, les reconnaissances donnent une épaisseur de craie pâteuse de 10 m, soit une épaisseur de craie pâteuse plus zone de transition de 14 m. Les tassements théoriques comme les tassements calculés, conduisent à une compressibilité moyenne de 0,02 mm par mètre et par kN/m².

En périphérie du réacteur, les tassements minimaux mesurés pour 375 000 kN sont 40 mm alors que les tassements maximaux atteignent 65 mm. Cette différence de tassement résulte de la dissymétrie des charges et des variations stratigraphiques. Pour une stratigraphie constante, le calcul montre que la dissymétrie des charges autour du réacteur introduit un écart entre les tassements minimaux et maximaux au plus égal à 10 mm. Il semble donc que la stratigraphie soit plus variable sur de faibles distances que ne le laissent supposer les reconnaissances effectuées.

Outre les tassements observés des bâtiments de l'îlot nucléaire, les déformations du sol ont été également mesurées sous les préchargements des réfrigérants. Ces mesures ont été effectuées à l'aide d'Extensofor (mis en œuvre par Télémac).

Nous n'examinerons pas en détail les mesures faites; celles-ci doivent faire l'objet d'une communication au « Symposium International sur la Reconnaissance des Sols et des Roches par Essais en Place » (Paris, mai 1983).

Sous le préchargement du réfrigérant n° 1, le tassement de la craie pâteuse et de la zone de transition est, suivant les repères, compris entre 0,02 et 0,025 mm par mètre par kN/m². La borne haute correspondrait à un tassement du réacteur d'environ 180 mm.

Ces tassements unitaires permettent de calculer un module moyen de déformation de la craie pâteuse. Si l'on ne tient pas compte de la diffusion des contraintes en profondeur (hypothèse acceptable dans la mesure où l'îlot nucléaire présente de grandes dimensions alors que la couche compressible est d'épaisseur limitée et située à faible profondeur), on en déduit un module moyen de déformation E de 40 à 50 MPa.

Une première estimation des tassements peut être faite à partir des essais in situ, en particulier des essais pressiométriques. Le module pressiométrique moyen (moyenne harmonique) de la craie pâteuse et de la zone de transition (Cf. fig. 11) est $E_m = 9$ MPa. En utilisant les formules des normes pressiométriques pour le calcul des tassements, on trouve que, pour obtenir les tassements observés, le coefficient de structure (α) doit être de 0,33 à 0,5 suivant la formule utilisée. La valeur $\alpha = 0,33$ correspond, d'après les normes, à un sable normalement consolidé avec $E/P\ell = 7$ à 12, et la valeur de 0,5 à un limon normalement consolidé avec $E/P\ell = 8$ à 14. Il ne paraît pas illogique de considérer la craie pâteuse comme une sol normalement consolidé intermédiaire entre les sables et les limons. Rappelons en effet que ce sol a un indice de plasticité faible, de l'ordre de 5 %.

7 Caractéristiques dynamiques

Elles peuvent être estimées à partir d'essais in situ du type « down hole » et « cross hole » et à partir d'essais de laboratoire.

Les essais « down hole » ou « cross hole », dont on ne reviendra pas sur le principe, permettent de définir les vitesses de propagation dans le sol des ondes longitudinales et transversales. A partir des vitesses transversales, on calcule le module de cisaillement dynamique (G_{max}) par : $G_{max} = \rho V_s^2$ avec ρ = masse spécifique du sol.

L'intérêt de la mesure de la vitesse des ondes transversales réside dans le fait qu'elle permet d'apprécier les caractéristiques dynamiques du sol sans utiliser le coefficient de Poisson.

Le module dynamique d'un sol est d'autant plus faible que la distorsion induite par la sollicitation est élevée. Les mesures in situ où la distorsion est très faible permettent ainsi la détermination de G_{max} .

Les résultats des essais in situ effectués par la Compagnie de Prospection Géophysique Française sont donnés figures 18 et 19. Dans la craie rocheuse, les essais « down hole » et « cross hole » conduisent à des résultats sensiblement équivalents. On peut retenir en moyenne :

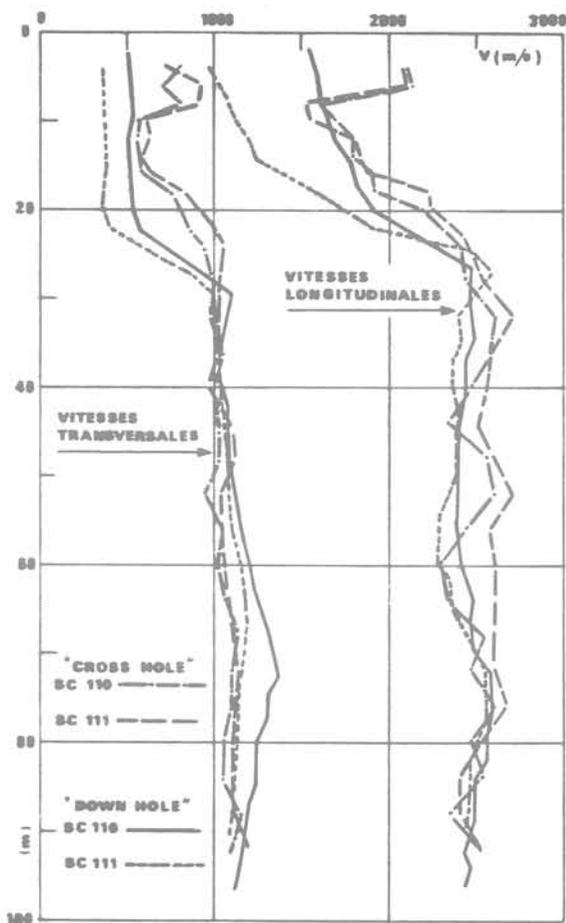


Fig. 18

- à 20 m de profondeur : $V_s = 1000$ m/s d'où $G_{max} \approx 2000$ MPa;
- à 80 m de profondeur : $V_s = 1200$ m/s soit $G_{max} \approx 3000$ MPa.

Dans la craie pâteuse, la vitesse minimale de propagation des ondes transversales est d'après les essais « cross hole » $V_s = 600$ m/s. Cette vitesse minimale correspond à la zone comprise entre 10 m et 16 m de profondeur.

Au-dessus de 10 m, et sous 16 m l'essai ne peut donner le module réel de la craie pâteuse : en effet, les mesures sont interprétées en trajet direct alors que, compte tenu des alluvions susjacentes et de la craie rocheuse sous-jacente de caractéristiques nettement plus élevées, l'onde réfractée présente un temps de parcours plus faible que l'onde directe.

Dans la craie pâteuse, les essais « down hole » donnent une vitesse transversale plus faible (400 m/s à 500 m/s).

En laboratoire, les caractéristiques dynamiques sont déduites d'essais à la colonne résonnante pour les modules (G) correspondant à une très faible déformation (distorsion γ inférieure à 10^{-5}) et d'essais à l'appareil triaxial dynamique pour les distorsions supérieures à 10^{-5} . Dans les deux cas, les éprouvettes sont consolidées de manière isotrope avec contrepression de façon à assurer la saturation la plus complète. L'essai se fait à drainage fermé.

Dans la mesure du possible, les deux types d'essais sont effectués sur des éprouvettes prélevées côte à côte dans le même échantillon, ou même mieux sur la même éprouvette.

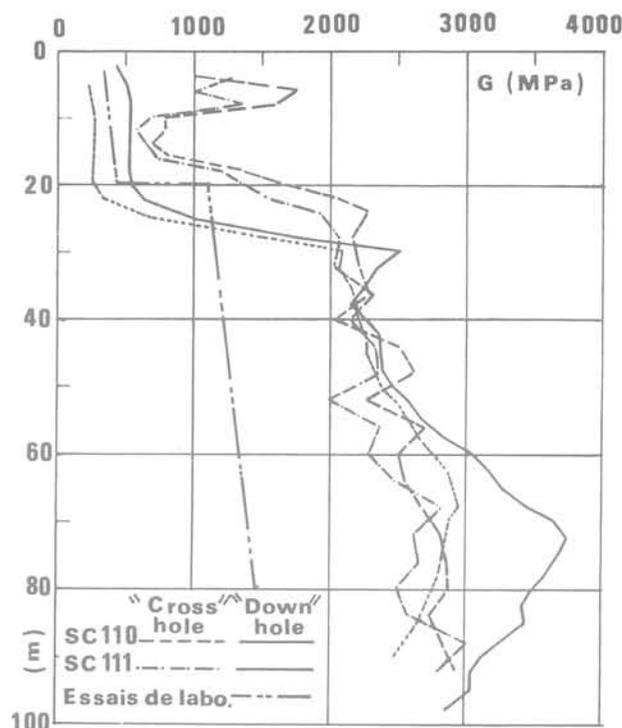


Fig. 19

L'expression du module dynamique est de la forme :

$$G = G_{max} / [1 + \gamma / \gamma_r]$$

G_{max} = module dynamique maximal de cisaillement, c'est-à-dire à distorsion nulle.

γ = distorsion.

γ_r = constante caractéristique du matériau considéré.

La valeur de G_{max} dépend pour un matériau donné des caractéristiques intergranulaires Cd , ϕd et de l'état de consolidation. Par analogie avec les matériaux sableux et se basant sur la théorie des états correspondants, on a écrit :

$$G_{max} = A [\bar{\sigma}_3 + Cd \cotg \phi d]^\alpha$$

Seuls les essais à la colonne résonnante ont été considérés pour la détermination de G_{max} . On obtient : $A = 950$, $\alpha = 0,58$ (G_{max} , $\bar{\sigma}_3$ et Cd étant exprimés en MPa).

La valeur de γ_r , déduite des essais triaxiaux dynamiques, est $\gamma_r = 4 \cdot 10^{-4}$.

Pour calculer G_{max} in situ, il faut substituer dans l'expression ci-dessus $\bar{\sigma}_m$ à $\bar{\sigma}_3$ ($\bar{\sigma}_m$ = contrainte intergranulaire moyenne).

La figure 20 donne le résultat d'un essai triaxial dynamique.

L'application de la formule précédente à un point situé à 12 m de profondeur dans la craie pâteuse donne $G_{max} = 410$ MPa, soit une vitesse de propagation des ondes transversales $V_s = 450$ m/s. Il y a relativement bon accord entre les modules de cisaillement déduits des essais de laboratoire et du « down hole » in situ.

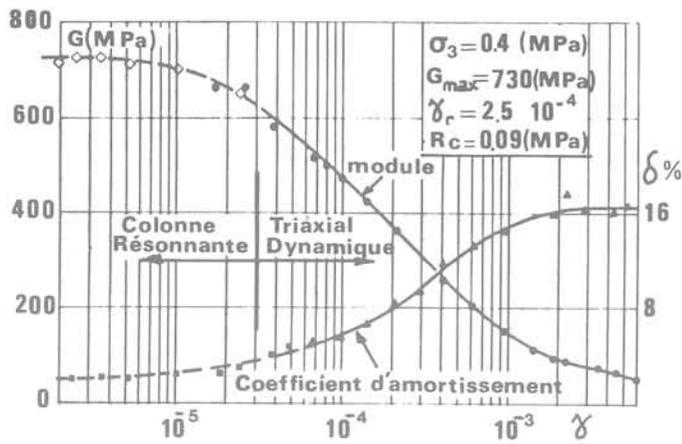


Fig. 20

La moins bonne corrélation entre les essais de laboratoire et les essais « cross hole » pourrait être justifiée par le fait qu'à faible profondeur, la sollicitation « cross hole » ne met pas uniquement en jeu des ondes de volume. Des recherches dans cette direction sont entreprises par le SEPTEN.

Pour un sable, on a $G_{max} = \alpha K_2 \bar{\sigma}_m^{1/2}$, K_2 variant de 50 pour les sables lâches à 100 pour les sables compacts ($\alpha = 7$ si $\bar{\sigma}_m$ et G sont exprimés en MPa). Moyennant l'introduction du terme $Cd \cotg \phi d$, on obtient, pour la craie pâteuse, une expression équivalente, l'exposant du terme des contraintes étant très comparable. On en déduit $K_2 \approx 110$. Du point de vue dynamique, la craie pâteuse serait équivalente à un sable très dense.

Enfin, des essais de liquéfaction (cf. fig. 21) ont été effectués sur la craie pâteuse. Celle-ci présente un comportement tout à fait analogue à celui d'un sable avec une montée en pression interstitielle au fur et à mesure de l'application de la sollicitation dynamique. Par contre, à la différence d'un sable, on constate que la valeur de u/σ_3 peut être supérieure à 1. Ceci est conforme avec la théorie puisque la craie ayant une cohésion intergranulaire (Cd) la pression interstitielle maximale qui peut théoriquement se développer est $[\sigma_3 + Cd \cotg \phi d]$.

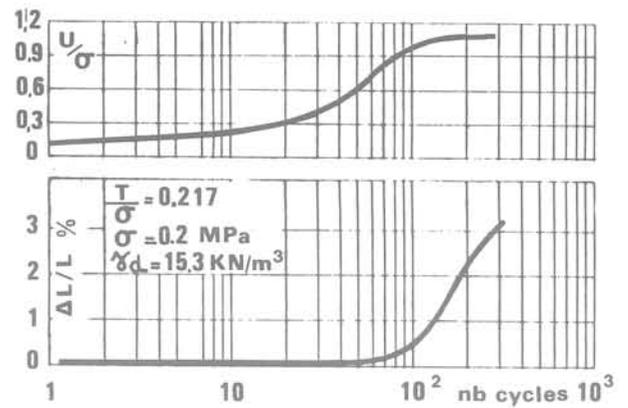


Fig. 21

Références bibliographiques

- F. Baguelin, J. F. Jezequel, D. H. Shields. The pressurometer and foundation engineering 1^{re} Edition Trans Tech Publications 1978.
- M. Cassan. Les essais in situ en Mécanique des sols, Éditions Eyrolles, 1978.
- J. M. Duncan, Chin Yund Chang. Non linear analysis of stress and strain in soils. Journal of the soil mechanics and foundations division ASCE September 1970 - Paper n° 7513.
- E. D. F.-COYNE et BELLIER-MECASOL. Contrôle d'un préchargement de fondation à Nogent-sur-Seine. Communication présentée au Symposium International « Reconnaissance des Sols et des Roches par Essais en Place. » Paris, 18, 19 et 20 mai 1983.
- J. K. Mitchell and al. Soil creep as a rate process. Journal of the soil mechanics and foundation division ASCE January 1968, vol. 94.
- G. Sanglerat. The penetrometer and soil exploration Elsevier publishing company, 1972.